

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

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

OVĚŘENÍ RŮZNÝCH DRUHŮ POPÍLKŮ PRO VÝROBU UMĚLÉHO KAMENIVA

VERIFICATION OF DIFFERENT TYPES OF FLY ASH FOR PRODUCTION OF ARTIFICIAL
AGGREGATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Milan Zahálka

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. MILAN ZAHÁLKA
Název Ověření různých druhů popílků pro výrobu umělého kameniva
Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce 17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013

V. z. V. S. izh!

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

M. Zahálka

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT



Bibliografická citace VŠKP

ZAHÁLKA, Milan. *Ověření různých druhů popílků pro výrobu umělého kameniva: Diplomová práce*. Brno, 2014. 98 stran, 4 strany příloh. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Abstrakt

Diplomová práce udává přehled lehkých umělých kameniv na bázi popílků. Popílký jako zbytky po spalování uhlí jsou v současné době jedny z nejvíce využívaných druhotných surovin pro nové stavební materiály v rámci výzkumných prací. Výsledky ukazují, že vedlejší energetické produkty nejen často plnohodnotně nahrazují primární složky, ale v mnoha případech zlepšují vlastnosti finálních stavebních výrobků. Byl zkoušen široký soubor popílků nejen z tuzemských zdrojů a byly určeny jejich hlavní parametry důležité pro jejich další využití. Dále je řešena laboratorní výroba umělého kameniva na bázi popílků a to jak spékáním, tak i vytvrzováním za studena a následná výroba umělého popílkového kameniva v technologických podmínkách. Současně se práce zaměřuje na posouzení vhodnosti popílkového kameniva do lehkých betonů. Bylo zjištěno, že nejkvalitnějšími popílký pro výrobu spékaného kameniva jsou popílký vysokoteplotní, pro kamenivo vytvrzované za studena pak popílký fluidní. Dále bylo ověřeno, že oba vyrobené typy kameniv jsou použitelné do lehkých betonů třídy LC 20/22. Převážná většina vyrobených kameniv je také vhodná pro výrobu lehkých betonů třídy LC 30/33. Bylo prokázáno, že spékané popílkové kamenivo lze využít i pro lehké vysokopevnostní betony třídy LC 50/55. Zkouškami bylo také ověřeno, že všechny zkoušené popílký a produkty z nich vyrobené splňují požadavky legislativy na vliv na životní prostředí.

Abstract

Diploma thesis gives an overview of artificial lightweight aggregates based on fly ash. Fly ash such as the residues of coal burning is currently one of the most used secondary raw materials for new building materials for research papers. The results shows that the secondary energy products are not just fully substitute the primary component, but in many cases improves the final properties of building products. Wide complex of fly ashes not only from domestic sources was tested and it's main properties important for it's further application was determined. Laboratory production of artificial aggregates based on fly ash made by sintering and also by cold bonding and following manufacture of artificial fly ash aggregates in technological conditions are also solved. The thesis is simultaneously concentrate on review of the suitability of fly ash aggregates in lightweight concrete. It was found that the highest quality fly ash for the production of sintered fly ash aggregate is fly ash and FBC ash is the best for the production of cold

bonded aggregates. It was also verified that both types of aggregates are applicable to lightweight concrete class LC 20/22. The vast majority of manufactured aggregates is suitable for the production of lightweight concrete class LC 30/33. It was demonstrated that the sintered fly ash aggregates can be also used for high strength lightweight concrete class LC 50/55. Tests have also verified that all tested fly ashes and products produced from them meet the requirements of legislation on environment.

Klíčová slova

Umělé kamenivo, spékání, sbalkování, druhotná surovina, popílek, tepelná elektrárna, fluidní popílek, cement, vápno, lehký beton.

Keywords

Artificial aggregate, sintering, cold-bonding, secondary raw material, fly ash, thermal power plant, FBC ash, cement, lime, lightweight concrete.

Prohlášení:

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

V Brně dne

.....
Bc. Milan Zahálka

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Rostislavu Drochytkoví, CSc., MBA a Ing. Vítu Černému, Ph.D., kteří mi byli nápomocni při zpracování diplomové práce.

Diplomová práce byla vytvořena v rámci řešení projektu MPO FR-TI2/351 s názvem „Nové technologie vysokohodnotného pórovitého kameniva z různých druhů popílků“.

V Brně 2014

Bc. Milan Zahálka

Obsah

Úvod	- 12 -
Cíl práce	- 13 -
Teoretická část	- 14 -
1. Lehká umělá kameniva	- 14 -
1.1. Umělá anorganická kameniva	- 14 -
1.1.1. Keramzit	- 14 -
1.1.2. Expandit	- 15 -
1.1.3. Expandovaný perlit	- 15 -
1.1.4. Vermikulit	- 17 -
1.1.5. Kavitit	- 17 -
1.2. Umělá kameniva z popílků	- 18 -
1.2.1. Agloporit	- 18 -
1.2.2. Lytag	- 21 -
1.2.3. Pollytag	- 22 -
1.2.4. Aardelite	- 22 -
1.2.5. Rugen	- 24 -
1.2.6. Kabet	- 24 -
1.2.7. Karit	- 24 -
1.3. Porovnání vlastností umělých lehkých kameniv	- 25 -
2. Popílký z energetických zařízení	- 25 -
2.1. Úletový popílek z klasického způsobu spalování	- 25 -
2.2. Létavý popílek z fluidního způsobu spalování	- 27 -
3. Popis vzniku keramického střepu	- 28 -
3.1. Tvorba taveniny	- 29 -
3.2. Reakce minerálů při výpalu	- 30 -
3.3. Vyhořívání organických látek	- 31 -
3.4. Vliv železa na popílkový střep	- 32 -
4. Proces hydratace fluidních popílků	- 32 -
5. Výpal fluidních popílků	- 33 -
5.1. Tepelný rozklad vápence	- 33 -
5.2. Tepelné fáze sádrovce	- 34 -
6. Přehled základních vlastností popílků a cementu	- 35 -
Metodika řešení diplomové práce	- 37 -
1. Návrh věcného plnění cílů diplomové práce	- 37 -
2. Postupy jednotlivých stanovení	- 41 -
2.1. Stanovení ztráty sušením	- 41 -
2.2. Stanovení vlhkosti	- 41 -
2.3. Stanovení ztráty žíháním	- 41 -
2.4. Stanovení sypané hmotnosti volně sypané i setřesené	- 41 -
2.5. Stanovení zrnitosti síťovým rozbořem	- 41 -

2.6.	Rentgenová difrakční analýza.....	- 41 -
2.7.	Rastrovací elektronová mikroskopie	- 42 -
2.8.	Stanovení objemové hmotnosti zkušebních vzorků spékaných a za studena vytvrzovaných popílků vyrobených v laboratorních podmínkách	- 42 -
2.9.	Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních vzorků spékaných a za studena vytvrzovaných popílků vyrobených v laboratorních podmínkách	- 42 -
2.10.	Stanovení nasákavosti	- 42 -
2.11.	Stanovení odolnosti proti drcení	- 42 -
2.12.	Sednutí kužele	- 42 -
2.13.	Stanovení objemové hmotnosti betonu	- 42 -
2.14.	Stanovení pevnosti v tlaku betonu.....	- 42 -
2.15.	Zkouška vyluhovatelnosti	- 43 -
2.16.	Zkouška ekotoxicity	- 44 -
	Experimentální část	- 45 -
1.	Etapa I. - Vstupní suroviny	- 45 -
1.1.	Základní parametry surovin	- 45 -
1.1.1.	Chemické složení	- 47 -
1.1.2.	Mikroskopický rozbor.....	- 48 -
1.1.3.	Mineralogický rozbor	- 51 -
1.1.4.	Příprava zkušebních vzorků na bázi popílků	- 52 -
1.2.	Environmentální parametry tuzemských popílků	- 53 -
1.2.1.	Vyluhovatelnost škodlivin	- 53 -
1.2.2.	Ekotoxicita.....	- 55 -
1.3.	Shrnutí vhodnosti surovin pro technologii výroby umělých popílkových kameniv . -	57 -
2.	Etapa II. - Laboratorní zkoušky popílkového kameniva	- 57 -
2.1.	Spékané umělé kamenivo.....	- 57 -
2.1.1.	Vlastnosti vstupních surovin.....	- 57 -
2.1.2.	Environmentální parametry popílkového střepu.....	- 62 -
2.2.	Kamenivo vytvrzované za studena	- 64 -
2.3.	Shrnutí vlastností popílkového kameniva vyrobeného v laboratorních podmínkách	- 69 -
2.3.1.	Spékané popílkové kamenivo.....	- 69 -
2.3.2.	Kamenivo vytvrzované za studena	- 69 -
3.	Etapa III. - Ověření výroby popílkového kameniva v technologických podmínkách- 70	-
3.1.	Spékané umělé kamenivo.....	- 70 -
3.2.	Kamenivo vytvrzované za studena	- 73 -
3.3.	Environmentální parametry výroby a využití umělého kameniva	- 74 -
3.3.1.	Vyluhovatelnost škodlivin	- 74 -
3.3.2.	Grafické porovnání vlastností popílků, popílkového střepu a kameniva vyrobeného z popílků.....	- 75 -

3.3.3. Ekotoxicita.....	- 77 -
3.4. Shrnutí vlastností umělého popílkového kameniva vyrobeného v technologických podmínkách	- 78 -
4. Etapa IV. - Orientační ověření využitelnosti umělého popílkového kameniva v betonech.....	- 79 -
4.1. Zkoušky lehkých betonů běžných pevnostních tříd s použitím umělého kameniva - 79 -	
4.2. Vysokopevnostní lehké betony	- 84 -
4.3. Environmentální parametry lehkých betonů z umělého popílkového kameniva- 88 -	
4.3.1. Vyluhovatelnost škodlivin	- 88 -
4.3.2. Ekotoxicita.....	- 89 -
4.4. Shrnutí orientačních zkoušek využití popílkového kameniva v betonech	- 89 -
Diskuze výsledků	- 90 -
Etapa I. - Vstupní suroviny	- 90 -
Etapa II. - Laboratorní zkoušení popílkového kameniva	- 90 -
Etapa III. - Ověření výroby popílkového kameniva v technologických podmínkách .	- 91 -
Etapa IV. - Orientační ověření využitelnosti umělého popílkového kameniva v betonech- 91 -	
Závěr	- 92 -
Literatura	- 94 -
Seznam obrázků.....	- 96 -
Seznam tabulek	- 96 -
Seznam grafů	- 97 -

Seznam zkratek

VEP	Vedlejší energetický produkt
LAB	Laboratorní podmínky
TECH	Technologické podmínky
EDE	Popílek z elektrárny Dětmárovice
ECH	Popílek z elektrárny Chvaletice
ELE	Popílek z elektrárny Ledvice
ELE K3	Klasický popílek z elektrárny Ledvice
ELE K4	Fluidní popílek z elektrárny Ledvice
ELE K4 - L	Ložový popel z elektrárny Ledvice
EMĚ	Popílek z elektrárny Mělník
EPC	Popílek z elektrárny Počeradý
EPR	Popílek z elektrárny Prunéřov
ETI	Popílek z elektrárny Tisová
ETU	Popílek z elektrárny Tušimice
ETU EO1	Popílek z elektrárny Tušimice, elektrický odlučovač 1
ETU EO2	Popílek z elektrárny Tušimice, elektrický odlučovač 2
EHO	Popílek z elektrárny Hodonín
ETI	Popílek z elektrárny Tisová
SKW	Skawina
AM	ArcelorMittal Ostrava
LC	Lightweight Concrete (Lehký beton)
LWHSC	Lightweight High-Strenght Concrete (Vysokopevnostní lehký beton)

Úvod

Zpracování vedlejších energetických produktů je významnou možností náhrady přírodních materiálů běžně používaných při výrobě stavebních hmot. Spalováním uhlí v kotlích tepelných elektráren a tepláren vznikají tuhé zbytky – popeloviny. Jejich vlastnosti jsou dány charakterem spalovacího procesu. Spalovací procesy v elektrárnách a teplárnách probíhají v různých ohništích (roštová, prášková, fluidní, granulační, tavné).

Popílky ze spalovacích procesů uhelných elektráren se v současnosti používají velkoobjemově spíše jen na zásypy a ve větším podílu ve směsi také na výrobu pórobetonu. Výroba umělého popílkového kameniva je další ze způsobů, jak do surovinové směsi zakomponovat minimálně 80 % popílku.

Umělé kamenivo rozdělujeme podle objemové hmotnosti na hutné s objemovou hmotností nad 2000 kg/m^3 a pórovité s objemovou hmotností pod 2000 kg/m^3 . Tato práce se bude zabývat vlastnostmi popílků z různých energetických zařízení a jejich vhodností pro výrobu umělého popílkového kameniva. Dále bude zkoumána výroba umělého popílkového kameniva spékáním i studenou cestou v laboratorních i technologických podmínkách a v závěrečné části práce bude vybrané kamenivo použito pro výrobu lehkých betonů.

CÍL PRÁCE

Umělé popílkové kamenivo je jeden z optimálních způsobů využití popílků v maximálním podílu. V zásadě existují dva hlavní způsoby výroby tohoto kameniva. První z nich je založen na spékání, kdy je k popílku před granulací a výpalem přimísen optimální podíl paliva. Druhý způsob vhodně využívá pojivových vlastností kombinace popílek-cement (vápno).

Cílem práce je ověření vhodnosti širokého souboru nejen tuzemských popílků pro výrobu umělých kameniv.

Cílem teoretické fáze diplomové práce bude rešerše dostupných tuzemských i zahraničních materiálů, týkajících se technologií výroby umělých kameniv nejen z popílků. Jedná se o zmapování současné situace na poli lehkých umělých kameniv. Dále se bude zabývat popílkem z energetických zařízení a jejich vlastnostmi a využitím. Poslední část této fáze bude zaměřena na proces výpalu zejména z keramického hlediska.

Praktická část práce bude rozdělena do čtyř na sebe navazujících etap. V první části bude kladen důraz na hodnocení popílků z tuzemských energetických zdrojů a jejich vhodnost pro výrobu kameniva. Budou provedeny různé zkoušky popílků, jako jsou ztráta žíháním, sytná hmotnost, zkouška zrnitosti, mineralogie a další. Druhá etapa se bude zabývat vlastnostmi umělého popílkového kameniva a bude prováděna v laboratorních podmínkách. Jedna část bude řešit kamenivo spékané a druhá kamenivo za studena vytvrzované. Dále budou ve druhé etapě vytvořeny zkušební vzorky, na kterých bude zkoušena objemová hmotnost, pevnost v tlaku, nasákavost a další parametry.

Práce si klade za cíl také ověřit vybrané popílkem vhodné pro výrobu umělého kameniva v technologických podmínkách. Dále se bude zabývat zkoušením vlivu příměsí pojiva na výrobu umělého kameniva.

Dalším cílem řešení bude orientační ověření využitelnosti umělého popílkového kameniva v betonech. Budou vyrobeny zkušební vzorky základních lehkých betonů a bude zkoušena výroba vysokopevnostních lehkých betonů podle různých receptur, na kterých budou následně prováděny zkoušky. Hlavními parametry rozhodujícími o vhodnosti umělého kameniva do betonu jsou pevnost v tlaku a objemová hmotnost betonů, které budou na zkušebních tělesech zkoušeny.

TEORETICKÁ ČÁST

Tato část práce se udává přehled umělých popílkových kameniv včetně jejich vlastností a způsobu využití. Dále se zabývá teoretickým úvodem k popílkům z energetických zařízení. Teoretická část práce je také věnována problematice vzniku keramického střeptu a hydratačním procesům fluidních popílků.

1. Lehká umělá kameniva

V této části práce je uveden ucelený přehled známých lehkých umělých kameniv. Rešerše je zaměřena na jejich vlastnosti a, způsob použití. Tato kapitola práce je dále rozdělena na umělá kameniva na bázi různých surovin a na kameniva vyrobená z popílků.

1.1. Umělá anorganická kameniva

Tato fáze práce se věnuje kamenivům založených především na expandování jílu, břidlic, perlitu a dalších surovin.

1.1.1. Keramzit

Keramzit je umělý materiál kulatého tvaru získaný výpalem jílu, má zvláštní vnitřní pórovitou strukturu, výrazně se liší od té na povrchu. Barva keramzitu bývá obvykle hnědá, hnědočervená, u některých druhů může být i hnědo šedá. [10]



Obr. č. 1: Kamenivo keramzit [10]

1.1.1.1. Vlastnosti

Jedná se o zcela nehořlavý materiál, plně mrazuvzdorný. Objemová hmotnost granulovaného keramzitu u nás vyráběného bývá ve volně sypaném stavu 300 až 700 kg.m⁻³, nejčastěji 500 až 650 kg.m⁻³. Skutečné průměrné objemové hmotnosti keramzitu z Vintířova u frakce 0 až 4 mm jsou 651 kg.m⁻³, u frakce 4 až 16 mm 504 kg.m⁻³ a u frakce 16 až 22 mm potom 450 kg.m⁻³. Hmotnostní nasákavost keramzitu bývá 10 až 20 %, zpravidla však u hrubých frakcí 17 až 20 %.

Pevnosti při stlačení ve válci u našeho keramzitu bývají 2,8 až 4 Mpa. Mezerovitost keramzitu je poměrně velká, zvláště jestliže jde o úzce vytříděné frakce, kde činí 40 až 45 %. Z uvedené nasákavosti potom ještě vyplývá, že povrch keramzitu je z větší části uzavřený a voda proniká do

vysoce pórovité keramzitové struktury jen velmi omezeně. Pokud se týká škodlivin v keramzitu, jsou tyto hodnoty obvykle 0,37 % SO₃, 0,11 % S a 0,04 % ztráty žíháním. [1]

1.1.1.2. Využití

V následující tabulce jsou uvedeny způsoby využití keramzitu.

Tab. č. 1: Využití keramzitu [10]

- izolační zasypy stropů	- drenážní vrstva pro odvedení dešťové vody
- tepelná izolace střešních	- zimní posyp silnic a chodníků
- filtrační materiál pro vodní hospodářství	- zelené střechy - substrát pro výsadbu rostlin
- substrát pro kořenové čistírny odpadních vod	- zahradnické a dekorativní účely
- přísada do zdících materiálů pro zlepšení termoakustických vlastností zdiva	

1.1.2. Expandit

Z expandovaných hornin měla pro naše stavebnictví největší význam expandovaná břidlice zvaná expandit. [1]

1.1.2.1. Vlastnosti

Zrna expanditu jsou uvnitř silně, ale jemně pórovitá a barvu zde mají v tmavošedých odstínech. Zrna expanditu mají velkou pevnost. Kvalitní expandit plave na vodě. Měrná hmotnost expanditu je 2300 až 2600 kg.m⁻³. Jeho objemová hmotnost však bývá 500 až 800 kg.m⁻³, nejčastěji 550 až 650 kg.m⁻³ při vytříděné frakci 8 až 16, resp. 16 až 32 mm, tedy nepatrně více, než je tomu u granulovaného keramzitu. Nasákavost expanditu je asi 13 %. [1]

1.1.2.2. Využití

Expandované horniny jsou velmi kvalitním lehkým kamenivem do betonů a tepelně izolačních malt. Z expandované břidlice je možno připravovat běžnými výrobními způsoby všechny druhy lehkých betonů, jak mezerovité, tak hutné. Expandit je též vhodný pro lehké betony ve směsi s jinými pórovitými kamenivy, jejichž vlastnosti může významně vylepšovat. [1]

1.1.3. Expandovaný perlit

Expandovaný perlit je sklovitý, bílé barvy opálově zakalený a velmi jemně pórovitý. Jsou to vlastně drobné kuličky polyedrické pěny.



Obr. č. 2: Expandovaný perlit [11]

1.1.3.1. Vlastnosti

Expandovaný perlit má nízkou objemovou hmotnost, která je nejdůležitějším ukazatelem jeho jakosti. Pohybuje se od 70 do 450 kg.m⁻³. Menší objemové hmotnosti přísluší jemnějším frakcím, které se obvykle zachytávají v cyklónech. Nejjemnější podíly do 0,3 mm se někdy v zahraničí označují jako vakulit. Naš expandovaný perlit EP 100 mívá zpravidla objemovou hmotnost 80 kg.m⁻³, perlit EP 150 potom 120 až 150 kg.m⁻³. Expandovaný perlit je jedním z nejlepších izolačních materiálů. Zásyp z něho při zrnitosti do 3 mm při objemové hmotnosti 100 kg.m⁻³ má součinitel tepelné vodivosti 0,06 W.m⁻¹.K⁻¹. Expandovaný perlit má nepatrnou hygroskopičnost. Avšak nasákavost zejména u nejjemnějších frakcí je velmi vysoká a může činit i přes 300 % hmotnostně. Pouze hrubší méně expandovaná zrna perlitu mají nasákavost menší než 100 % hmotnostně. Nasákavost je tedy jednou z nejméně příznivých vlastností perlitu. Expandovaný volně sypaný perlit má dobrou zvukovou pohltivost při středních a vysokých frekvencích. Při 1200 Hz v tloušťce 20 mm je zde koeficient pohltivosti zvuku až 0,68. Protože pevnost zrn expandovaného perlitu je velmi malá, zjišťujeme někdy též tzv. vydatnost nebo křehkost perlitu, která udává stupeň jeho odolnosti proti rozrušení v míchačce na beton nebo maltu. Je vyjádřena poměrem objemu vyrobeného betonu k objemu použitého perlitu. Jakostní perlit má mít vydatnost větší než 1,00. Je chemicky inertní, nehořlavý a odolný vůči mrazu i vysokým teplotám (-200°C až +900°C), objemově stálý, sypaná hmotnost od 60 do 120 kg.m⁻³, nízký koeficient tepelné vodivosti. V ČR je vyráběn ve frakcích 0-0,2 a 0-4 mm. [1]

1.1.3.2. Využití

Expandovaný perlit se často používá jako tepelně izolační materiál ve formě zásypů pro nízké a vysoké teploty, jak pro průmyslové izolace (od -200 do + 900 °C), tak na stavbách, např. do dutých stěn, izolačních jader, pro zateplení stropů a podlah, pro teplovodní izolace apod. Jako malta nebo beton se perlit může používat s nejrůznějšími pojivy, např. s cementem, sádkou, vápnem, Sorelovou maltovinou, vodním sklem, bitumenovou emulzí, hlinitou suspenzí s pojivy z plastických látek apod. Osvědčilo se přitom jak přímé zpracování na stavbě, tak používání prefabrikátů. Nejdůležitější výrobky z expandovaného perlitu u nás jsou i perlitové malty, betony, keramoperlit, bitumenperlit, perlitové podušky, suché perlitové omítky, vapex, vapol, plastperlit. [1]

1.1.4. Vermikulit

Vermikulit je tmavě hnědý až tmavě šedozelený hydratizovaný hořečnatohlinitý slídovitý křemičitan, vzniklý zvětráváním jiných slíd. [1]



Obr. č. 3: Vermikulit [12]

1.1.4.1. Vlastnosti

Surový vermikulit má sypanou objemovou hmotnost 1400 až 1500 kg.m⁻³. Objemová hmotnost expandovaného vermikulitu bývá jenom 60 až 200 kg.m⁻³ a tudíž vermikulit má velmi nízký součinitel tepelné vodivosti. Protože teplota tání vermikulitu je asi 1350 °C, je ho možno používat pro tepelné izolace i při vyšších teplotách, protože je žáruvzdorný. [1]

1.1.4.2. Využití

V rámci stavební výroby je využíván jako hlavní surovina pro výrobu protipožárních, nehořlavých a žáruvzdorných desek, lisovaných izolačních tvárnic; odlehčených, izolačních a žáruvzdorných betonů; vermikulitových omítek s tepelně izolačními a žáruvzdornými vlastnostmi. V zahraničí se vermikulit používá pro průmyslové tepelné izolace, při výrobě laků a barev a v jiném chemickém průmyslu. Ve stavebnictví se užívají tepelně izolační malty a betony. [1]

1.1.5. Kavitit

Kavitit bylo lehké betonářské kamenivo vyráběné z cihlářských hlín tím způsobem, že se z nich vyformovaly duté kuličky, které se potom vypálily při teplotách běžných v cihlářském průmyslu. Tyto duté kuličky z cihlářského střepu, kterým jsme u nás říkali kavitit, měly průměr 10 až 30 mm a tloušťku stěny 1,5 až 3,5 mm. [1]

1.1.5.1. Vlastnosti

Objemová hmotnost kavititu byla 600 až 900 kg.m⁻³, mezerovitost 40 až 45 %, nasákavost 17 až 20 %. Součinitel tepelné vodivosti kavititového betonu činil při objemové hmotnosti betonu 1000 až 1200 kg.m⁻³ ve vysušeném stavu 0,35 až 0,47 W.m⁻¹.K⁻¹. Podle Cammerera se zde předpokládalo 7 % objemové vlhkosti při praktickém použití, takže kavititový beton se nám jevil méně příznivým než beton z keramzitu o stejné objemové hmotnosti. [1]

Horší tepelně izolační vlastnosti kavititového betonu ve srovnání s ostatními našimi lehkými betony v úplně suchém stavu bylo možno považovat za důsledek zejména:

- nadměrně velkých dutin vlastního kavititu, kde se ve zvýšené míře projevil přenos tepla

sáláním a prouděním,

- vlastního poměrně hutného střepu kavititu, který vytvářel v betonu velmi početné tepelné mosty, které silně zvyšovaly celkové šíření světla vedením,
- mezerovitosti kavititového betonu, která byla značná zvláště u jednozrnného betonu o menší objemové hmotnosti. Takový beton byl potom velmi provzdušněný, což mělo za následek rovněž nadměrné zvýšení tepelných ztrát vlivem proudění.
- Nasákavost kavititového betonu byla cca 15 %, smrštění po 28 dnech činilo pouze 0.2 mm/m. Kavititový beton se mohl použít jak tepelně izolační, tak i jako nosný beton. [1]

1.1.5.2. Využití:

Kavitit byl určen především pro výrobu jemnozrnných betonů, ale bylo možno z něho vyrábět i betony o menší mezerovitosti. Při spotřebě cementu 120 až 400 kg.m⁻³ jsme dostávali kavititové betony o objemové hmotnosti 900 až 1450 kg.m⁻³ a pevnosti v tlaku 3 až 12 MPa. tj. jako u hutného keramzitového betonu s 200 kg cementu, tedy celkem dobré pevnosti. [1]

1.2. Umělá kameniva z popílků

Tato část práce se zaměřuje na umělá kameniva vyrobená spékáním popílků a vytvrzováním sbalkovaných popílků za studena.

1.2.1. Agloporit

Jako agloporit označujeme skupinu pórovitých kameniv vyráběných slinováním krátkodobým výpalem prováděným zpravidla na aglomeračních rostech. U nás se pod názvem agloporit rozumí potom agloporit popílkový, což je umělé pórovité kamenivo získávané sbalkováním létavých popílků vznikajících spalováním domácích černých a hnědých uhlí a spékáním syrových sbalků na aglomeračním roštu. [1]

1.2.1.1. Technologie výroby agloporitu Corson

Mezi známé technologie výroby agloporitu patří výrobní postup vyvinutý americkou firmou Corson. Tato technologie se používala v 80. letech v ČR. Dlouhodobým provozováním několika výrobních závodů bylo získáno dostatek zkušeností a praktických poznatků, proto také tuto technologii lze zařadit mezi klasické a obecně známé výrobní procesy. Pro technologii Corson podobně jako u jiných způsobů výroby agloporitu se popílek odebírá v elektrárně z elektrofiltrů v suchém stavu a je většinou pneumaticky přepravován do skladovacích zásobníků obsahu asi 150 t pro každou výrobní linku. K výrobním účelům je většinou používán popílek o nízkém obsahu spalitelných látek (1 – 2 % hmot.), v technologickém souboru přípravy surovin je proto zařazeno mokré mletí korekčního paliva. K danému účelu je tradičně používáno uhlí spalované v elektrárně (hruboprach), případně ve směsi s proplástkem. Při mokré mletí vzniká uhelná hydrosměs, která variantně může obsahovat přídavek sulfitového výluhu jako plastifikátoru. Suchý popílek je smáčen korekční palivovou hydrosměsí v horizontálním rychloběžném mixeru v poměru vstupních surovin, který zajišťuje optimální vlhčení na výstupu mixeru. [18]

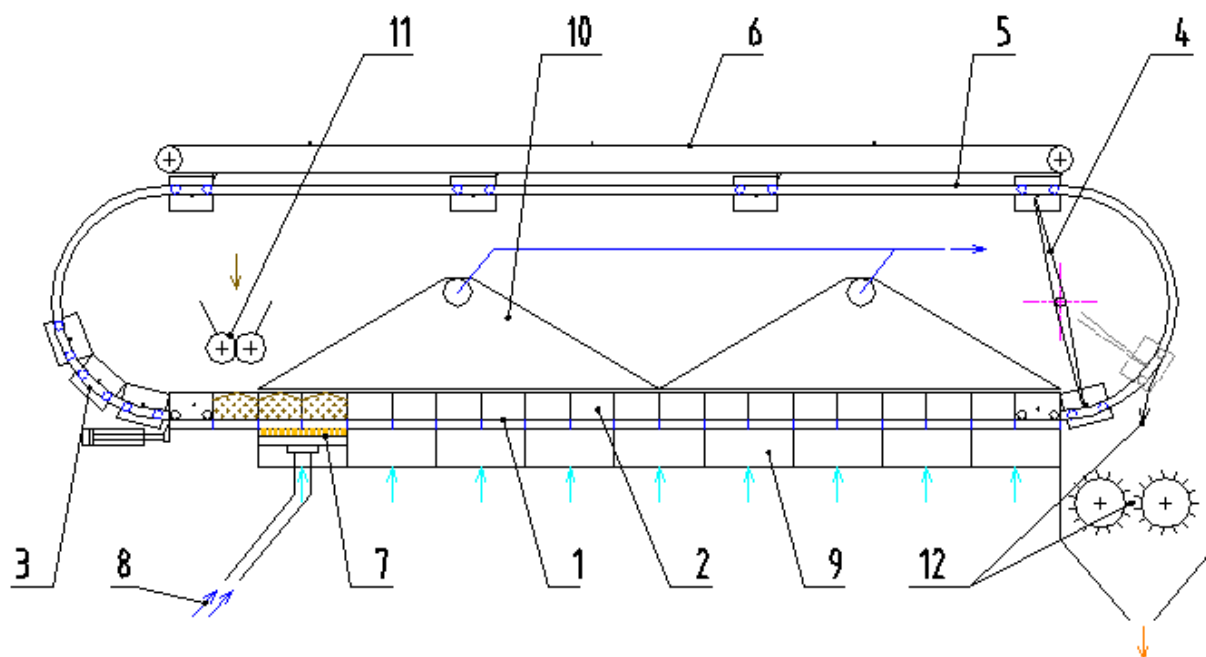
Syrové sbalky z optimálně vlhčené směsi se vytvářejí na válcovém granulátoru s rýhovými válci. Dezén pogumovaných válců je konstrukčně upraven pro výrobu zrn frakce 8 - 16 mm s tím, že z granulátoru vystupují zrna lichoběžníkového průřezu v různých délkách v závislosti na

plastičnosti použité suroviny. Vytvářená zrna se samovolně odlamují a padají na aglomerační rošt a vytváří vrstvu syrové vsázky o výšce dané rychlostí posunu roštu, případně je výška vsázky upravována nastavením výšky hradítka na roštu. [18]

Vlastní aglomerační zařízení je pás složený ze 105 roštových palet posunovaných hydraulicky krokově vždy o rozteč jedné palety (50 cm) nad vzduchovými komorami, do nichž se vhání tlakový vzduch. Vrstva syrových sbalků se nad hořákovou skříní zapaluje zespodu soustavou plynových hořáků. Hořáková komora je vybavena samostatným přívodem tlakového vzduchu, který se seřizuje podle podmínek zapalování vsázky. Vrstva syrové vsázky se společně s roštem pohybuje ve vodorovném směru nad soustavou tlakových komor, které jsou plněny spalovacím vzduchem ze společného přívodu od ventilátorů, každá tlaková komora je vybavena samostatnou regulační klapkou pro nastavení tlaku vzduchu. Prohořívání vsázky ve vertikálním směru probíhá tak, že v první třetině roštu převažuje proces předsoušení vsázky s postupným výpalem spodních vrstev, ve druhé třetině roštu probíhá výpal vsázky postupně v celém jejím profilu, ve třetí třetině roštu probíhá chlazení vypálených spečenců agloporitových zrn v podmínkách zvýšeného množství prosávaného chladicího vzduchu. Spečence jsou v běžných provozních podmínkách ochlazený na teplotu 150 až 200 °C, při dobře seřízeném provozu pracovní linky jsou spečence chlazený na teplotu nižší (60 – 100 °C). [18]

Proces chlazení vypáleného kameniva může být urychlován skrápěním vodou. Z technologického hlediska je takové urychlování chlazení vypálené vsázky spíše nevýhodné, v procesu následného drcení a třídění umělého kameniva se na vlhká zrna nalepují prachové nevypálené části, které zhoršují ostrost třídění kameniva. Prachové části nalepené na vlhká zrna hrubších frakcí mohou být na volných skládkách kameniva v některých případech i zdrojem nežádoucí sekundární prašnosti. [18]

Agloporitové spečence při vyklápění padají do dvouválcového drtiče se zubatými válci, tento první stupeň úpravy zajišťuje pouze hrubé rozdružení spečenců, k další úpravě je tak dopravována směs jednotlivých zrn a malých spečenců vypálených zrn (do 10 cm). Vlastní proces třídění zajišťuje produkci drceného kameniva tříděného do frakcí, a to zpravidla podle ČSN na zrnění 0 - 4, 4 - 8, 8 - 16 nebo i 16 - 22 mm. Povrch zrn je částečně slinutý a je cihlově červené až fialové barvy, někdy též okrově zbarvený (v závislosti na chemickém složení popílku). Červený povrch vypálených zrn je dán obsahem železa, které na povrchu zrna v podmínkách dostatečného přísunu kyslíku se vyskytuje v trojmocné formě. Vnitřní část vypáleného zrna je pórovitá a má i při dobrém vypálení barvu černou, v tomto případě se železo vyskytuje jako dvojmocné. Jak bude dále uvedeno, používají se pro tepelně izolační i konstrukční betony. Zjednodušené schéma roštové výroby agloporitu technologií Corson je na obr. č. 4. [18]



Obr. č. 4: Schéma technologie Corson [18]

Vysvětlivky:

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1 – Spodní nosná dráha roštu | 7 – Plynová zapalovací hlava |
| 2 – Aglomerační rošt z litinových palet | 8 – Přívod plynu a přidavného vzduchu |
| 3 – Zásobník litinových palet | 9 – Komory tlakového spalovacího |
| 4 – Překlápěcí rameno | 10 – Odtahové komory |
| 5 – Vratná dráha palet | 11 – Válcový granulátor |
| 6 – Řetězová posuv palet | 12 – Vyklápění a drcení spečenců |

Pokud se týká ještě technologie výroby agloporitu na spékacích zařízeních, je třeba obecně uvést ještě toto. Agloporitové spečence vycházející ze spékacích zařízení je třeba nejprve chladit, protože opouštějí pás často i s teplotou 900 °C. Takové případy by měly být spíše výjimečné a vyskytují se při výpalu špatně prodyšné vsázky obsahující vysoký podíl drobných nezgranulovaných zrn. Platí zde, že čím pomalejší je chlazení, tím vyšších pevností vyráběný agloporit dosahuje. Obecně platí, že pomalé ochlazení je třeba tudíž dodržovat, jestliže agloporit je určen pro výrobu nosných lehkých betonů o velkých pevnostech. Zařazování speciálních chladičů nebo chladících (= dozrávacích) skládek, na nichž by se pozvolným vychlazováním vyrovnalo vnitřní pnutí agloporitu, narušuje však nepřetržitost výroby a může i podstatně zvětšovat investiční a provozní náklady. Z výše uvedených důvodů moderní způsoby výroby agloporitu směřují k technologickému opatření, kterým je zajišťována kvalitní, soudržná a dobře prodyšná surovinová vsázka, která umožní provádět kvalitní samovýpal na roštu včetně vychlazených spečenců vypálený zrn bez potřeby zařazení samostatných chladících zařízení do technologického procesu výroby. [18]

Pokud je to z jakostního hlediska možné, snažíme se o rychlé kontinuální chlazení agloporitového spečence např. též tak, že nad poslední vzduchovou komorou umístíme sprchový rozprašovač vody, což v některých případech příznivě ovlivňuje nejen postup chlazení, ale i drtitelnost agloporitu, a tím i jeho objemovou hmotnost. Pro každý jednotlivý případ je však třeba vhodnost ochlazovacího režimu zvlášť určovat, protože vzhledem k různým surovinám, z nichž se agloporit vyrábí, mívá jeho součinitel teplotní roztažnosti různé hodnoty. [18]

Investičně a provozně nenáročným způsobem chlazení vyrobených agloporitových spečenců může být zařazení speciálního dohrávacího boxu o větší kapacitě (např. 100 - 200m³), který z technologického hlediska oddělí proces kontinuální výroby agloporitu na spékacím roštu od technologického souboru drcení třídění. Tímto opatřením lze zajistit, aby vypálené kamenivo bez potřeby jeho skrápění vodou bylo dobře vychlazeno a vytvoří se tak podmínky pro kvalitní dodrcení a ostré třídění vyrobeného kameniva do frakcí. [18]

1.2.1.2. Vlastnosti

- Barva agloporitu bývá šedá, šedomodrá až šedočerná, přičemž povrchové části bývají hnědočervené.
- Pórovitost zrn agloporitu bývá 40 až 65 %, zpravidla kolem 50 %.
- Mezerovitost podle použitého způsobu drcení a třídění bývá 50 až 60 %.
- Objemová hmotnost u agloporitového písku bývá 600 až 1050 kg.m⁻³, u štěrkových frakcí 400 až 700 kg.m⁻³, u netříděného, jen podrceného agloporitu potom 800 až 1350 kg.m⁻³.
- Nasákavost bývá též velmi rozdílná, zpravidla 8 až 30 % hmotnostních.
- Součinitel tepelné vodivosti volně sypaného agloporitu je 0,12 až 0,16 W.m⁻¹.K⁻¹
- Pevnost ve válci u jakostnějších druhů agloporitu činí 2 až 8 MPa.
- Obsah síry celkově stanovené jako SO₃ nemá překročit 1 %.
- Ztráta žíháním nemá potom být větší než 5 %. [1]

1.2.1.3. Využití:

V zahraničí se agloporit používá do betonů izolačních, konstrukčně izolačních a hlavně do betonů konstrukčních. Jeho uplatnění do stavebních konstrukcí bývá obvykle spojováno s celkovými nižšími náklady na výstavbu. I když náklady na výrobu lehkého konstrukčního betonu jsou vyšší než náklady na stejné množství normálního hutného betonu, mohou být v některých případech celkové náklady na výstavbu nižší, protože vlastní hmotnost konstrukce se sníží. [1]

1.2.2. Lytag

Lytag je lehké umělé kamenivo vyráběné ze spékaných popílků samovypalem.



Obr. č. 5: Lytag [5]

1.2.2.1. Vlastnosti:

Výsledný materiál má vlastnosti srovnatelné s přírodním kamenivem s výjimkou nízké měrné hmotnosti ($750 - 1400 \text{ kg.m}^{-3}$). Chemicky se materiál chová jako inertní hmota. Pevnost granulí v tlaku je vyšší než 5 MPa. Lehké kamenivo Lytag je odolné vůči vysokým teplotám. Díky pórovitosti kolem 40% má kamenivo Lytag dobrou mrazuvzdornost. [5]

1.2.2.2. Využití:

Používá se při stavbách jako mostní konstrukce, masívní těžké stavby apod., kde je snaha snížit celkovou hmotnost stavby nebo její části. Prefabrikované lehké betony. Kamenivo Lytag je vynikající médium pro biologickou filtraci. Díky chemické odolnosti se využívají jako podlahy vepřína, vyzdívky odpadních potrubí. [15]

1.2.3. Pollytag

Pollytag je lehké umělé kamenivo vyráběné v Polsku upravenou technologií Lytag.

1.2.3.1. Výroba:

Výroba je založena na zpracování granulovaného popílku při teplotách kolem 1100°C , kdy žár způsobí mírné natavení a částečné spojení (tzv. slinutí popílkových zrn. Výrobní linka sestává z dávkovacího šneku, který dávkuje popílek do mísiče, kde se přidávkem vody a malého množství práškového uhlí připraví optimální směs. Ta se dávkuje do granulátoru. Vytvořené granule jsou rozprostřeny na granulační pás a zapalovacím hořákem je zahájen proces tzv. aglomerace. Po prohoření vrstvy, slinutí granulí a po následném vychlazení na teplotu cca 250°C jsou vzniklé granule mechanicky tříděny na sítích. [15]

1.2.3.2. Vlastnosti:

Objemová hmotnost kameniva Pollytag je 650 do 850 kg.m^{-3} . Lehké kamenivo Pollytag je odolné vůči vysokým teplotám. Pórovitost kameniva je 40%. Přibližné chemické složení: SiO_2 - 58%, Al_2O_3 - 22%, CaO - 2,2%, MgO - 1,4%, SO_3 - 0,3%. [15]

1.2.3.3. Využití:

Pollytag se používá pro výrobu betonu s vysokou požární odolností, k výrobě betonových prefabrikátů, lehkých betonových tvárnic a fošen. Také se používá v zahradnictví, jako zásyp, na výrobu tepelně izolačního betonu a tvarovek. [15]

1.2.4. Aardelite

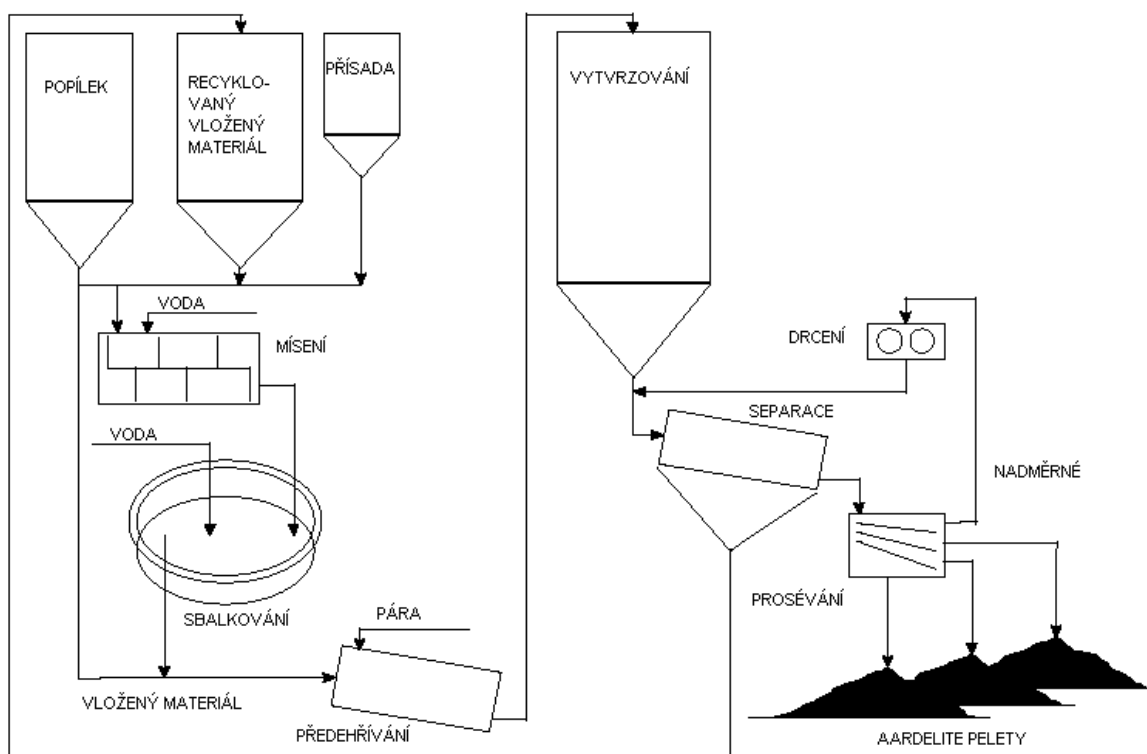
Technologie Aardelite je založená na aglomeraci drobného anorganického materiálu jako jsou uhelné popílký. Tato technologie byla vyvinuta již před mnoha lety v Holandsku. Během posledních 15 let se kamenivo Aardelite ukázalo být ideální náhradou za přírodní kamenivo. [16]



Obr. č. 6: Aardelite [16]

1.2.4.1. Výroba:

Výroba umělého kameniva Aardelite využívá reakce hydroxidu vápenatého ve formě vápenné kaše s SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 oxidy obsaženými v popílku. Reakce je podobná tvrdnutí betonu a vzniká tvrdý a stabilní materiál. Do mísiče se dávkuje popílek, recyklovaný materiál z třídění, vápno, voda, popř. další přísady a vše se důkladně promíchá. Vzniklá hmota se přivádí do peletizátoru, kde vznikají pelety (granule) o různé velikosti. Působením teploty 70-90 °C pelety vytvrdnou a dávkuje se přes mezizásobník do třídiče. Rozměrově nevyhovující část se vrací zpět na počátek procesu. Ve výrobním procesu je možné nastavit požadovanou velikost kameniva pro konkrétní aplikaci. [5]



Obr. č. 7: Technologické schéma výroby Aardelitu [16]

1.2.4.2. Vlastnosti:

Aardelite má ve srovnání s Lytag poněkud horší vlastnosti (pevnost, nasákavost, mrazuvzdornost), neužívá však energeticky náročné vysokoteplotní technologie. Měrná hmotnost kameniva Aardelite je $1140 - 1750 \text{ kg.m}^{-3}$, pevnost granulí v tlaku 2,5 - 8,4 MPa. [16]

1.2.4.3. Využití:

Pelety Aardelite se používají jako výplňový materiál zvukově izolačních stěn, betonové tvárnice, připraven betonů, prefabrikované betonové prvky, betonové piloty, dlažba. [16]

1.2.5. Rugen

Umělé kamenivo RUGEN® je lehké umělé kamenivo vyrobené ze směsi popílku, pojiv, příměsí, přísad a vody. Umělé kamenivo RUGEN® je dodáváno převážně v kulovité formě, je však možné vyrábět i formu nepravidelnou. [16]

1.2.5.1. Vlastnosti

Výhodou kameniva RUGEN® je pevnost s odolností proti drcení od 0,5 do 10 MPa, nízká objemová hmotnost a rychlá nasákavost, která umožňuje výrobek v případě použití do betonu a malt okamžitě aplikovat, beze změny konzistence. Výroba umělého kameniva RUGEN® je založena na efektivním využití popílku při současné velmi nízké energetické náročnosti. [16]

1.2.5.2. Využití

Hlavní využití kameniva je v oblasti vnitřních násypů a zásypů, jako plnivo při výrobě lehčených betonů a jako hlavní složka pro výrobu mezerovitého betonu. [16]

1.2.6. Kabet

Jedná se o umělé pórovité kamenivo z odpadních materiálů s cílenou úsporou těženeho přírodního kameniva na bázi popílku z fluidního a vysokoteplotního spalování. [13]

1.2.6.1. Využití

Umělé kamenivo kabet je směřováno jako náhrada přírodního kameniva do betonů (lehkých a mezerovitých). Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty, zásypové vrstvy, v pozemních stavbách, silnicích a inženýrských stavbách. [13]

1.2.7. Karit

Karit je umělé pórovité kamenivo (kamenivo s řízenou trvanlivostí) na bázi popílku z fluidního a vysokoteplotního spalování. [13]

1.2.7.1. Využití

Umělé kamenivo karit je směřováno:

- pro využití v oblasti rekultivací a příbuzných aplikacích. Musí splňovat příslušné požadavky na vlastnosti z pohledu užití.
- jako náhrada lehkých přírodních kameniv pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro zásypové vrstvy a příbuzné aplikace.

- Využití popílku z vysokoteplotního a fluidního spalování pro výrobu umělého pórovitého kameniva do zásypů a příbuzných aplikací s řízenou trvanlivostí. S cílenou úsporou těžného přírodního kameniva. [13]

1.3. Porovnání vlastností umělých lehkých kameniv

Pro snadné porovnání dominantních vlastností jednotlivých umělých lehkých kameniv byl sestaven názorný přehled, uvedený v následující tabulce.

Tab. č. 2: Vlastností lehkých umělých kameniv

	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Nasákavost [%]	Mezerovitost [%]	Součinitel tep. vodivosti [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
keramzit	600-1300	10-20	40-45	0,09-0,15
ex. perlit	70-450	až 300	-	0,04-0,06
ex. vermikulit	60-200	až 50	-	-
expandit	500-800	13	-	-
kavitit	600-900	17-20	40-45	0,35-0,47
Lytag	750-1400	15-18	40	-
Pollytag	650-850	15-18	40	-
Aardelite	1140-1750	-	-	-
agloporit	400-1350	8-30	5-60	0,12-0,16

Z hodnot uvedených v tabulce č. 2 vyplývá, že kameniva Kabet, agloporit, Aardelite, Lytag, kavitit, keramzit jsou díky svým vlastnostem vhodná k využití do betonů. Vermikulit s expanditem jsou díky extrémní termoizolační schopnosti vhodná do žáruvzdorných betonů. K výrobě speciálních termoizolačních malt se používá perlit a expandit. Lytag a keramzit slouží také jako vynikající filtrační médium.

2. Popílký z energetických zařízení

Popílký jsou nerostné zbytky spalování tuhých paliv především v jemném stavu a pozůstávající se především z malých kuliček křemičitanového skla, odpadající ve zvlášť velkém množství v moderních tepelných elektrárnách, kde se získávají v usazovacích a jiných zachytých zařízeních, a to především v cyklónech, komorách a elektrostatických filtrech.

2.1. Úletový popílek z klasického způsobu spalování

Popílký z „klasického“ způsobu spalování paliva při teplotách cca 1400 až 1600°C se vyznačují obsahem hlavně – křemene a mullitu ($2\text{SiO}_2.3\text{Al}_2\text{O}_3$). Rovněž obsahují sklovitou fázi, jejíž množství je zpravidla vyšší než 50 %, která zásadním způsobem ovlivňuje reaktivitu popílků s CaO nebo cementem jak za normální, tak zvýšené teploty (autoklávování). Mullit se zúčastňuje reakce pouze ve velmi malé míře výhradně za hydrotermálních podmínek.

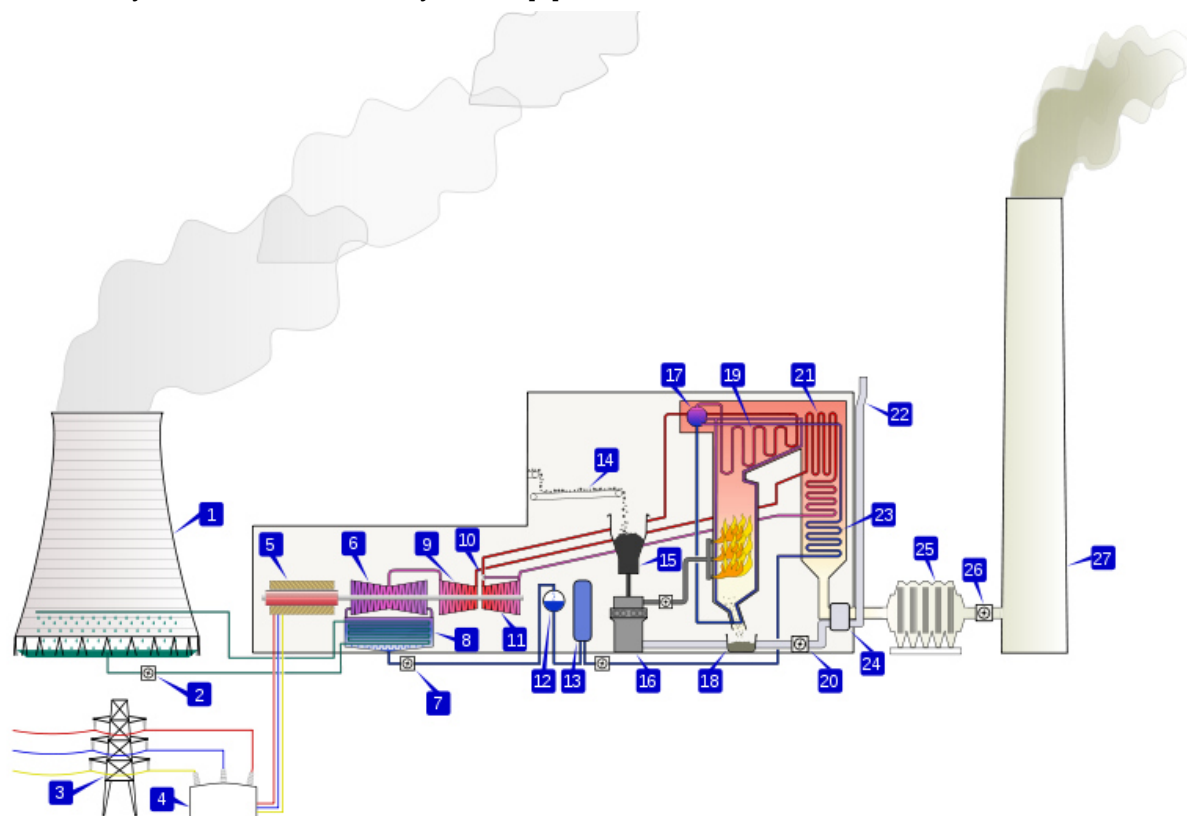
Popílek sám o sobě není hydraulický, to znamená, že není schopen reagovat s vodou. Je-li však mísen s hydroxidem vápenatým – např. z cementu – reaguje a vytváří stejné produkty jako při reakci cementu s vodou. Tato reakce se liší dle typu a druhu popílku a je označována jako pucolanita. V popílku, který byl skladován delší dobu ve vlhku může být pucolánový účinek porušen.

Jestliže za normální teploty (30 – 40 °C) se reakcí CaO nebo cementu s popílkem z „klasického“

technologie spalování zúčastňují pouze ionty obsažené v jeho skelné fázi, za hydrotermálních podmínek reaguje s Ca(OH)_2 rovněž přítomný β -křemen a v malé míře mullit ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$).

Hlavní pojivovou fází, vznikající v průběhu autoklávaného procesu je zpravidla C – S – H (I) vedle 11,3 Å – tobermoritu.

Základními požadovanými technickými parametry jsou nízká hodnota ztráty sušením – pod 1 %, ztráta žíháním pod 4 %, obsah SiO_2 nejméně 40 %, obsah celkové síry do 3 % a chloritů do 0,1 %, dodržení limitní hranice obsahu radioaktivních nuklidů $< 150 \text{ Bq/kg}$ a přítomnosti toxických látek a těžkých kovů ve vodních výluzích. [1]



Obr. č. 8: Schéma tepelné elektrárny s klasickým spalováním [19]

Vysvětlivky:

- | | | | |
|---------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1. Chladicí věž | 8. Kondenzátor | 15. Zásobník na uhlí | 22. Vstup vzduchu |
| 2. Čerpadlo chladicí vody | 9. Střednětlaká turbína | 16. Drtič uhlí | 23. Ekonomizér |
| 3. Vedení VN | 10. Regulátor páry | 17. Parní kotel | 24. Předehříváč vzduchu |
| 4. Transformátor | 11. Vysokotlaká turbína | 18. Jímka na popel | 25. Čistič kouře |
| 5. Generátor | 12. Odvzdušňovač | 19. Přehříváč páry | 26. Sací čerpadlo |
| 6. Nízkotlaká turbína | 13. Předehříváč zásobní vody | 20. Dmychadlo | 27. Komín |
| 7. Čerpadlo kondenz. vody | 14. Přísun uhlí | 21. Prostřední ohříváč | |

2.1.1. Vlastnosti úletových popílků

Úletový popílek je jemnozrnný prach, který se skládá převážně z roztavených skelných částic kulovitého tvaru s hladkým povrchem. Zvláštní vlastností křemičitého úletového popílku je jeho pucolánová aktivita, tj. schopnost reagovat za okolní teploty s vápnem a vodou za vzniku pojivých minerálních fází, které jsou podobné těm obsaženým v Portlandském cementu. Vzhledem k jeho

jemnosti a rozložení velikosti částic a také k jeho pucolánové aktivitě se černouhelný úletový popílek používá většinou do stavebních materiálů spojovaných cementem k vylepšení jejich technických vlastností a k nahrazení cementu. [1]

2.1.2. Použití úletových popílků

Velké ekonomické výhody přináší využití popílků přímo ve stavební výrobě, například při budování silnic, dálnic, letišť, železnic, přehrad a při řadě dalších zemních prací.

Za perspektivní postupy recyklace elektrárenských popílků se dnes považuje výroba pórobetonu, náhrada cementu v betonových směsích a především všechny druhy zemních prací a stabilizace zemin. [8]

2.2. Létavý popílek z fluidního způsobu spalování

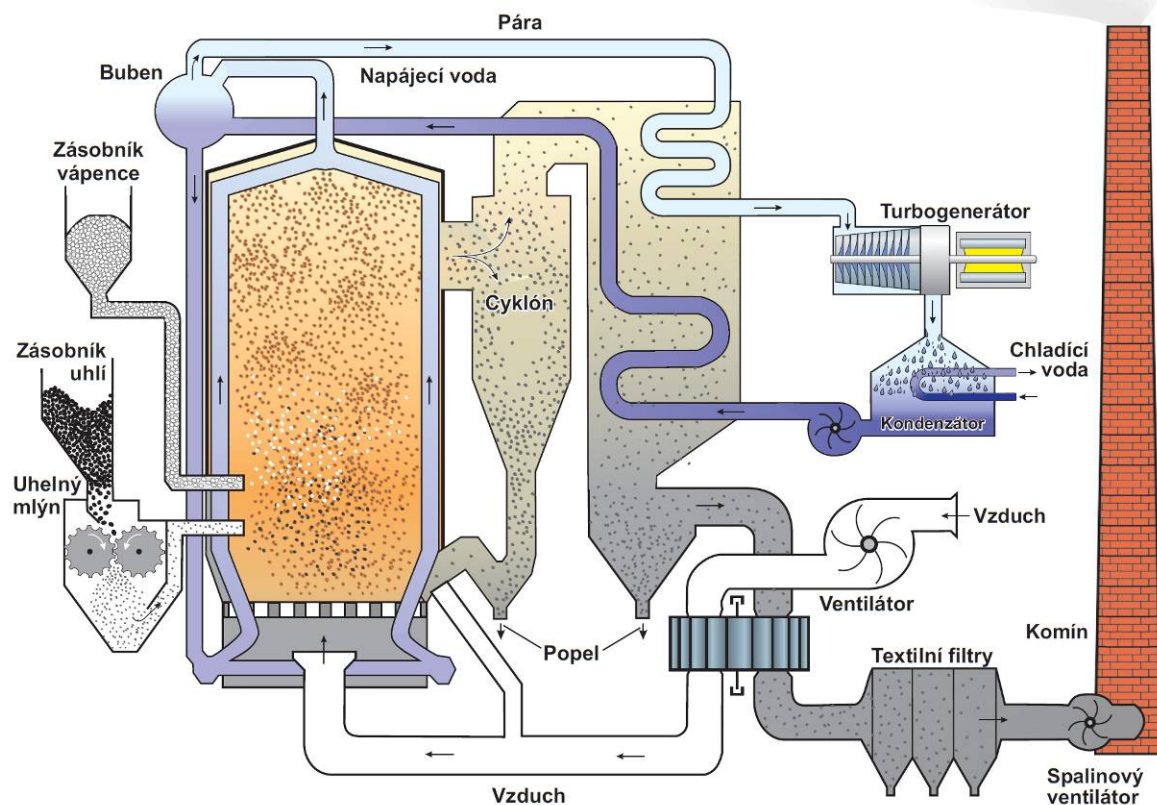
Fluidní popílků jsou tuhé zbytky fluidního spalování uhlí, směsi minerálního podílu uhlí a produktů odsíření vzniklých reakcí sorbetu (např. vápenec, dolomit) s oxidem siřičitým. Teplota jejich vzniku nepřesahuje 850 °C, popely a popílků se od sebe liší granulometrií.

Fluidní technologie je jedna z nejmodernějších metod spalování uhlí a dalších druhů paliv. Spolu s odsířením je nejúčinnější metodou snižování emisí škodlivých látek do ovzduší. Na rozdíl od běžného odsířování, které čistí spaliny až za spalovacím procesem, fluidní technologie umožňuje likvidaci škodlivin přímo v kotli.

Mleté palivo s přísadou vápence příp. dolomitu se spaluje v cirkulující vrstvě při teplotě 850 °C. V těchto zmodernizovaných provozech vznikají pevné odpady v podobě ložového popele a popílků z elektrofiltrů (odlučovačů). Výsledným produktem je pak směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsířovacího činidla (CaO s případnými zbytky CaCO_3), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Vzhledem k tomu, že teploty spalování jsou při fluidních procesech nižší než při klasickém spalování, je nezreagovaný CaO přítomen ve formě tzv. měkce páleného vápna a je tedy reaktivní. Pro fluidní popílků je též charakteristický nízký obsah taveniny.

V důsledku transportu kouřových plynů z prostoru ohniště dochází k separaci jednotlivých frakcí této směsi, jemné podíly jsou odnášeny spaliny ve formě úletu a hrubší zůstávají ve spalovacím prostoru. Úlet tuhých látek je z kouřových plynů odstraňován běžnými technologickými postupy (cyklóny, filtry). Každá fluidní spalovací jednotka proto zpravidla produkuje fluidní popílků dvojího druhu: popílek z prostoru ohniště (označovaný např. ložový) a popílek získaný z úletu (označuje se cyklónový, filtrový apod.). Vlastnosti obou těchto popílků se výrazně liší jak ve fyzikálních vlastnostech (granulometrie, měrný povrch, hustota, sypaná hmotnost), tak v chemickém a mineralogickém složení, i když pocházejí z téhož technologického procesu fluidního spalování a odsířování. Stejně jako u popílků klasického se i u fluidních popílků obou druhů projevuje nevýhoda kolísavých vlastností, zejména chemického složení, měrné hmotnosti a ostatních parametrů, způsobená nestabilitou spalovacího procesu a variabilitou vlastností vstupních komponent (uhlí a odsířovacího činidla).

Fluidní popílků obsahují na rozdíl od popílků klasických vyšší množství měkce páleného reaktivního vápna (15 až 35 %) a mají poměrně vysoký obsah SO_3 (7 až 18 %), jenž může způsobit v pojivu vznik ettringitu ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Z tohoto důvodu je jejich využití způsobem stejným jako u popílků klasických prakticky nemožné. [19]



Obr. č. 9: Schéma tepelné elektrárny s fluidním spalováním [19]

2.2.1. Vlastnosti fluidního popílku

V závislosti na procesu odsíření v peci se popel z fluidního lože, jakožto směs popele z lože a úletového popílku, skládá z uhlénoho popele, zbytkového uhlí, produktů odsíření a nezreagovaného adsorpčního činidla. Poměrně nízká teplota spalování má za následek vytvoření jemnozrnných krystalických minerálů. Maximální velikost zrna je do 10 mm a ta pochází z částic popele z lože. Popel je bohatý na volné CaO a CaSO_4 v důsledku kombinovaného procesu odsíření. Hlavními chemickými složkami jsou SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 (Fe_3O_4). [8]

2.2.2. Použití a požadavky na použití

Typická použití pro popel z fluidního lože spolu s podrobnostmi o požadavcích na jakost, které musí být pro tato použití splněny, jsou založeny na vnitrostátních nařízeních. [8]

3. Popis vzniku keramického střepu

Výpal je technologický proces, při němž získává výrobek své konečné vlastnosti. Při výpalu probíhají ve střepu jak fyzikální, tak chemické děje. Zároveň dochází, díky zvyšující se teplotě, také ke změnám fázovým (mineralogickým). Veškeré tyto reakce jsou značně složité a často se vzájemně ovlivňují.

Základními reakcemi při výpalu jsou:

- dehydratace, resp. dehydroxilace (tj. ztráta volné a vázané vody),

- oxidace (tj. vyhořívání) organických látek,
- termická disociace (tj. tepelný rozklad, typický zejména u karbonátů),
- polymorfní transformace (tj. změna krystalové modifikace, typická u křemene),
- reakce v tuhé fázi před slinováním (např. vznik spinelové fáze z metakaolinitu),
- tavení, tj. tvorba skelné fáze.

Dehydratace jílových minerálů probíhá odstraňováním konstituční vody, která se sušením neodstraní. Chemickou vazbu vody rozdělujeme do tří skupin podle teplotního rozsahu jejího uvolňování. Molekulárně adsorbovaná voda se odstraňuje při teplotách 80 – 120 °C. Krystalická voda (molekuly H_2O ve stechiometricky definovaných hydrátech) se odstraňuje při 60 – 250 °C (např. sádrovec). Strukturní voda vázaná v krystalové mřížce jako hydroxylové skupiny se uvolňuje při 250 – 750 °C za tvorby metafází. Změny modifikací jsou definovány invariantními body, tj. teplotou přeměny, podobně jako invariantním bodem bod tání. Modifikační změny jsou většinou doprovázeny změnami objemové hmotnosti, jako např. SiO_2 nebo minerály systému Al_2O_3 , které prochází řadou modifikačních změn na konečný korund ($\alpha - Al_2O_3$) při teplotě nad 1200 °C. Termickou disociací se uvolňují plynné složky, jak je tomu u uhličitánů. Uvolněné plyny mohou unikat ze střepu jen do té doby, pokud je střep pórovitý, jinak nastane nadýmání a poškozování výrobku. Primární tvorbu minerálů reakcí pevných látek lze demonstrovat na tvorbě mullitu z kaolinitu. Reakce v pevné fázi jsou podmíněny těsným kontaktem částic, neboť difúzní procesy probíhají jen na hraničních plochách částic. [2]

3.1. Tvorba taveniny

Množství taveniny vznikající při výpalu keramického střepu závisí na chemickém složení a teplotě. Množství taveniny se obtížně stanovuje a fázové diagramy relativně málo informují o vlivu malých změn (např. použití mineralizátorů) ve složení vypalované směsi. Rozlišujeme dva typy taveniny. [17]

3.1.1. Eutektické taveniny

Vznik eutektických tavenin podporují zejména alkálie, jež zvláště s SiO_2 , Al_2O_3 a uhličitany mohou vytvářet eutektické taveniny s body tání od 693 do 1045 °C podle povahy a množství složek. Tato tavenina lépe zpevní střep než současně probíhající reakce v pevném stavu. Tekuté eutektické taveniny umožňují rychlé slinutí, ale působením teploty snadněji měknou. Snižují teplotu počátku intervalu slinutí a mohou tento interval rozšiřovat. [2]

3.1.2. Taveniny vzniklé ze základních taviv

Taveniny vzniklé ze základních taviv vyplňují póry a dutiny jen velmi zvolna, ovlivňují interval slinutí a neprojevují se v deformaci střepu i při překročení optimální teploty výpalu. Je účelné udržovat vhodný poměr mezi oběma typy tavenin. Složení taveniny v keramickém střepu bývá proměnlivé. Obsahuje všechny tavící oxidy a také SiO_2 a část Al_2O_3 . Struktura silikátové taveniny určuje její vlastnosti. Např. živcová tavenina se vyznačuje velmi vysokou viskozitou. Aktivitu tekuté fáze zesilují oxidy kovů (Fe, Co, Ni, Zn, Ti, B), mění viskozitu a povrchové napětí taveniny. Po vychlazení vytvoří tavenina skelnou fázi (sklo), které vyplňuje původní póry a dutiny a neobyčejně zpevňuje střep. Složení skelné fáze se liší od komerčního skla, bývá proměnlivého složení s vyšším obsahem SiO_2 i Al_2O_3 . K využití tavícího účinku Fe_2O_3 je nutná jeho redukce na FeO. Vzniklé krystaly a ostřivo zvyšují viskozitu taveniny, ale závisí na smáčení zrn ostřiva

a případné jeho rozpustnosti v tavenině. Některé body tání a eutektické body systémů jsou uvedeny v tab. č. 3. [2]

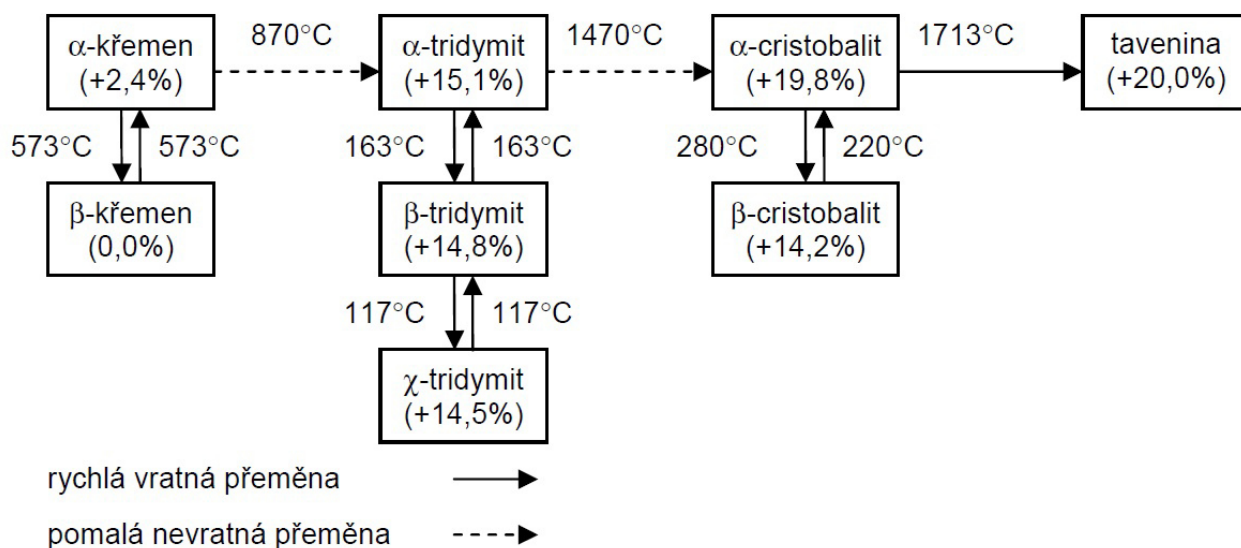
Tab. č. 3: Body tání a eutektické body systémů [2]

Body tání oxidů a minerálů [°C]		Eutektické body systémů [°C]	
Oxid boritý B_2O_3	450	$SiO_2 - Al_2O_3 - B_2O_3$	470
Oxid sodný Na_2O	920	$Na_2O - CaO - SiO_2$	725
Tavenina živců	1110 – 1180	$Na_2O - SiO_2 - Al_2O_3$	767
Cordierit	1435	$SiO_2 - Al_2O_3 - CaO - Na_2O - MgO$	1118
Křemen - tridymit	1710	$CaO - Al_2O_3 - SiO_2$	1170
Mullit	1810	$SiO_2 - Al_2O_3 - CaO - K_2O - MgO$	1180
Korund	2050	$CaO - MgO - Al_2O_3$	1331
Oxid chromitý Cr_2O_3	2300	$CaO - Al_2O_3$	1390

3.2. Reakce minerálů při výpalu

3.2.1. Křemen

β - SiO_2 podléhá při výpalu modifikačním přeměnám podle obr. č. 10 V oblastech přeměny se nachází v aktivním stavu. Křemičité krystalické fáze za určitých podmínek přispívají ke zvýšení mechanické pevnosti střepu, ale současně svými modifikačními přeměnami vyvolávají ve střepu během výpalu napětí (díky objemovým změnám), které negativně ovlivňuje mechanickou pevnost střepu. Účinek modifikační přeměny křemene se nejvíce projevuje ve fázi chlazení, kdy jsou zrna křemene pevně vázána ve vypáleném střepu. Zmírnit účinek je možné volbou vhodné velikosti zrn křemene a jejich homogenním rozdělením ve střepu. Existence zejména přeměny β na α - SiO_2 se musí brát v úvahu při konstrukci vypalovacích křivek. [2]



Obr. č. 10: Modifikační přeměny křemene v závislosti na teplotě a příslušné objemové změny během výpalu [2]

Důležitou krystalickou fází v keramickém střepe (dinas, kamenina) je cristobalit. Vzniká krystalizací amorfního SiO_2 , vzniklého rozkladem jílových minerálů. Z amorfního SiO_2 začíná vznikat cristobalit již při teplotě 945 °C. Modifikační přeměna α - cristobalitu na α - tridymit může probíhat za přítomnosti příměsí při vysokých teplotách. [2]

3.2.2. Mullit

Důležitým minerálem, který vzniká při výpalu jílových minerálů, je mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Literatura uvádí jeho vznik od teploty 1200 °C, nicméně rentgenová difrakční analýza vzorků střepe vypálených okolo 1100 °C již existenci mullitu, tedy ještě jeho ne zcela vyvinutou formu, odhaluje. Mullit je jedinou vysokoteplotní stabilní modifikací v soustavě $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$. Považuje se za nejcennější fázi v mikrostruktuře keramických výrobků, poněvadž se vyznačuje velkou pevností, vysokou žárovzdorností, odolností proti korozi struskou a malým součinitelem objemové roztažnosti. Mullit vždy krystaluje z taveniny, takže skelná fáze je jemně propletena jehličkovitými krystaly mullitu, které přispívají k pevnosti střepe (mikrovýztuž). Mimo tohoto jehlicovitého typu byl pomocí elektronové mikroskopie potvrzen také nepravidelně šupinkovitý, který je považován za pseudomorfózu po kaolinitu, neboť vzniká reakcemi v tuhé fázi. Pro vyšší kvalitu střepe je žádoucí vznik jehlicovité formy (tzn. je nutná tvorba taveniny). Mullit je stabilní krystalickou fází, která nevykazuje žádnou modifikační přeměnu, a proto přispívá ke zvýšení mechanické pevnosti střepe. Krystaluje v kosočtverečné soustavě, má bod tání při 1810 °C, měrná hmotnost 3000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [2]

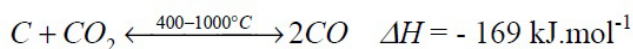
3.3. Vyhořívání organických látek

Spalování uhlíku neprobíhá přímou oxidační reakcí, ale řadou dílčích reakcí. V keramickém střepe se projevuje jeho katalytický účinek a mohou vzniknout problémy přístupu kyslíku do chemické reakce s uhlíkem. Potřebný kyslík musí difundovat do střepe a vzniklé oxidy uhlíku jako zplodiny vyhořívání v opačném směru ze střepe. Na vyhořívání mají vliv tavící oxidy (Fe_2O_3), uhličitany, jílové minerály, druh organických látek, tloušťka a permeability střepe a pecní prostředí. Podstatou působení je únik plynné fáze (CO_2 , O_2 , CO , H_2O , SO_2) dříve než nastane slinování střepe. Reakce spalování organických látek (C) a příslušná reakční tepla ΔH :

- v oxidačním prostředí:



- v redukčním prostředí:

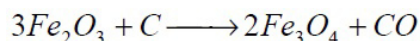


tzv. Boudouardova reakce

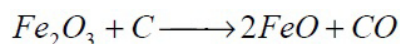
Vratná Boudouardova reakce dosahuje rovnováhy při 687 °C (existují vedle sebe CO a CO_2 v poměru 1:1) a má význam při vyhořívání organických látek v keramickém střepe. V redukčním prostředí hrozí nebezpečí vyhořívání organických látek v keramickém střepe obrácenou Boudouardovou reakcí, kdy vznikající oxid uhelnatý CO difunduje z povrchu střepe do

jeho středu, z míst vyšší teploty do míst s nižší teplotou. Zde nastává jeho rozklad, uhlík se usazuje, CO₂ difunduje z míst nižších teplot do vyšších a při tom reaguje s uhlíkem za vzniku CO a část unikne jako CO₂. Výsledkem tohoto procesu je zpomalování průběhu vyhořívání, protože uhlík putuje dovnitř střepu, kde se zvyšuje jeho koncentrace a střed střepu černá = vznik černého jádra. Uhlík vznikající ve střepu se po delším působení vyšší teploty stává méně aktivním (grafitizuje). Tento uhlík se obtížně spaluje a přetrvává i při vysoké teplotě výpalu. Rychlost vyhořívání vzrůstá s teplotou, avšak do určité hranice, od níž se opět zpomaluje, neboť se snižuje pórovitost. Snadno prchavé látky by měly uniknout ze střepu do teploty 350 °C. Zvýší-li se podíl paliva ve střepu, prodlužuje se doba k jeho vyhoření, ale zvyšuje se pórovitost střepu a tím klesá difúzní odpor. [2]

Vyhořívání organických látek v keramickém střepu s vysokým obsahem oxidu železitého Fe₂O₃ může vést také ke vzniku tzv. redukčního jádra. V redukční atmosféře (v peci nebo vlivem vyhořívání organických látek ve střepu) dochází k částečné redukci oxidu železitého (červené barvy) na oxid železnatoželezitý Fe₃O₄ (černé barvy):



I malé množství uhlíku (organických látek) působí ve střepu silně redukčně. Při vysokém obsahu uhlíku (ve vyšší redukční atmosféře) může oxid železitý redukovat dále až na oxid železnatý FeO:



3.4. Vliv železa na popílkový střep

I malé množství uhlíku (organických látek) působí ve střepu silně redukčně. Při vysokém obsahu uhlíku (ve vyšší redukční atmosféře) může oxid železitý redukovat dále až na oxid železnatý FeO.

Vzhledem k tomu, že oxid železnatý je velmi účinné eutektické tavivo, dochází k uzavření střepu na povrchu vlivem vznikající eutektické taveniny. Reakce se postupně přesouvají do středu vypalovaného střepu, ale vznikající zplodiny CO, resp. CO₂ nebo i O₂ nemohou ze střepu uniknout. To je potom příčinou vzniku tzv. nadýmání střepu. Svoji roli hraje tloušťka střepu a rychlost zvyšování teploty - čím je střep tenčí a zvyšování teploty pomalejší, tím více se sníží nebezpečí nadýmání střepu. [2]

4. Proces hydratace fluidních popílků

Z mineralogického hlediska jsou fluidní popílký vedle křemene dále složeny z hlinitokřemičité amorfni fáze, nerozpustného anhydritu CaSO₄ II a volného vápna CaO. Díky tomuto složení dochází po rozmíchání fluidních popílků s vodou k reakci výše uvedených složek za vzniku hydratačních produktů, kterými jsou ettringit C₃A.3CaSO₄.32H₂O a sádrovce CaSO₄.2H₂O. Ke vzniku hydrosilikátů vápenatých prakticky nedochází. Důvodem je, že odpovídající nehydratované vápenaté fáze jsou ve fluidních popílcích obsaženy jen minimálně. Toto je způsobeno nízkou teplotou spalování, při které je prakticky vyloučena tvorba vápenatých

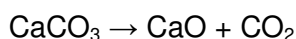
fází adičním způsobem, a při které může pouze v nepatrné míře nastat tvorba aluminátů a feritů vápenatých způsobem substitučním. CaO ve fluidních popílcích se vyskytuje zaprvé vázaný do CaSO₄ II, zadruhé ve formě volného CaO, případně zatřetí ve zbytku nerozloženého CaCO₃. Přítomnost ostatních vápenatých sloučenin je zanedbatelná. CaO v hydratovaných fluidních popílcích se vyskytuje v ettringitu C₃A.3CaSO₄.32H₂O, sádrovci CaSO₄.2H₂O, nezreagovaném anhydritu CaSO₄ II, portlanditu Ca(OH)₂, kalcitu CaCO₃, zbytku volného CaO, eventuálně monosulfátu C₃ACaSO₄.12H₂O. Sírany jsou v hydratovaných fluidních popílcích vázány do sádrovce CaSO₄.2H₂O, ettringitu C₃A.3CaSO₄.32H₂O, nezreagovaného anhydritu CaSO₄ II, eventuálně do monosulfátu C₃ACaSO₄.12H₂O. Poslední jmenovaná fáze se vyskytuje pouze sporadicky. [6]

5. Výpal fluidních popílků

Tato kapitola se zabývá vybranými tepelnými reakcemi při výpalu fluidních popílků.

5.1. Tepelný rozklad vápence

Při pálení vápna jde v podstatě o tepelný rozklad vápence. Zahřátím vápence dochází k disociaci uhličitanu vápenatého podle rovnice: [3]



Disociace uhličitanu vápenatého probíhá za teploty, která závisí na parciálním tlaku CO₂ obklopujícího uhličitán vápenatý. Aby rozklad mohl probíhat, je třeba dodat systému tolik tepla, aby tlak CO₂ uvolněného z uhličitanu vápenatého případně vápence překročil parciální tlak oxidu uhličitého z okolní atmosféry. Jestliže tlak uvolňovaného CO₂ je v rovnováze s tlakem oxidu obklopujícího CaCO₃, pak tlak CO₂ se rovná maximálnímu tlaku disociace pro danou teplotu a dochází k chemické rovnováze – každé teplotě odpovídá příslušný tlak. Je to dynamická rovnováha tzn., že nedojde k přerušení reakce, ale že se za určitou dobu rozloží právě tolik molekul CaCO₃, kolik jich opět vznikne. Rovnováhy se dosáhne, když se podíl koncentrace vzniklých a výchozích látek rovná konstantě, které říkáme rovnovážná konstanta pro danou teplotu. V heterogenních reakcích je rovnovážná konstanta reakce určena jen koncentracemi (aktivitami) plynných produktů, protože aktivita pevné čisté látky za standardních podmínek je rovna jedné. Jestliže koncentraci či aktivitu plynné složky nahradíme parciálním tlakem CO₂, pak se rovnovážná konstanta bude rovnat parciálnímu tlaku CO₂. [3]

Z termodynamického hlediska může dojít k rozkladu uhličitanu vápenatého již od 600 °C, kdy rozkladný tlak CO₂ je větší než parciální tlak CO₂ v normální atmosféře obklopující uhličitán vápenatý. Protože celkový tlak atmosféry je podstatně vyšší než tenze uvolňovaného oxidu uhličitého při 600 °C, může se tento plyn odvádět z reakčního prostoru jen difúzí, tedy velmi pomalým pochodem. Proto i rychlost rozkladu je nepatrná a v praktickém měřítku nevyužitelná. Reakce rozkladu začne intenzívně probíhat teprve při teplotě, při které tlak uvolňujícího se CO₂ je roven tlaku okolní atmosféry. Tuto teplotu nazýváme rozkladnou teplotou a lze ji vypočítat z teplotní závislosti rovnovážné konstanty na teplotě. Uvažujeme-li za normálních podmínek okolní tlak 101,3 kPa, pak tohoto tlaku dosáhne uvolňovaný CO₂ při disociační teplotě kolem

1173 K nebo 900 °C. [3]

Při pálení vápna se snažíme o porušení rozkladné rovnováhy, a proto pálíme při vyšší teplotě než je teplota rozkladná, abychom zvýšili rozkladný tlak a tím také rychlost rozkladu. Dále se snažíme odstraňovat vznikající CO_2 a to dobrým odtahem kouřových plynů. Z těchto skutečností vyplývá, že teplota je jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují rychlost výpalu vápna. Zvyšováním teploty systému se zvyšuje rovnovážná konstanta, tím i tlak CO_2 a doba rozkladu se tedy zkracuje. [3]

Při rozkladu vápence postupuje teplo od povrchu do nitra kusu kamene a tak také postupuje i rozklad. Nedochozí tedy k rozkladu vápence najednou v celé hmotě, ale postupně v tak zvaném pásmu nebo zóně disociace. Tímto pásmem rozumíme rozhraní mezi vypáleným vápnem a nevypáleným vápencem. Rychlost postupu pásma závisí na teplotě systému. Např. zvýšením teploty z 950 °C na 1150 °C se zvýší rychlost postupu pásma rozkladu čtyřnásobně. Z tohoto konstatování vyplývá, že pro výkon každého pálicího agregátu je nejdůležitější teplota výpalu. Avšak z hlediska kvality vápna tomu tak nemusí vždy být. [3]

Jak bylo již výše uvedeno, jedním z faktorů, které ovlivňují rychlost výpalu, je tepelná vodivost, určující pronikání tepla do kusu vápence. Tepelná vodivost závisí na struktuře vápence a posléze i vápna, je přibližně pětikrát nižší než u původního vápence. [3]

Mezi činitele, které mají vliv na rychlost posunu pásma disociace, je i čistota vypalovaného vápence. Z oxidů, které provázejí ve vápencích uhličitán vápenatý, přichází nejvíce v úvahu oxid křemičitý. Ten výrazně snižuje teplotu, při níž dosáhne tlak uvolňovaného CO_2 tlaku okolní atmosféry. Z dalších minoritních oxidů se jedná o oxidy železité a hlinitý.

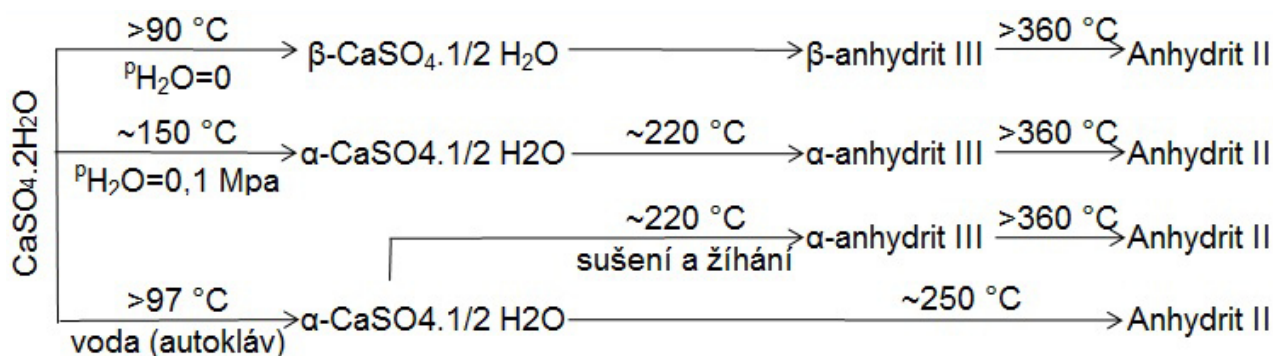
Z hlediska priority vlivu na rychlost rozkladu má vedle teploty výpalu odstraňování vznikajícího CO_2 . Tím, že odstraňujeme CO_2 z pecního prostoru, posunujeme rovnováhu rozkladné reakce na stranu vápna. [3]

5.2. Tepelné fáze sádrovce

Sádra vzniká částečnou nebo úplnou dehydratací sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, který se nachází jednak v přírodě, jednak odpadá z některých chemických výrob. Dehydratace probíhá obvykle ve dvou stupních. V prvním vzniká hemihydrát $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, který je hlavní složkou rychle tuhnoucí sádry. Bezvodý CaSO_4 je hlavní složkou pomalu tuhnoucí sádry a tzv. anhydritového pojiva. Ve směsi s vodou všechny druhy sádrových pojiv zpětně hydratují a tento děj je doprovázen tuhnutím. [4]

Tab. č. 4: Fáze soustavy $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ (podle A. Lehmana) [4]

Název	Chemický vzorec	Obsah vody (%)	Teplota přeměny (°C)	Oblast termodynamické stálosti
Sádrovec (dihydrát)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	21	95 - 130	do 40 °C
α -hemihydrát β -hemihydrát	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$	6,2 - 8	150 - 230	metastabilní
α -anhydrit III β -anhydrit III	$\gamma\text{-CaSO}_4$	0,02 - 0,05 0,60 - 0,90	400 - 750 asi 250	metastabilní
Anhydrit II (nerozpuštěný, přírodní)	$\beta\text{-CaSO}_4$	-	>800	40 - 1180 °C
Anhydrit I (vysokoteplotní)	$\alpha\text{-CaSO}_4$	-	1450 (tání)	nad 1180 °C



Obr. č. 11: Sled přeměn při zahřívání sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ za různých podmínek (podle V. Šatavy) [4]

V soustavě $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ je známo několik fází, jež jsou uvedeny v tab. č. 4 v pořadí, jak vznikají při postupném zahřívání sádrovce. Z nich jsou pouze dihydrát, anhydrit II a I termodynamicky stabilní.

V tab. č. 4 jsou uvedeny pro hrubou orientaci teploty, resp. intervaly teploty, při nichž nastává přeměna v následující fázi. Ve skutečnosti však dehydratace sádrovce nemusí vždy probíhat se stoupající teplotou přes všechny uvedené fáze. Záleží to na podmínkách dehydratace. Při tom mohou vznikat rozdílné formy produktů lišících se fyzikálními vlastnostmi. Např. za nízké tenze vodní páry a při vysoké rychlosti ohřevu se dihydrát přeměňuje přímo na anhydrit III, aniž se tvoří hemihydrát. [4]

Sled přeměn při zahřívání dihydrátu za různých podmínek je schematicky znázorněn v tab. č. 5, kde jsou také uvedeny přibližné teploty, při nichž příslušná přeměna probíhá prakticky využitelnou rychlostí. Sledy přeměn jsou uvedeny pro podmínky, jež mají význam pro technické výrobní postupy. [4]

Úplnou dehydratací sádrovce na vzduchu vzniká nejprve anhydrit III, a to směs forem α a β . Účinkem vzdušné vlhkosti přechází anhydrit III na hemihydrát, vodou se hydratuje na dihydrát za současného tuhnutí, avšak výsledná pevnost je nižší než u hemihydrátů. [4]

Dalším zahříváním sádrovce vzniká nerozpustný anhydrit II, krystalograficky shodný s přírodním anhydritem. Reakce s vodou je u něho tak pomalá, že prakticky nenastává tuhnutí. Jako pojivo nelze tedy anhydrit II samotný použít, tuhnutí je však možno vyvolat přidavkem některých látek. [4]

Při teplotách nad 800 °C vzniká směs anhydritu II s malým množstvím anhydritu I a volného CaO (2 až 4 %), který katalyzuje hydrataci a tím umožňuje i tuhnutí. [4]

6. Přehled základních vlastností popílku a cementu

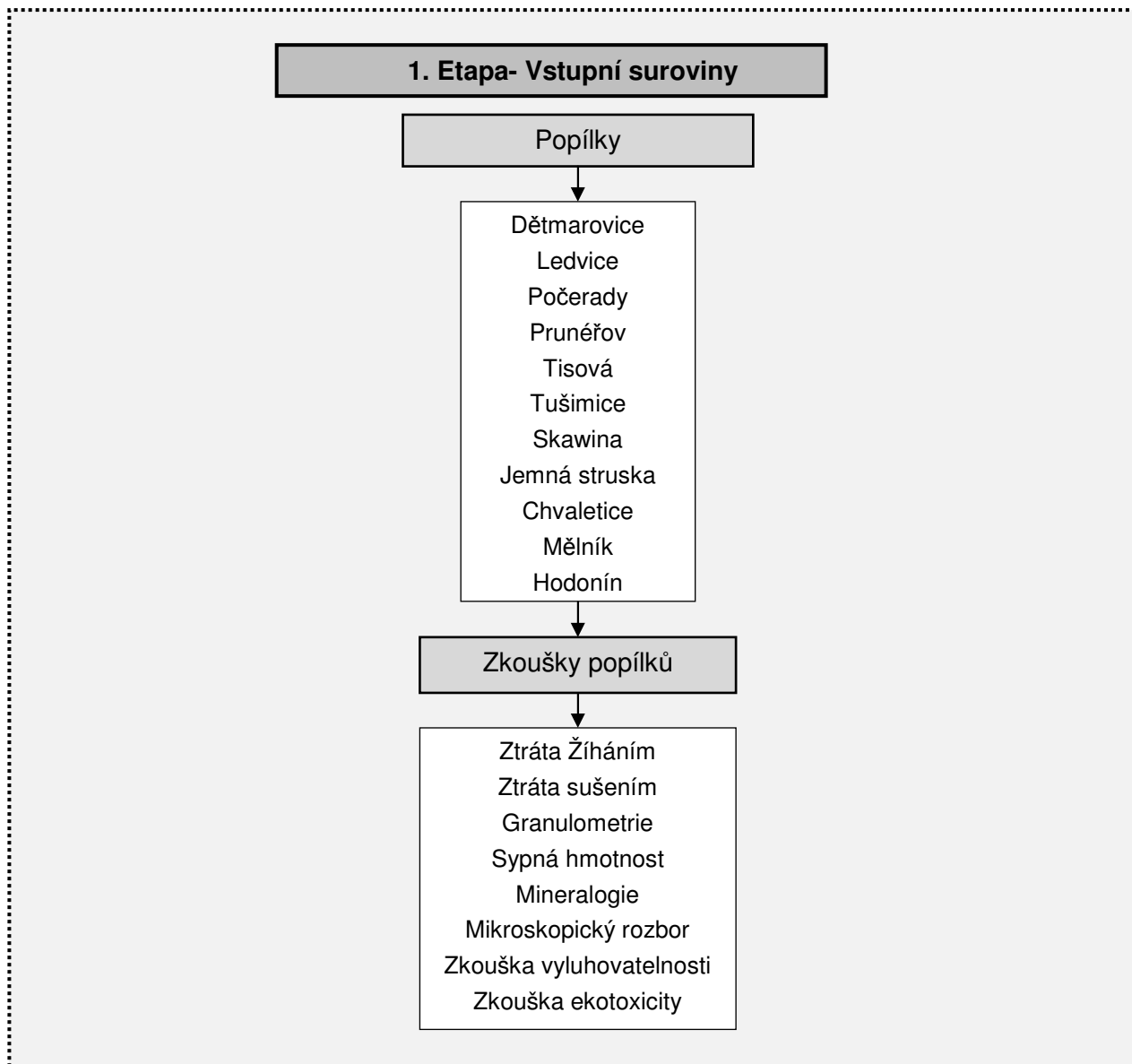
Byly porovnány fyzikální vlastnosti popílku a cementu, a byla také provedena síťová analýza. Skutečná hustota vzorku klasického popílku činila 1860 kg.m^{-3} a skutečná hustota vzorku portlandského cementu byla 3100 kg.m^{-3} . Při stanovování sypané hmotnosti byla pro klasický popílek zjištěna hodnota 756 kg.m^{-3} a pro portlandský cement hodnota 1238 kg.m^{-3} . Oba dva zjišťované parametry mají svůj význam při volbě způsobu dopravy hydraulického pojiva. Z hlediska hydratačních reakcí je pak mnohem důležitější velikost částic, která byla stanovena síťovou analýzou. Vyplývá z ní široká distribuce velikosti částic klasického popílku, kdy největší podíl byl zachycen sítí s průměrem ok 40 mm . Naproti tomu portlandský cement vykazuje

významný podíl zachycený na sítu s průměrem ok 90 mm, kde bylo zachyceno přibližně 40 % celkové hmotnost částic. Velikost částic je významným kritériem pro hydrataci hydraulických pojiv, neboť rozhoduje o specifickém povrchu částic a potažmo o rychlosti hydratace - hydratační reakce probíhají na povrchu částic. Nevýhodou klasického popílku je značný podíl částic s větším průměrem. Hydratace klasického popílku tak musí probíhat nutně pomaleji než hydratace portlandského cementu. Mnohem významnější roli než velikost částic hraje při hydrataci hydraulických pojiv jejich složení, neboť výrazně ovlivňuje typ a rychlost hydratace vznikajících minerálů. Významný je rozdíl v obsahu SiO_2 , který je u klasického popílku více jak dvojnásobný. Klasický popílek se také vyznačuje vysokým obsahem Al_2O_3 . Portlandský cement se však vyznačuje vysokým obsahem CaO , který je u klasického popílku téměř nulový. Složení hydraulických pojiv rozhoduje o rychlosti hydratace. U portlandského cementu se po 28 dnech stanovuje pevnost a uvádí se, že výrazná část minerálů zhydratovala. U klasického popílku jsou však hydratační reakce několikanásobně pomalejší a pro hodnocení klasického popílku jako pojiva musí být použita delší zkušební doba. U klasického popílku byl zjištěn vysoký podíl částic s průměrem větším než 200 mm, který je u portlandského cementu téměř nulový. Tato skutečnost je značně nepříznivá, neboť hydratační reakce probíhají na povrchu částic, který s rostoucí velikostí klesá. Naproti tomu stojí poznatky o zvýšené potřebě záměsové vody u cementů obohacených popílkem, které je dáno větší porézností, a tedy vyšším specifickým povrchem klasických popílků. [9]

METODIKA ŘEŠENÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

1. Návrh věcného plnění cílů diplomové práce

Diplomová práce bude rozdělena do čtyř následujících etap:



První etapa práce bude zaměřena na kvalitu vstupních surovin a jejich vhodnost pro výrobu umělého popílkového kameniva. Zejména se jedná o popílký z elektráren Dětmarovice, Ledvice, Počerady, Pruněřov, Tisová, Tušimice, Skawina, Chvaletice, Mělník a Hodonín. Na popílcích budou stanoveny jejich rozhodující vlastnosti důležité pro jejich další využití k výrobě umělého kameniva spékáním i za studena vytvrzovaného. Bude zjišťována jejich granulometrie, mineralogie, sypná hmotnost, ztráta žíháním a další rozhodující parametry. Výstupem této etapy bude určení hlavních parametrů popílků a na základě těchto vlastností určit jejich vhodnosti pro následnou výrobu popílkového kameniva.

2. Etapa- Laboratorní zkoušky popílkového kameniva

Spékané umělé kamenivo

Kamenivo za studena vytvrzované

Zkušební vzorky 20 x 20 x 100 mm
Konzistence pasta

Příměsi

Popílký samostatně
Příměs 5 % cementu
Příměs 5 % vápna
Příměs Arcelormittalu
Příměs jemného uhlí

Výpal

Teplota výpalu 1150 °C
Nárůst teplot max. °C/hod. nebo 300 °C/hod
Výdrž 10 minut

Zkoušky na zkušebních vzorcích

Vodní součinitel
Objemová hmotnost
Pevnost v tlaku
Nasákavost
Zkouška vyluhovatelnosti

Příměsi

Příměs 5 %, 10 %, 15 % cementu
Příměs 5 %, 10 %, 15 % vápna

Vytvrzování za studena

Uložení vzorků do vlhkého prostředí
Vlastnosti po 7 dnech
Vlastnosti po 28 dnech

Zkoušky na zkušebních vzorcích

Vodní součinitel
Objemová hmotnost
Pevnost v tlaku
Nasákavost

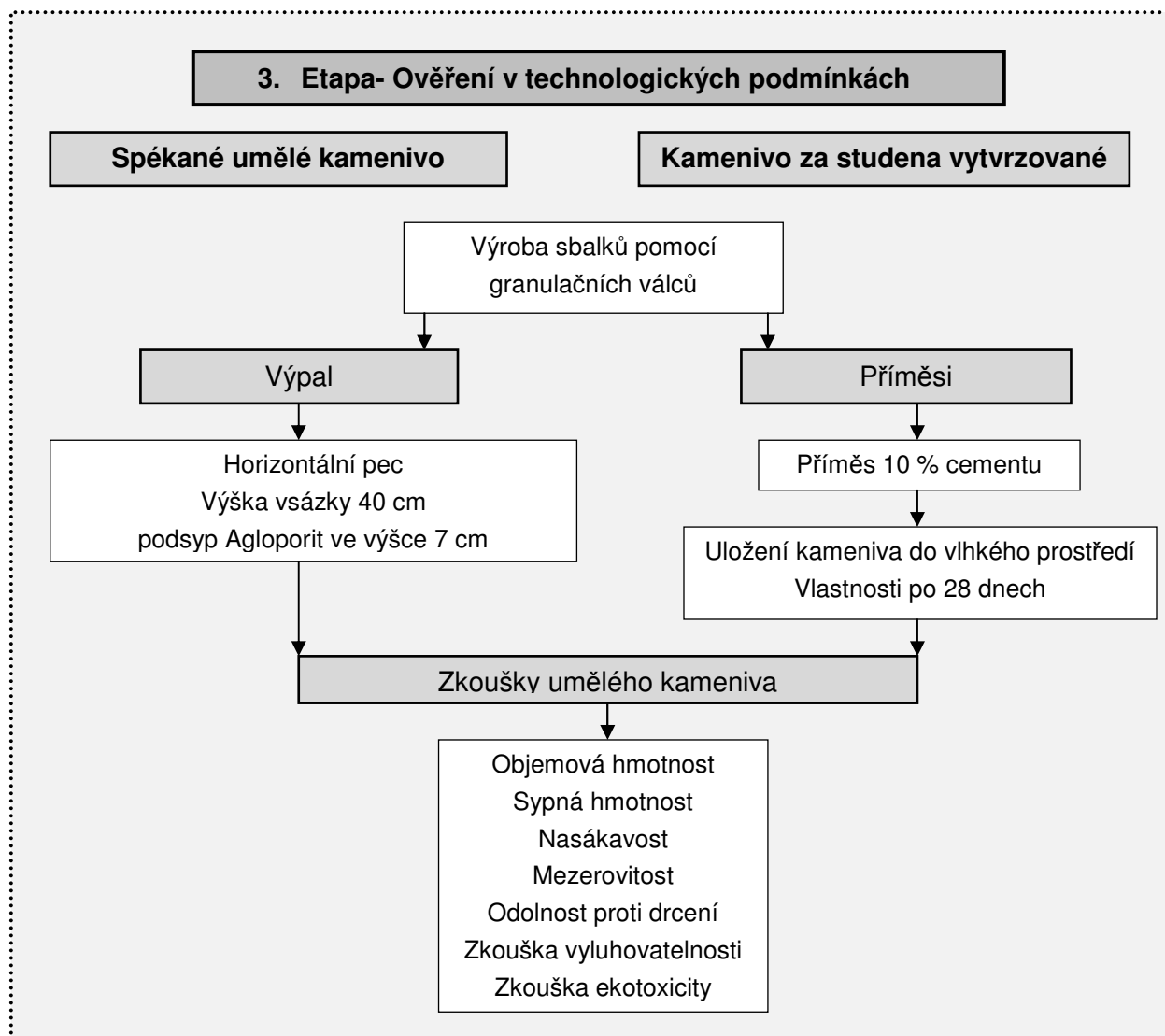
Druhá etapa práce se zabývá vlastnostmi umělého popílkového kameniva a bude prováděna v laboratorních podmínkách.

První část této etapy bude řešit spékané popílkové kamenivo, kde budou vyrobeny zkušební vzorky 20 x 20 x 100 mm. Budou vyrobeny vzorky bez příměsí, ale také vzorky s příměsí cementu a vápna. K ověření vlivu příměsí paliva budou zkoušeny vzorky s příměsí popílku z Arcelormittalu Ostrava, jemného uhlí. Tyto vzorky budou následně vypáleny v muflové peci při teplotě 1150 °C s maximální rychlostí výpalu, které je muflová pec schopna (cca 8,0 °C/min). U vzorků, které se nadouvaly potom 300 °C/hod a izotermickou výdrží na teplotě 1150 °C po dobu 10 min. Na vypálených vzorcích budou prováděny zkoušky objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a nasákavosti.

Druhá část etapy se bude zabývat výrobou umělého kameniva za studena vytvrzovaného. Stejně jako v první části budou vyrobeny zkušební vzorky 20 x 20 x 100 mm. Bude zkoumán vliv příměsí cementu a vápna na vlastnosti umělého za studena vytvrzovaného kameniva v množství 5 %, 10 % a 15 %. Vzorky budou uloženy do vlhkého prostředí a po 7 a 28 dnech na nich bude

zjišťována objemová hmotnost, pevnost v tlaku a nasákavost.

Výstupem této části práce bude určení užšího souboru perspektivních popílků a optimalizace surovinové směsi pro následující výrobu popílkového kameniva v technologických podmínkách.



Třetí etapa bude řešit ověření vybraných popílků vhodných pro výrobu umělého kameniva a na rozdíl od předchozích etap bude prováděna v technologických podmínkách. V případě výroby umělého spékaného kameniva budou nejprve vyrobeny sbalky pomocí granulačních válců. Připravené sbalky budou dále vypalovány v horizontální peci s výškou vsázky 40 cm. Jako korekční palivo bude použita uhelná moučka a jako podsyp bude použit Agloporit ve výšce 7 cm. Kamenivo vytvrzované za studena bude vyráběno s příměsí 10 % cementu a svůj tvar získá v granulačních válcích. Poté bude kamenivo uloženo k dozrání do vlhkého prostředí. Na obou typech kameniva se stanoví jejich základních vlastností, především odolnosti proti drcení, dále potom objemová a synná hmotnost, nasákavost a mezerovitost. Vybraná spékaná i za studena vytvrzovaná kameniva budou dále testovány v betonech.

4. Etapa- Orientační ověření využitelnosti umělého popílkového kameniva v betonech

Základní lehké betony
Vysokopevnostní lehké betony

Zkušební vzorky 100 x 100 x 100 mm
Konzistence třídy S1 dle zkoušky sednutí kužele
Uložení vzorků do vlhkého prostředí
Vlastnosti po 7 dnech
Vlastnosti po 28 dnech

Objemová hmotnost
Pevnost v tlaku
Zkouška vyluhovatelnosti
Zkouška ekotoxicity

Poslední, čtvrtá etapa práce se bude zabývat výrobou základních lehkých betonů zkušební výroby vysokopevnostních lehkých betonů. V laboratorních podmínkách budou vyrobeny zkušební vzorky 150 x 150 x 150 mm z vybraných spékaných i za studena vytvrzovaných kameniv. Ze základních lehkých betonů budou vyráběny betony pevnostní třídy LC 20/22 a LC 30/33. V případě pokusu o výrobu lehkých vysokopevnostních betonů se bude jednat o betony s použitím příměsí popílku, mikrosiliky nebo jemné strusky při použití superplastifikátoru Sika® ViscoCrete®-1035/CZ. Na čerstvém betonu se určí objemová hmotnost a bude provedena zkouška sednutí kužele. Vyrobené zkušební vzorky budou uloženy do vlhkého prostředí a po určité době na nich bude testována pevnost v tlaku a bude určena objemová hmotnost. Základní lehké betony budou zkoušeny po 7, 28 a v některých případech i 90 dnech, vysokopevnostní pak po 3, 7 a 28 dnech. Cílem této etapy je vyhodnocení možnosti využitelnosti vyrobeného kameniva pro výrobu betonu.

2. Postupy jednotlivých stanovení

V této kapitole jsou uvedeny zkoušky prováděné v rámci diplomové práce.

2.1. Stanovení ztráty sušením

Navážený vzorek se vysuší v sušárně při teplotě 105 °C až 110 °C do ustálené hmotnosti. Úbytek hmotnosti odpovídá ztrátě sušením. Postupuje se podle normy ČSN 72 0102.

2.2. Stanovení vlhkosti

Metoda sušením v sušárně umožňuje zjistit celkovou volnou vodu přítomnou ve zkušební navážce kameniva. Postupuje se podle normy ČSN EN 1097-5. Zkušební navážka se zváží a vysuší v sušárně s nuceným pohybem vzduchu o teplotě (110 ± 5) °C. Obsah vlhkosti se stanoví jako rozdíl hmotností mezi vlhkým a suchým vzorkem a vyjadřuje se jako procento hmotnosti vysušené navážky.

2.3. Stanovení ztráty žíháním

Stanovení ztráty žíháním prováděné podle normy ČSN 72 0103 je použito ke stanovení množství nedopalu potřebného ke kvalitnímu průběhu samovýpalu. Vzorek se žihá při předepsané teplotě 1100 °C do ustálené hmotnosti. Vážením zjištěný úbytek hmotnosti odpovídá ztrátě žíháním.

2.4. Stanovení sypné hmotnosti volně sypané i setřesené

Vysušený popílek se volně bez otřesů sype do odměrné nádoby s předepsanou plechovou výsypkou. Při následném stanovení setřesené sypné hmotnosti se poklepává po hranách nádoby a dosypává se další popílek, dokud nezůstává vzorek v nádobě beze změn. Další postup je uveden v ČSN 72 2071.

2.5. Stanovení zrnitosti síťovým rozbořem

Určení granulometrického složení spočívá v rozdělení zkoušeného materiálu podle velikosti částic pomocí sít o normalizovaných parametrech.

Vstupní suroviny - K síťovému rozboru se použije sada drátěných sít podle ČSN ISO 2395. Při stanovení zrnitosti za sucha se postupuje podle normy ČSN ISO 2591-1, při kterém se používají zkušební síta z kovové tkaniny a děrovaného plechu. Pokud se provádí stanovení proséváním za mokra, postupuje se podle normy ČSN EN 451-2.

Kamenivo - Zrnitost kameniva se musí stanovit podle ČSN EN 933-1.

2.6. Rentgenová difrakční analýza

Metoda rentgenové difrakční analýzy (RDA) je použita ke stanovení mineralogického složení látek krystalického charakteru, metodickým postupem VUT FAST, č. 30-33/1. Identifikace přítomných krystalických fází se provádí porovnáním hodnot d a I , odečtených z difraktogramu, s hodnotami v tabulkách ASTM.

2.7. Rastrovací elektronová mikroskopie

Analýza mikrostruktury vzorků je prováděna rastrovacím elektronovým mikroskopem (REM) v souladu s metodickým postupem VUT FAST, č. 30-33/1.

Součástí analýz je i využití kombinace metod REM a EDAX, kdy je možno při mikroskopickém snímání ve vytipovaných lokalitách stanovit chemické složení s procentuálním zastoupením jednotlivých chemických prvků.

2.8. Stanovení objemové hmotnosti zkušebních vzorků spékaných a za studena vytvrzovaných popílků vyrobených v laboratorních podmínkách

Pro stanovení objemové hmotnosti čerstvých vzorků i těles po laboratorním výpalu pro posouzení jednotlivých receptur pro kamenivo ze spékaných popílků je zvoleno použití zkušebních těles o rozměrech 20×20×100 mm. Samotná objemová hmotnost je prováděna s odkazem na ČSN EN 1015-10 a ČSN EN 1015-6.

2.9. Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních vzorků spékaných a za studena vytvrzovaných popílků vyrobených v laboratorních podmínkách

Pevnost v tlaku čerstvých i vypálených vzorků je zkoušena na zkušebních tělesech (20×20×100 mm). Tělesa jsou vždy uložena do úložných destiček o délce a šířce 20 mm. Hodnota pevnosti v tlaku je následně vypočtena jako aritmetický průměr hodnot stanovených na čtyřech zkušebních tělesech.

2.10. Stanovení nasákavosti

Nasákavost jak zkušebních těles, tak kameniv je stanovována dle ČSN EN 1097-6.

2.11. Stanovení odolnosti proti drcení

Zkouška je prováděna dle přílohy A normy ČSN EN 13055-1. Vzorek kameniva se vloží do specifikovaného ocelového válce a zhutní se vibrací. Kamenivo je pak pístem stlačováno ve válci na stanovenou vzdálenost, přičemž se změří síla, která vyjadřuje odolnost proti drcení.

2.12. Sednutí kužele

Sednutí kužele je jedna ze zkoušek pro měření konzistence. Ukazuje, jak moc čerstvý beton teče nebo se sype. Zkouška je prováděna dle ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Zkouška, podle velikosti sednutí, rozdělí beton do pěti tříd S1 - S5.

2.13. Stanovení objemové hmotnosti betonu

Stanovení objemové hmotnosti betonu se provádí na zkušebních tělesech o rozměrech 150×150×150 mm dle ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

2.14. Stanovení pevnosti v tlaku betonu

U zatvrdlých betonů se tato zkouška provádí na zkušebních vzorcích o rozměrech 150×150×150 mm. Vzorky se umístí do zkušební lisu a výsledkem je podíl maximálního zatížení při porušení vzorku a průřezové plochy zkušební tělesa, na kterou působí zatížení v

tlaku $f_c = F/A_c$. Zkouška je prováděna dle ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

2.15. Zkouška vyluhovatelnosti

Vyluhovatelnost škodlivých složek se stanovuje analytickými metodami určenými pro rozbor vodných výluhů. Základním předpisem pro stanovování obsahu škodlivin v látkách je v současné době vyhláška č. 294/2005 Sb. "o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu" ve znění pozdějších předpisů.

2.15.1. Vyluhovatelnost škodlivin dle přílohy č. 2 vyhlášky č. 294/2005 Sb.

Nejvýše přípustné hodnoty ukazatelů – koncentrací škodlivin ve vodném výluhu odpadu pro jednotlivé třídy vyluhovatelnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. č. 5: Nejvýše přípustné hodnoty ukazatelů pro jednotlivé třídy vyluhovatelnosti

ukazatel	Třídy vyluhovatelnosti			
	I	IIa	IIb	III
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
DOC (rozpuštěný organický uhlík)	50	80	80	100
Fenolový index	0,1			
Chloridy	80	1500	1500	2500
Fluoridy	1	30	15	50
Sírany	100	3000	2000	5000
As	0,05	2,5	0,2	2,5
Ba	2	30	10	30
Cd	0,004	0,5	0,1	0,5
Cr celkový	0,05	7	1	7
Cu	0,2	10	5	10
Hg	0,001	0,2	0,02	0,2
Ni	0,04	4	1	4
Pb	0,05	5	1	5
Sb	0,006	0,5	0,07	0,5
Se	0,01	0,7	0,05	0,7
Zn	0,4	20	5	20
Mo	0,05	3	1	3
RL (rozpuštěné látky)	400	8 000	6 000	10 000
pH		≥ 6	≥ 6	

2.16. Zkouška ekotoxicity

Ekotoxicita je obecně definována jako toxické působení na životní prostředí nebo také toxické působení na živé organismy. Při stanovování jsou organismy vystavovány po určitou dobu agresivnímu prostředí a měří se jejich úmrtnost. Nejčastější typy ekotoxických zkoušek jsou uvedeny v tabulce č. 5.

2.16.1. Ekotoxicita dle přílohy č. 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb

Stejně jako v případě vyluhovatelnosti je hodnocen vodný výluh analyzovaného stavebního výrobku. V případě použití např. vápna, cementu apod. je možno upravit pH výluhu na hodnotu ležící v intervalu $7,8 \pm 0,2$.

Tab. č. 6: Požadavky na výsledky ekotoxikologických testů

Testovaný organismus	Doba působení [hodina]	I.	II.
Poecilia reticulata, nebo Brachydanio rerio	96	ryby nesmí vykazovat v ověřovacím testu výrazné změny chování ve srovnání s kontrolními vzorky a nesmí uhynout ani jedna ryba	ryby nesmí vykazovat v ověřovacím testu výrazné změny chování ve srovnání s kontrolními vzorky a nesmí uhynout ani jedna ryba
Daphnia magna Straus	48	procento imobilizace perlooček nesmí v ověřovacím testu přesáhnout 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky	procento imobilizace perlooček nesmí v ověřovacím testu přesáhnout 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky
Raphidocelis subcapitata (Selenastrum capricornutum) nebo Scenedesmus subspicatus	72	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice růstu řasy větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice nebo stimulace růstu řasy větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky
Semena Sinapis alba	72	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice růstu kořene semene větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice nebo stimulace růstu kořene semene větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

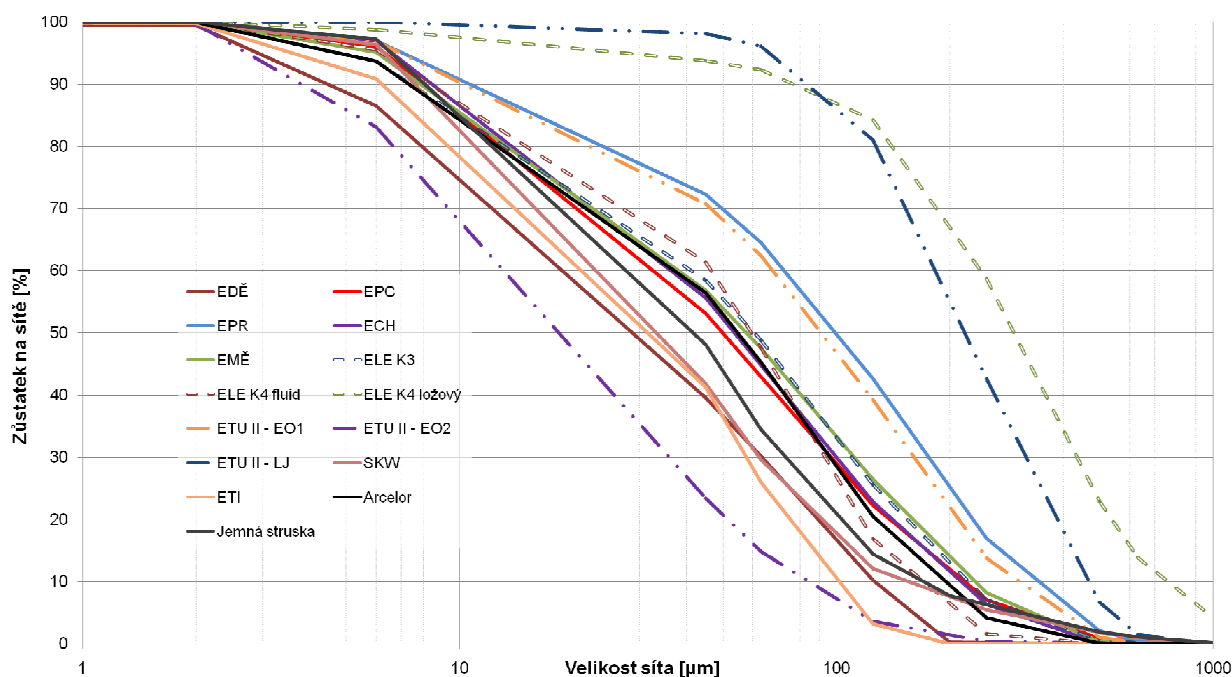
Tato část diplomové práce je věnována výzkumným pracím. Jak již bylo zmiňováno, je rozdělena do čtyř etap na vstupní suroviny, výrobu popílkového kameniva v laboratorních a technologických podmínkách a na využití umělého popílkového kameniva pro výrobu lehkých betonů.

1. Etapa I. - Vstupní suroviny

Tato kapitola se zabývá zjišťováním základních parametrů vstupních surovin pro výrobu popílkového kameniva.

1.1. Základní parametry surovin

Pro kvalitní hodnocení zkoušených surovin je důležité určit jejich hlavní parametry, kterými jsou především granulometrie, ztráta sušením, ztráta žíháním, sypná hmotnost, chemický rozbor, mikroskopické posouzení a mineralogický rozbor. Na následujícím obrázku je uvedena granulometrie zkoušených surovin společně s úsečkou, vyjadřující požadavek normy ČSN 72 2072-6 na maximální zůstatek na síti 0,090 mm. Čárkovaně jsou zvýrazněny jednotlivé typy popílků z elektrárny Tušimice II. Na následujícím obrázku je uvedena granulometrie zkoušených surovin s tím, že čerchovaně jsou zvýrazněny jednotlivé typy popílků z elektrárny Tušimice II, čárkovaně jednotlivé typy popílků z elektrárny Ledvice.



Z grafického porovnání je zřejmé, že mezi kvalitní jemné popílkky patří kromě selektivně odebraného typu EO2 z Tušimic i vzorky z elektráren Dětmarovice a Skawina, které splňují

požadavek normy ČSN 72 2072-6 na maximální zůstatek na síti 0,090 mm. Na druhé straně velmi hrubý je popílek z mechanického odlučovače z Tušimic a ložový popel z Ledvic. Jedním z cílů práce je však ověření možnosti výroby umělého spékaného kameniva i z méně kvalitních popílků.

Tab. č. 7: Vlastnosti vstupních surovin

Popílký	Ztráta sušením	Ztráta žháním	Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]		Měrný povrch
	[%]	[%]	volně sypaná	setřesená	[m ² .kg ⁻¹]
Klasické popílký					
Dětmarovice	0,01	1,26	1070	1190	362
Počerady	0,03	1,07	910	1110	299
Prunéfov	0,02	1,07	870	940	224
Ledvice - klasický	0,02	1,19	870	990	329
Ledvice K3 jemný	0,01	1,33	850	1000	309
Ledvice K3 hrubý	0,02	1,90	770	780	73
Tušimice II - EO1	0,22	2,39	910	1010	234
Tušimice II - EO2	0,30	1,97	730	940	262
Tušimice II - Ljungström	0,44	2,51	720	800	43
Chvaletice	0,01	1,04	810	920	334
Mělník	0,02	1,07	830	930	242
Arcelormittal Ostrava	0,01	27,12	680	810	398
Struska Mělník	62,87	14,00	490	610	438
Fluidní popílký					
Ledvice - fluidní	0,01	2,08	650	770	353
Ledvice - ložový	0,00	4,23	970	1210	33
Tisová - fluidní	0,01	2,04	580	640	361
Tisová - ložový	0,01	0,44	1710	1800	24
Hodonín	0,16	3,94	870	990	273

Tab. č. 8: Výpis ostatních použitých surovin

Suroviny	Závod
Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Cementárna Mokrá
Cement CEM I 42,5 R	Cementárna Mokrá
Pálené vápno	Vápenka Čertovy schody a. s.
Uhelná moučka (ZŽ 8 %)	Zbůch u Plzně

Stanovením množství nedopalu ve zkoušených vstupních surovinách bylo zjištěno, že kromě popílku ze společnosti Arcelormittal Ostrava splňují všechny suroviny požadavek normy ČSN 72 2072-6 na maximální ztrátu žháním max. 15 %. Proto bude ostravský popílek použit v další části jako korekční palivo.

Z výsledků stanovení sypné hmotnosti je patrný obecně platný fakt, kdy fluidní popílký dosahují nižších sypných hmotností než popílký vysokoteplotní vlivem neuspořádané („načechrané“) struktury zrn. Většina surovin splňuje požadavek normy ČSN 72 2081-8 na minimální sypnou hmotnost volně sypanou 600 kg.m⁻³ a setřesenou 800 kg.m⁻³. Nízké sypné hmotnosti byly také zjištěny u jemné strusky a popílku z Arcelormitallu Ostrava.

Popílký Dětmarovice, Počerady, Ledvice, Tušimice a Skawina dosahují zřejmě vyššího procenta slinutí a vykazují tak vyšší hodnoty sypných hmotností.

1.1.1. Chemické složení

Velmi důležitým aspektem vhodnosti vstupních surovin pro technologii výroby umělého kameniva spékáním je chemické složení. Výsledky stanovení jsou uvedeny v následující tabulce. Oranžovou barvou jsou zvýrazněny parametry, které se výrazně liší od průměrných hodnot.

Tab. č. 9: Chemické složení zkoušených klasických i fluidních popílků

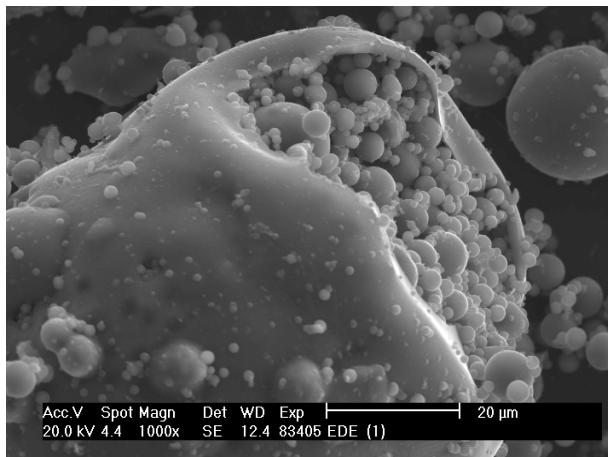
Popílký	Chemické složení [%]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Klasické									
Dětmarovice	43,95	26,57	12,43	0,00	5,30	2,05	2,08	0,59	0,29
Počerady	54,60	29,50	5,46	0,08	1,81	0,96	1,34	0,25	0,11
Pruněřov	47,60	25,00	12,70	0,54	2,29	1,37	1,35	0,33	1,23
Ledvice - klasický	47,70	28,20	5,61	0,13	1,10	0,81	1,04	0,23	0,14
Tušimice - EO1	50,00	23,40	14,50	0,26	3,42	1,72	1,065	0,29	0,16
Tušimice - EO2	48,30	22,80	16,60	0,50	3,70	1,73	1,163	0,447	0,177
Tušimice - Ljungström	49,50	21,90	12,50	0,90	3,51	1,85	0,745	0,236	0,172
Skawina	49,60	23,10	6,36	0,63	4,19	2,69	2,85	1,17	0,44
Chvaletice	50,16	27,54	13,08	0,07	2,51	1,46	1,35	0,35	0,19
Mělník	53,37	32,26	5,74	0,23	1,40	1,01	1,26	0,29	0,22
Arcelormittal Ostrava	32,09	18,93	20,28	0,24	6,23	2,24	1,49	0,48	0,12
Struska Mělník	45,50	26,50	4,68	0,14	1,89	1,00	1,06	0,39	0,18
Fluidní									
Ledvice - fluidní	42,70	26,80	5,05	2,98	10,20	0,86	0,86	0,35	0,18
Ledvice - ložový	42,30	26,70	5,22	3,06	10,30	0,88	0,83	0,29	0,18
Tisová - fluidní	27,60	17,50	5,63	7,57	30,40	0,84	0,46	0,33	0,25
Tisová - ložový	34,05	22,63	8,89	7,18	22,55	1,01	0,78	0,38	0,21
Hodonín	36,90	13,60	4,92	6,12	20,10	1,31	4,92	0,65	0,66

Výsledky ukazují, že vysokoteplotní popílky mají především minimální obsah síranů, který bez problémů splňuje požadavek normy ČSN 72 2072-6, kde je hodnota stanovena na 3 % hmotnostní. Dále mají vysokoteplotní popílky vyšší obsah železa než je tomu u popílků fluidních. Vysoký podíl oxidu křemičitého ve vysokoteplotních popílcích je předpokladem získání kvalitního popílkového střepe. Popílek z elektrárny Tušimice z odběrového místa Ljungkström má sice vysoký podíl oxidu křemičitého, jeho hrubost však bude výrazným handicapem. Výsledky ukazují, že fluidní popílky z elektráren Ledvice a Tisová mají v porovnání s popílky vysokoteplotními výrazně vyšší podíl CaO vzniklý důsledkem nižších teplot při fluidním spalování. Dále mají vyšší obsah síranů.

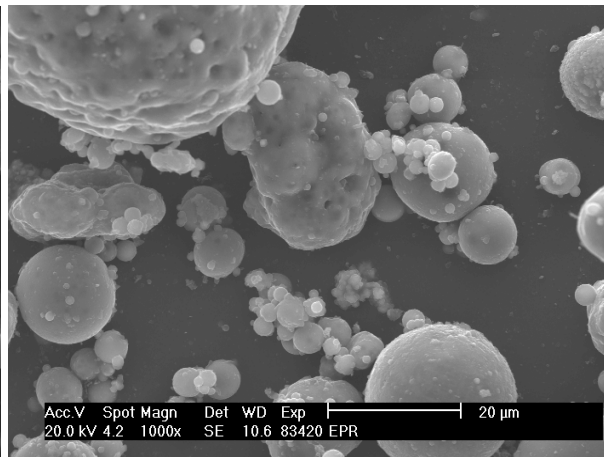
1.1.2. Mikroskopický rozbor

Charakter popílků je dán mimo jiné i jejich strukturou, kterou lze velice dobře prezentovat pomocí snímků z elektronového rastrovacího mikroskopu.

1.1.2.1. Vysokoteplotní popílky

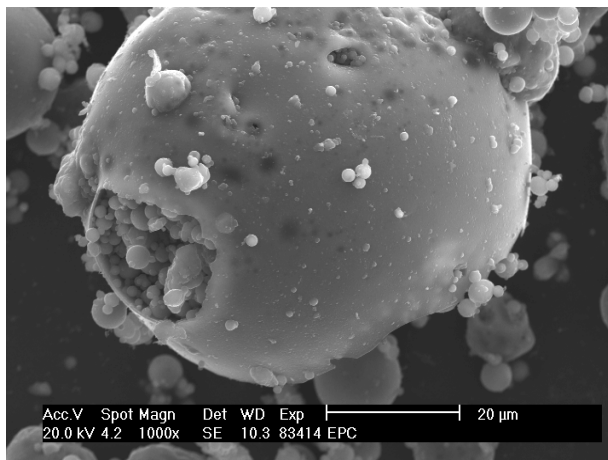


Obr. č. 12: Vzorek popílku Dětmarovice
při zvětšení 1000x

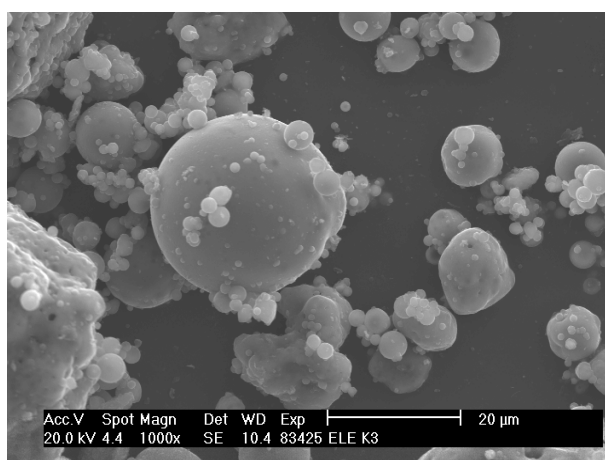


Obr. č. 13: Vzorek popílku Prunéřov
při zvětšení 1000x

Při hodnocení mikroskopických snímků vysokoteplotního popílku z elektráren Dětmarovice a Prunéřov je markantní vysoký obsah amorfní fáze i při pohledu na nejmenší zrna

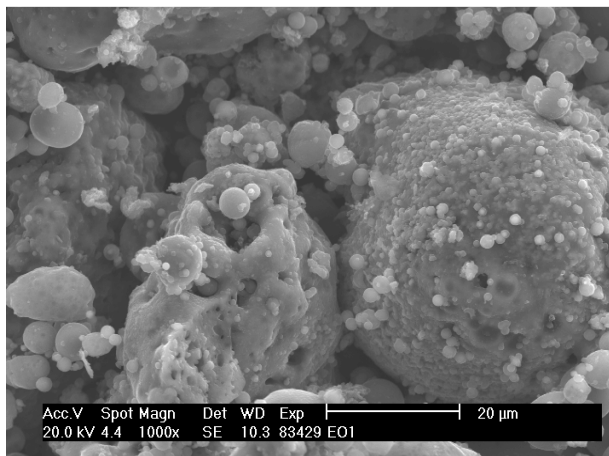


Obr. č. 14: Vzorek popílku Počerady
při zvětšení 1000x

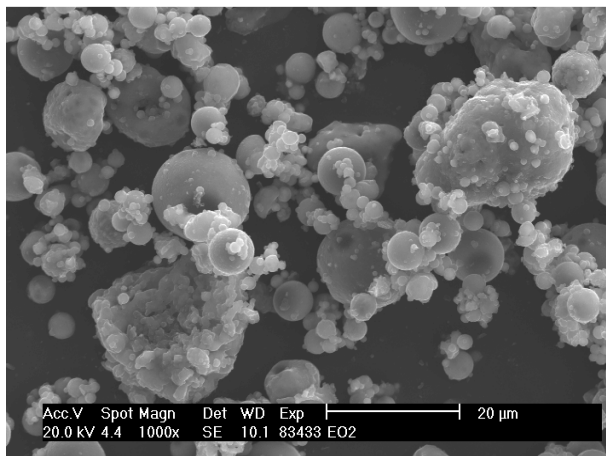


Obr. č. 15: Vzorek popílku Ledvice K3
při zvětšení 1000x

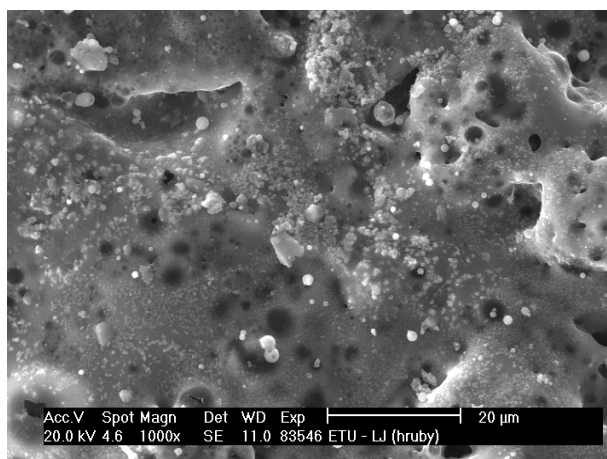
Stejně jako v předchozím případě i popílek z elektrárny Počerady obsahuje velký podíl skelné fáze. Ve spojení s vyšším obsahem jemné frakce se očekává dosažení lepších výsledků, než s použitím surovin z Dětmarovic a Prunéřova. Hodnocení popílku z elektrárny Ledvice jen potvrdilo, že zrna vysokoteplotních popílků mají při bližším pohledu kulový charakter.



*Obr. č. 16: Vzorek popílku Tušimice EO1
při zvětšení 1000x*

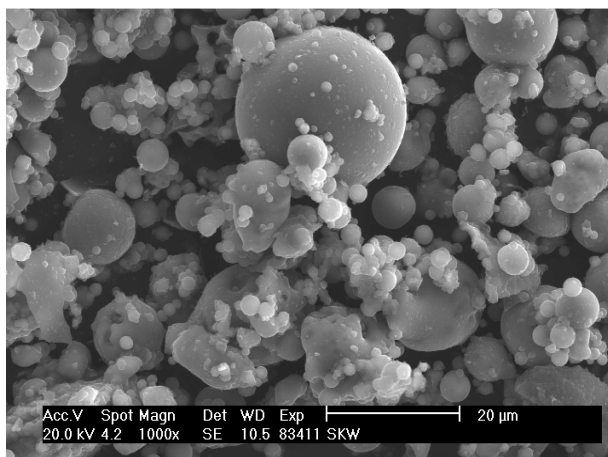


*Obr. č. 17: Vzorek popílku Tušimice EO2
při zvětšení 1000x*

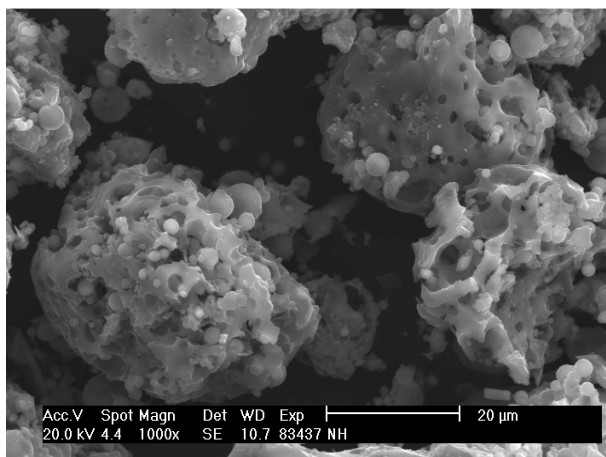


Obr. č. 18: Vzorek popílku Tušimice LJ při zvětšení 1000x

Při posouzení jednotlivých vzorků popílků z elektrárny Tušimice je kromě zřetelného obsahu amorfni fáze jasně patrný rozdíl v granulometrii.



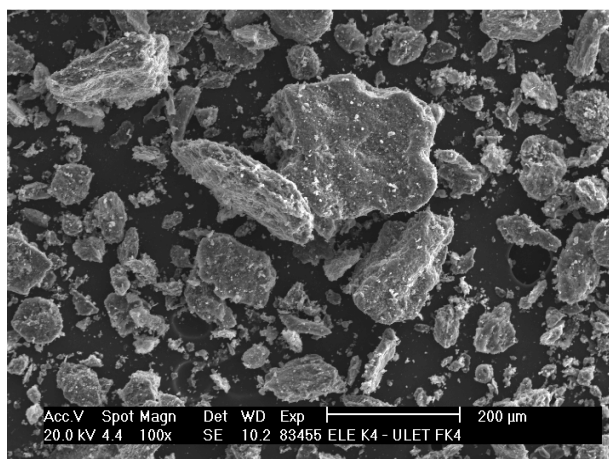
Obr. č. 19: Vzorek popílku Skawina
při zvětšení 1000x



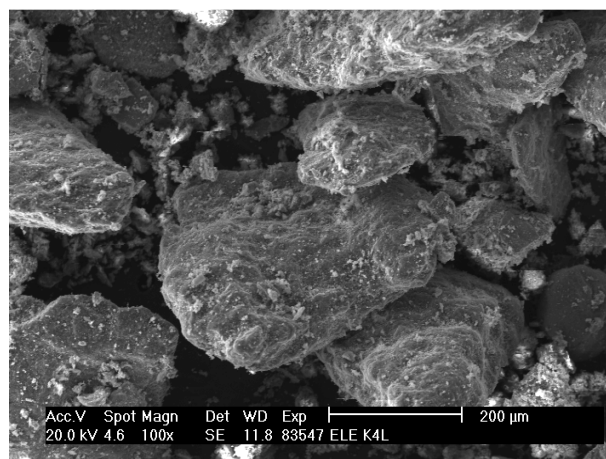
Obr. č. 20: Vzorek popílku Arcelormittal
při zvětšení 1000x

Při pohledu na popílek Skawina je zřejmý vysoký podíl amorfní fáze, popílek Arcelormittal vykazuje vysokou pórovitost. Ta dokazuje jeho nízké hodnoty sypané hmotnosti a měrného povrchu.

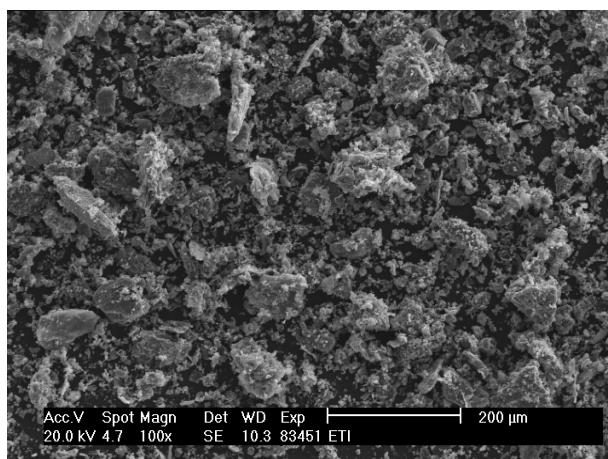
1.1.2.2. Fluidní popílky



Obr. č. 21: Vzorek popílku Ledvice K4
při zvětšení 100x



Obr. č. 22: Vzorek ložového popela Ledvice K4 při
zvětšení 100x



Obr. č. 23: Vzorek popílku Tisová
při zvětšení 100x



Obr. č. 24: Vzorek ložového popela Tisová při
zvětšení 100x

Z posouzení mikrostruktury je zřejmý rozdíl v jemnosti popílků. Současně je patrný minimální podíl amorfni fáze v těchto popílcích, který je závislý především na teplotě a technologii spalování uhlí v energetickém zařízení.

1.1.3. Mineralogický rozbor

Pro bližší pochopení struktury jednotlivých vstupních surovin a následně návaznost na výsledky laboratorních a technologických zkoušek byl proveden detailní kvantitativní mineralogický rozbor hlavních typů surovin a současně i kvalitativní ostatních typů popílků a popelů.

Tab. č. 10: Kvantitativní rozbor vybraných typů popílků

		Popílký klasické							
vzorek		EDĚ	EPC	EPR	ELE K3	SKW	Arcelor	ECH	EME
křemen	SiO ₂	14,5	7,8	7,1	7,0	16,5	13,0	8,6	6,1
mullit	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	17,1	32,3	18,2	39,3	18,5	12,4	23,0	42,5
hematit	Fe ₂ O ₃	1,2	-	2,3	1,2	1,5	2,0	-	-
maghemit	Fe ₂ O ₃	1,3	1,6	3,1	1,5	1,4	2,0	5,3	1,4
magnetit	Fe ₃ O ₄	-	0,2	0,8	0,1	-	-	-	0,1
anortit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	6,8	-	8,7	2,7	6,2	4,2	-	-
ortoklas	KAlSi ₃ O ₈	-	-	-	2,6	3,5	2,8	-	-
sanidin	KAlSi ₃ O ₈	4,5	-	3,7	-	-	-	-	-
periklas	MgO	-	-	-	-	0,3	0,9	-	-
živce	(K,Na)AlSi ₃ O ₈	-	-	-	-	-	-	-	-
illit, muskovit	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	-	-	-	-	-	-	-	-
albit	NaAlSi ₃ O ₈	-	-	-	3,2	1,8	2,1	-	-
amorf. fáze	-	54,6	58,1	56,1	39,5	45,5	57,5	63,2	49,9
vápno	CaO	-	-	-	-	< 0,1	0,8	-	-
kalcit	CaCO ₃	-	-	-	0,7	2,2	0,5	-	-
anhydrit	CaSO ₄	-	-	-	-	-	-	-	-
sádrovec	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-	-	-	2,1	2,5	2,9	-	-

Tab. č. 11: Kvalitativní rozbor vybraných typů popílků

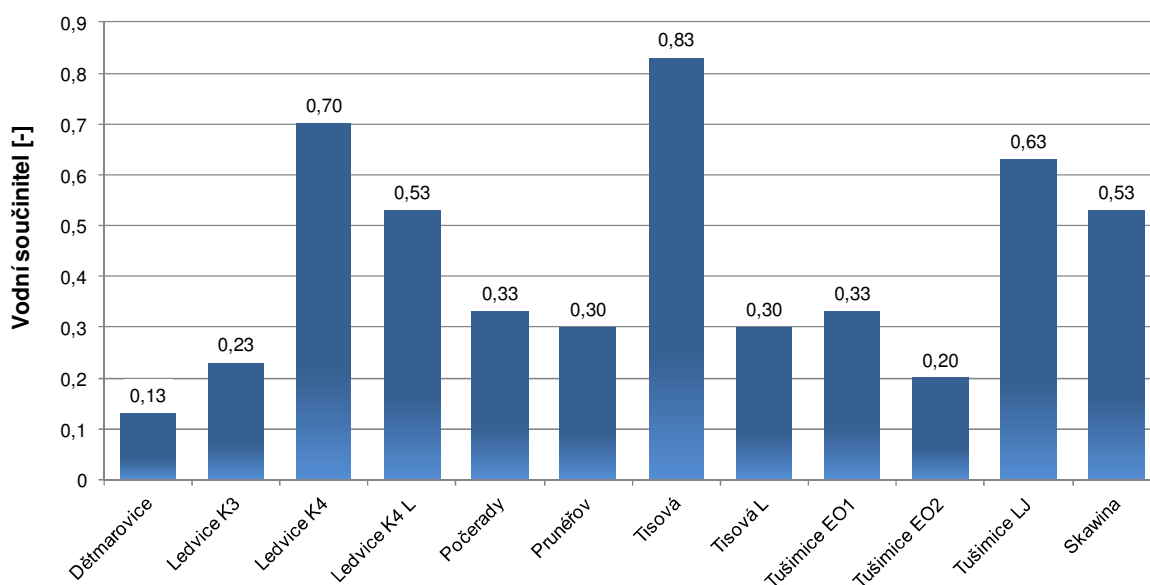
[%]	ELE K4	ELE K4 L	ETI	ETI L	ETU EO1	ETU EO2	ETU LJ
anhydrit	ANO	ANO	ANO	ANO	-	-	-
mullit	-	-	-	-	ANO	ANO	ANO
křemen	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
hematit	-	-	stopově	stopově	ANO	ANO	stopově
anortit	-	-	-	-	ANO	ANO	stopově
kalcit	stopově	ANO	stopově	ANO	-	-	-
portlandit	-	-	ANO	ANO	-	-	-
vápno	ANO	ANO	ANO	ANO	-	-	-

Tabulky zobrazují mineralogický rozbor vybraných popílků, některé naměřené výsledky byly nepřesné, tak bylo zapotřebí použít kvalitativní rozbor namísto kvantitativního. Pro získání kvalitního popílkového střeptu se předpokládá vysoké procento nejen oxidu křemičitého, ale také křemene a mullitu jako minerálů, ovlivňujících reakci v pevné fázi. Nejvyšším procentem disponuje popílek z polské Skawiny, tuzemských Dětmarovic a Ledvic. Ostatní vzorky mají podíly těchto minerálů nižší. Popílek z elektrárny Skawina obsahuje poměrně nízké procento amorfní fáze, která napomáhá vzniku pevnější a kompaktní struktury.

Fluidní popílků obsahují produkty odsíření jako je anhydrit, kalcit, vápno a v případě popílků z Tisové i portlandit. Současně obsahují i určitý podíl křemene, který se podílí na pevnosti výsledného kameniva. Produkty odsíření se naopak při výpalu rozkládají a strukturu kameniva tak oslabují.

1.1.4. Příprava zkušebních vzorků na bázi popílků

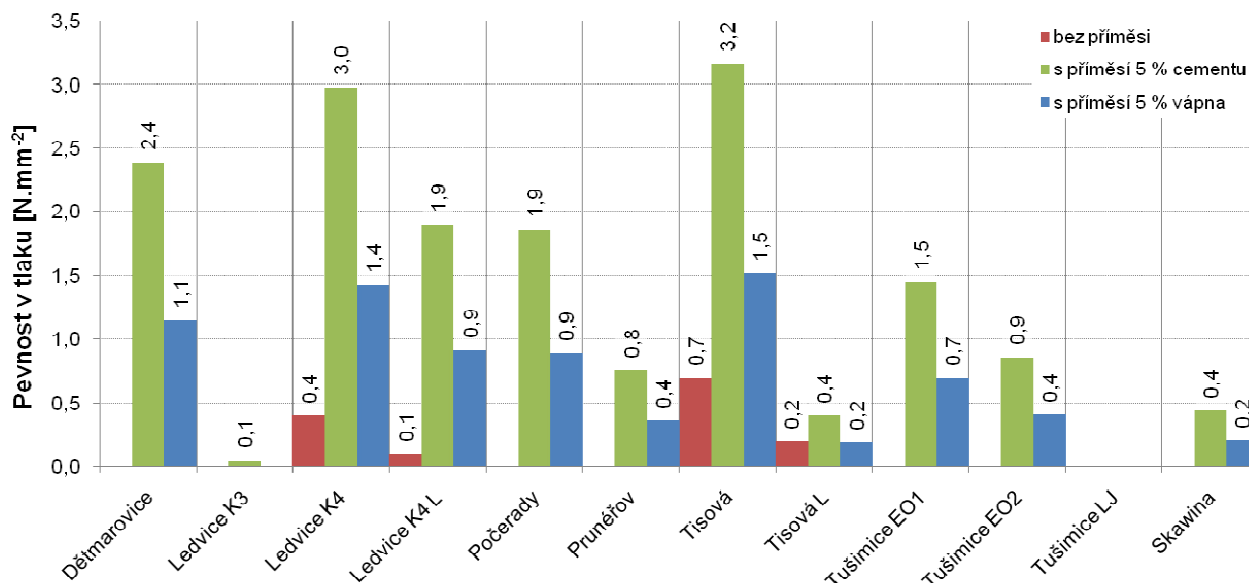
Příprava surovinové vsázky pro aglomerační rošt představuje nutnost přidavku technologické vody pro granulaci. V následném procesu samovýpalu je tak nutné vynaložit část energie na vysušení pelet. Na následujících obrázcích jsou uvedeny množství potřebné záměsové vody pro docílení konzistence pasty pro jednotlivé typy popílků v hmotnostních procentech, vztaženo k suché surovinové směsi.



Graf č. 2: Vodní součinitel pro konzistenci pasta zkušebních vzorků

Z výsledků je zřejmé, že fluidní popílků z důvodu neuspořádané ("načechrané") struktury a vyššího obsahu volného vápna vyžadují pro dosažení stejné konzistence pasty výrazně vyšší množství vody než popílků klasické s pravidelnou strukturou s vysokým podílem skelné fáze.

Vzhledem k minimálním pevnostem vzorků z popílků bez příměsí, jsou v etapě zkoušky i vzorky s příměsí cementu (5 %) a páleného vápna (5 %) pro zvýšení těchto pevností a snížení citlivosti vzorků na rychlý výpal v muflové peci. Na následujícím obrázku jsou uvedeny výsledky stanovení pevnosti předsušených vzorků na bázi popílků v laboratorní sušárně při teplotě 105 °C po dobu 2 hodin.



Graf č. 3: Pevnost v tlaku předsušených zkušebních vzorků

Je zřejmé, že nejvyšších pevností je dosaženo příměsí cementu, následována příměsí páleného vápna. Popílek z odlučovače Ljunktström je pro získání pevné struktury po předsušení příliš hrubý. Popílek Skawina nízkým obsahem skelné fáze není příliš reaktivní. V případě využití úletových popílků lze předpokládat dostatečné pevnosti výsledného granulátu i při použití čistého popílku.

1.2. Environmentální parametry tuzemských popílků

Základní požadavky na hodnocení vlivu na životní prostředí dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. Přesto, že se jedná o vyhlášku zaměřenou na ukládání odpadů na povrch terénu a jejich využívání na povrchu terénu, je stále v ČR jediným platným dokumentem pro hodnocení vlivu stavebních výrobků na životní prostředí.

1.2.1. Vyluhovatelnost škodlivin

Na vybraných popílcích z různých tuzemských zdrojů byla provedena zkouška vyluhovatelnosti škodlivin. Naměřené hodnoty jsou uspořádány v následující tabulce, kde zeleně jsou vyznačeny výsledky, které splňují zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Oranžová barva značí ostatní hodnoty, které všechny bezpečně splňují požadavky pro zařazení do IIa skupiny vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. Hodnoty, v následující tabulce, uvedené pod jednotkami označují limit pro I třídu vyluhovatelnosti, v závorkách pod nimi jsou pak uváděny hodnoty udávající omezení pro IIa třídu.

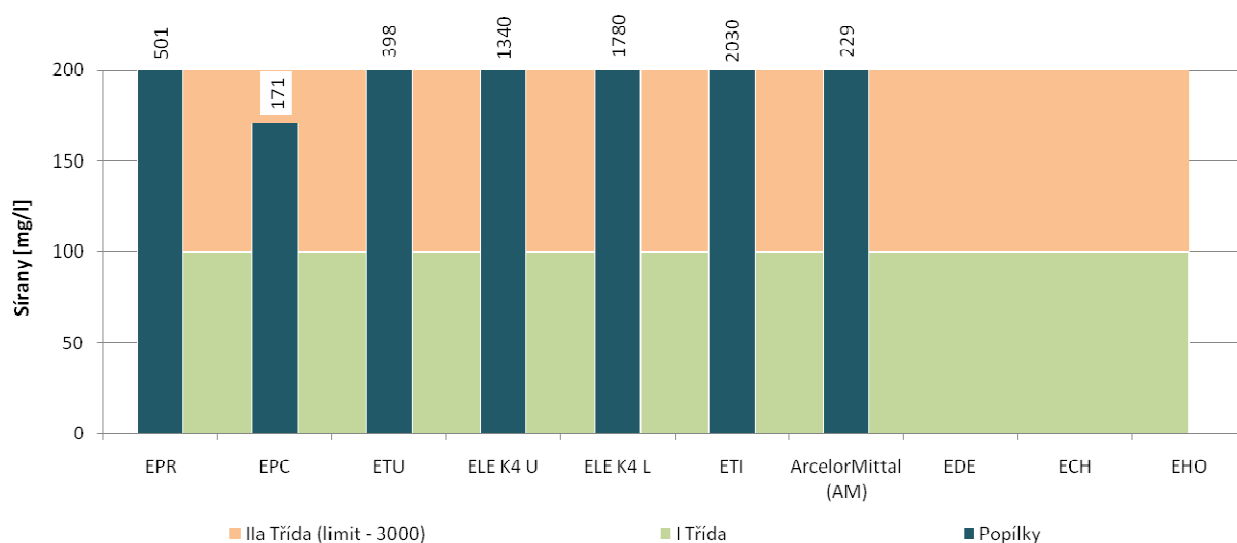
Tab. č. 12: Vyluhovatelnost škodlivin vybraných tuzemských popílků

Vzorek	Ztráta sušením 105 °C	Rozpuštěné látky	Chloridy	Síraný	Arsen	Kadmium	Chrom	Nikl	Olovo
Jednotka	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
vyhl. č. 294/2005 Sb.		400 (8000)	80 (1500)	100 (3000)	0,05 (2,5)	0,004 (0,5)	0,05 (7,0)	0,04 (4,0)	0,05 (5,0)
Popílký									
EPR	0,29	794	2,1	501	< 0,001	0,016	< 0,03	0,227	< 0,05
EPC	0,26	264	5,6	171	< 0,001	< 0,005	< 0,03	0,041	< 0,05
ETU	0,25	268	< 1	398	< 0,0046	0,00076	< 0,03	0,082	< 0,001
ELE K4 U	2,61	3420	3,0	1340	0,002	0,00041	0,107	< 0,02	0,0017
ELE K4 L	0,37	5570	21,5	1780	< 0,001	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
ETI	0,16	4530	8,2	2030	0,0022	0,00036	0,075	< 0,02	0,0024
ELE K3	0,14	234	1,5	134	0,0029	0,0017	< 0,03	0,133	< 0,001
ArcelorMittal (A	0,41	2110	5,9	229	0,0022	0,00037	0,081	< 0,02	0,0014
ECH	0,20	247	2,0	160	0,0054	0,0022	< 0,03	0,09	< 0,001
EHO	1,76	3981	4,6	2240	0,0065	< 0,0001	0,059	< 0,02	0,0069
EDE	0,09	176	1,2	124	< 0,005	< 0,004	< 0,04	< 0,04	< 0,04

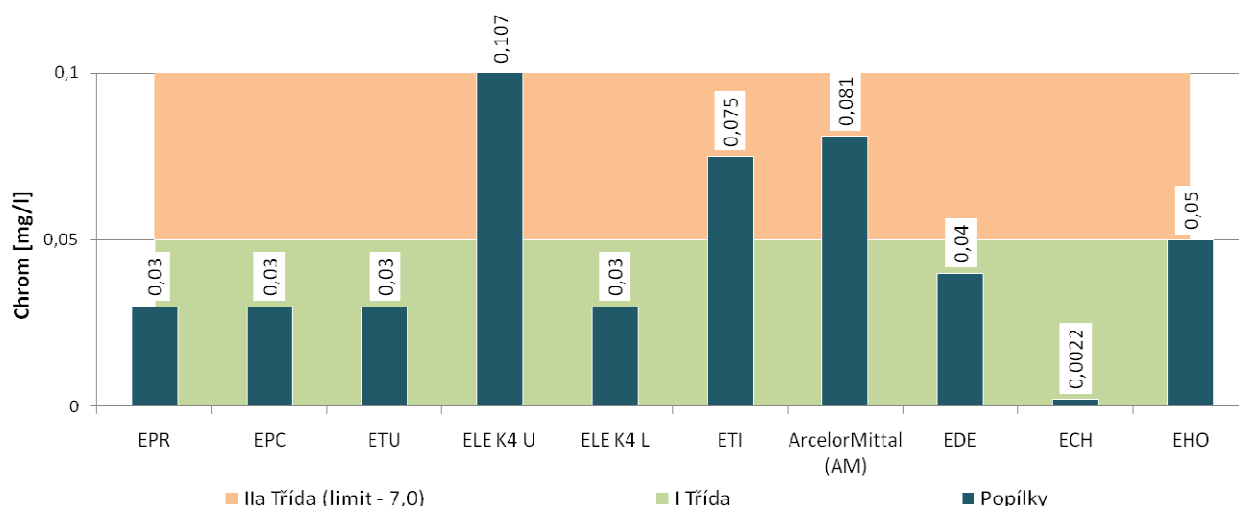
Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že vybrané popílký nesplňují požadavky pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti dle přílohy č. 2 vyhlášky č. 294/2005 Sb a to hlavně z důvodu vysoké vyluhovatelnosti síranů, která byla prokázána u všech zkoušených popílků. Nejlepších výsledků dosáhli popílký z elektráren Počerady a Tušimice, které měly pouze 2 parametry vyšší, než požaduje vyhláška pro první třídu. Nejvíce nevhodných hodnot pro první třídu bylo naměřeno u popílků z elektrárny Prunéřov.

1.2.1.1. Grafické porovnání vlastností popílků

V následujících grafických přehledech je znázorněno porovnání hlavních nevyhovujících parametrů pro zařazení popílků do první třídy vyluhovatelnosti.



Graf č. 4: Zobrazení množství síranů v popílcích



Graf č. 5: Porovnání množství chromu v popílcích

1.2.2. Ekotoxicita

Z ekotoxikologických zkoušek byly na vybraných popílcích provedeny zkoušky stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby, zkouška akutní toxicity, test inhibice růstu sladkovodní řasy a test inhibice růstu kořene hořčice bílé. Naměřené hodnoty jsou uspořádány v následujících tabulkách, kde zeleně jsou vyznačeny výsledky, které splňují zařazení do první třídy ekotoxicity. Červená barva značí hodnoty, které požadavky pro zařazení do první třídy ekotoxicity dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. nesplňují.

Tab. č. 13: Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby (*Poecilia reticulata*)

Vzorek	vyhl. č. 294/2005 Sb.	koncentrace výluhu (ml/l)	mortalita ryb za 96 hod (ks)/ počet ryb v testu (ks)	mortalita ryb za 96 hod (%)
Kontrola	0	0	0/10	0
EPR	0	1000	0/10	0
EPC	0	1000	0/10	0
ETU	0	1000	0/10	0
ELE K4	0	1000	0/10	0
ETI	0	1000	0/10	0
ArcelorMittal	0	1000	0/10	0
ELE K3	0	1000	0/10	0
ECH	0	1000	0/10	0
EME	0	1000	0/10	0

Tab. č. 14: Zkouška inhibice pohyblivosti *Daphnia magna* Straus – Zkouška akutní toxicity

Vzorek	vyhl. č. 294/2005 Sb.	koncentrace výluhu (ml/l)	imobilizace perlooček za 48 hod (ks) / počet perlooček v testu (ks)	mortalita perlooček za 48 hod (%)
Kontrola	<30%	0	0/20	0
EPR	<30%	1000	60/60	100
EPC	<30%	1000	0/60	0
ETU	<30%	1000	0/60	0
ELE K4	<30%	1000	43/60	71,7
ETI	<30%	1000	60/60	100
ArcelorMittal	<30%	1000	60/60	100
ELE K3	<30%	1000	60/60	100
ECH	<30%	1000	6/60	10
EME	<30%	1000	60/60	100

Tab. č. 15: Test inhibice růstu sladkovodní řasy (*Scenedesmus subspicatus*)

Vzorek	vyhl. č. 294/2005 Sb.	koncentrace výluhu (ml/l)	počet paralelních stanovení	Ø inhibice/stimulace růstu řasy (%)
Kontrola	<30%	0	3	/
EPR	<30%	1000	3	43,8
EPC	<30%	1000	3	8,7
ETU	<30%	1000	3	5,0
ELE K4	<30%	1000	3	21,6
ETI	<30%	1000	3	25,3
ArcelorMittal	<30%	1000	3	7,6
ELE K3	<30%	1000	3	36,8
ECH	<30%	1000	3	-14,1
EME	<30%	1000	3	19,4

Tab. č. 16: Test inhibice růstu kořene hořčice bílé (*Sinapis alba*)

Vzorek	vyhl. č. 294/2005 Sb.	koncentrace výluhu (ml/l)	počet paralelních stanovení po 30 semenech	Ø inhibice/stimulace růstu kořene (%)
Kontrola	<30%	0	3	/
EPR	<30%	1000	3	17,7
EPC	<30%	1000	3	-8,2
ETU	<30%	1000	3	3,6
ELE K4	<30%	1000	3	24,2
ETI	<30%	1000	3	48,6
ArcelorMittal	<30%	1000	3	38,5
ELE K3	<30%	1000	3	11,8
ECH	<30%	1000	3	4,9
EME	<30%	1000	3	-9,4

Z výsledků ekotoxikologických zkoušek je zřejmé, že nejlepších hodnot dosáhli popílků z elektráren Počerady, Tušimice a Chvaletice, které ve všech prováděných zkouškách splnili veškeré parametry pro zařazení do první třídy ekotoxicity dle přílohy č. 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb. Naopak u popílků z elektráren Pruněřov, Tisová a ArcelorMittal Ostrava byly ve dvou zkouškách prokázány vyšší hodnoty, než požaduje vyhláška pro zařazení do první třídy ekotoxicky.

1.3. Shrnutí vhodnosti surovin pro technologii výroby umělých popílkových kameniv

Tato část diplomové práce popsala charakter a parametry vybraných typů popílků. Lze předpokládat, že kvalitního popílkového střepu bude získáno s využitím popílků z elektráren Dětmárovice a Ledvice. V případě použití popílků z fluidního způsobu spalování, bude kvalitnějšího popílkového střepu dosaženo při použití úletových popílků. Vzhledem však k neuspořádané struktuře těchto popílků s minimálním množstvím amorfni fáze se nepředpokládá získání kameniva srovnatelné kvality jako v případě využití popílků vysokoteplotních. V případě kameniva vytvrzovaného za studena bude vhodnější použít popílků z fluidního způsobu spalování a to hlavně z důvodu vyššího obsahu volného CaO.

Z hlediska environmentálních parametrů vybraných tuzemských popílků byla řešena vyluhovatelnost škodlivin a ekotoxicita. Byly sestaveny tabulky výsledků zkoušek, které graficky rozlišují vhodnost jednotlivých parametrů pro zařazení do jednotlivých tříd vyluhovatelnosti a ekotoxicity. Mezi nejlepší popílků, které splňují nejvíce parametrů pro zařazení do prvních tříd jak vyluhovatelnosti škodlivin, tak ekotoxicity, patří popílků z elektráren Počerady a Tušimice. Nejvíce nevhodných hodnot pro první třídu bylo naměřeno u popílků z elektrárny Pruněřov.

2. Etapa II. - Laboratorní zkoušky popílkového kameniva

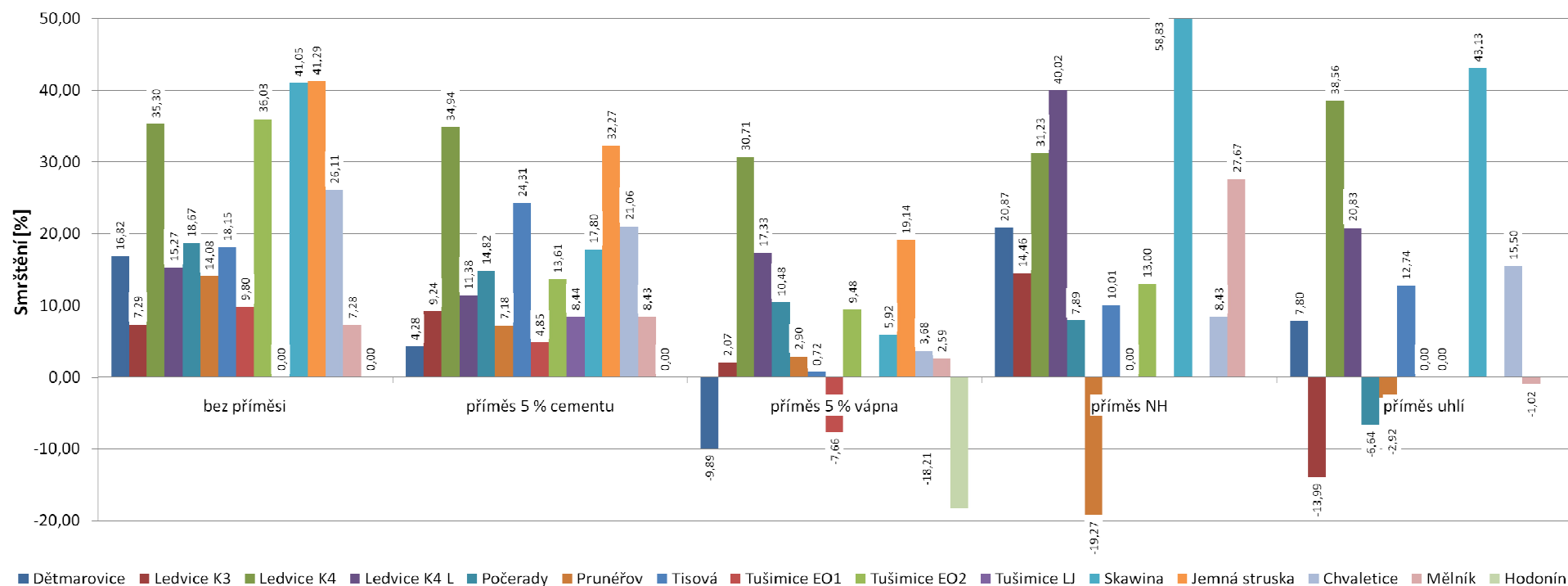
V této etapě diplomové práce je řešena výroba umělého popílkového kameniva v laboratorních podmínkách.

2.1. Spékané umělé kamenivo

V této části bude ověřen vliv jak samotného popílků, tak i různých typů příměsí na fyzikálně-mechanické vlastnosti vypáleného střepu. Zkušební vzorky byly vypalovány v muflové peci. Doba výpalu je charakterizována počáteční teplotou 25 °C, maximální rychlostí výpalu, které je muflová pec schopna (cca 8,0 °C/min). U vzorků, které se nadouvaly potom 300 °C/hod a izotermickou výdrží na teplotě 1150 °C po dobu 10 min, což dohromady stanovilo dobu výpalu na 160 min $\pm$ 2 min. Tyto parametry výpalu byly zvoleny s ohledem na velmi vysokou rychlost výpalu na aglomeračním roštu a pro všechny navržené receptury jsou konstantní. Po výpalu a přirozeném vychladnutí se vzorky vyjmou z pece a umístí do exsikátoru. Po ustálení jejich teploty bude stanovena objemová hmotnost, pevnost v prostém tlaku a nasákavost.

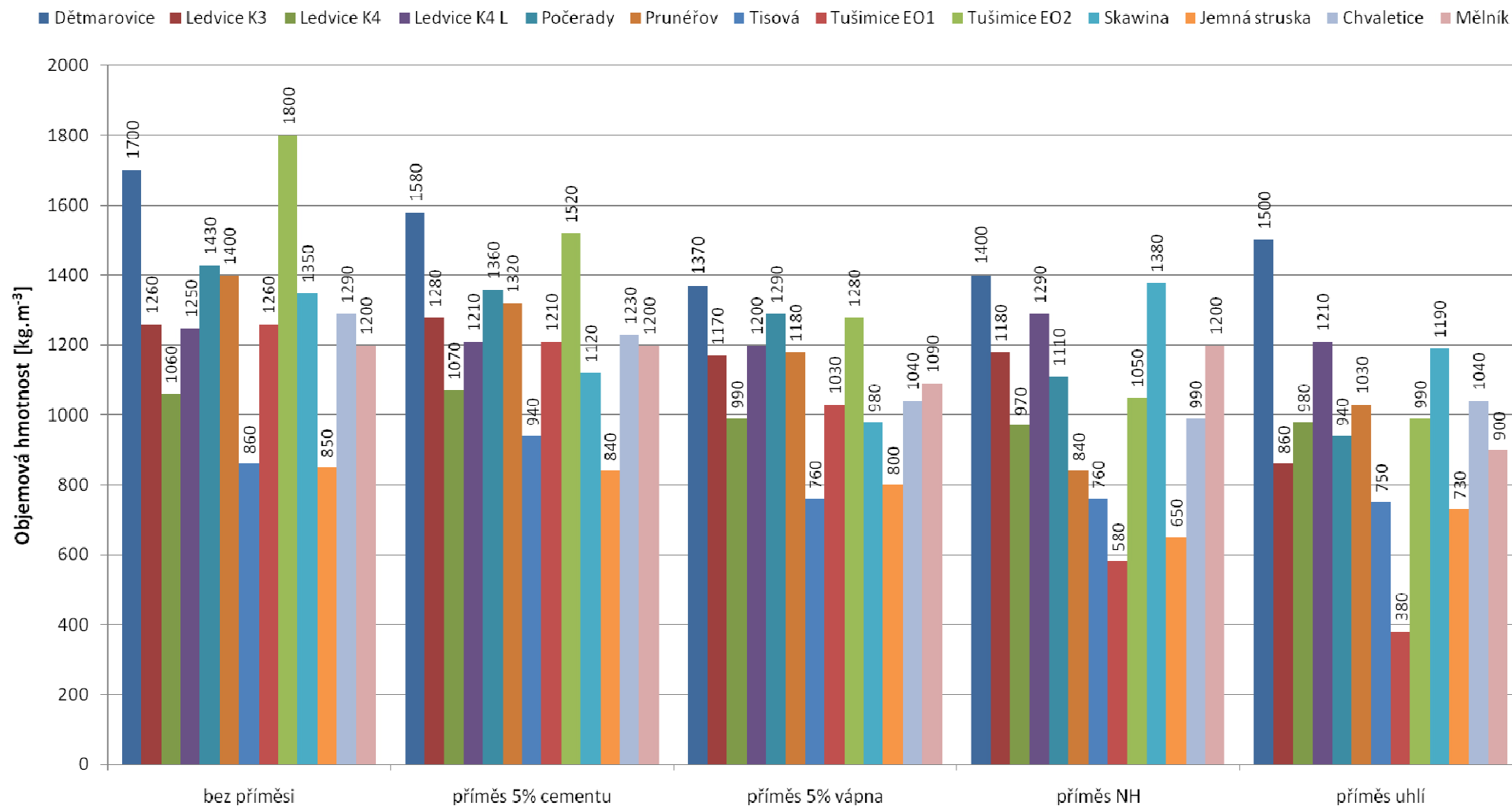
2.1.1. Vlastnosti vstupních surovin

Jako základní korekční složky byly testovány cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R a pálené vápno pro zvýšení manipulačních pevností čerstvě namíchaných zkušebních vzorků, dále také černouhelný prach a popílek z Arcelormittal Ostrava. Černouhelný prach má zjevně jemnost srovnatelnou s popílků nebo i vyšší, vzhledem ke své nízké objemové hmotnosti však není bezpečně měřitelná používanými metodami.



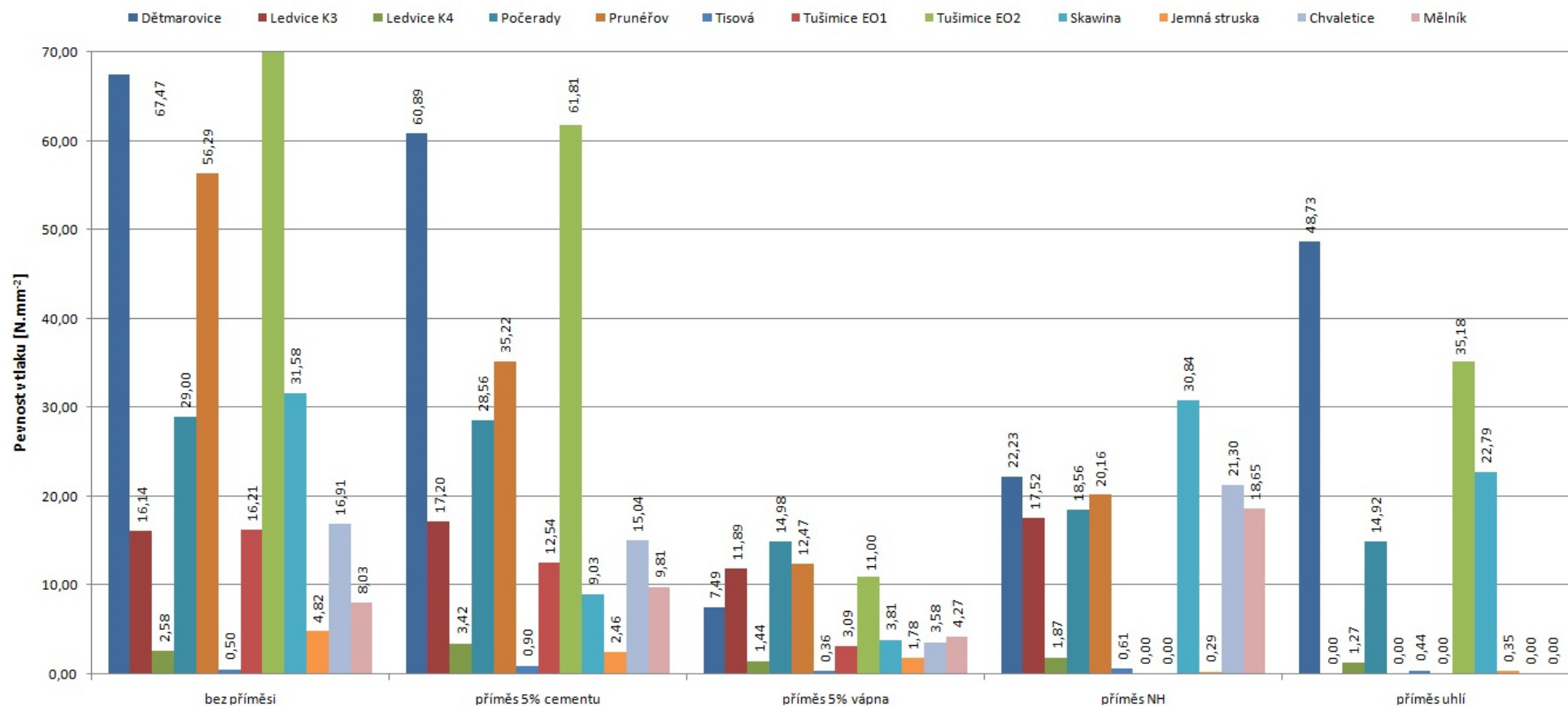
Graf č. 6: Smrštění vypálených zkušebních vzorků

Z grafu vyplývá, že ve většině případů došlo výpalem ke smrštění zkušebních vzorků. Větší smrštění se projevilo u vzorků bez příměsi. V případě příměsi vápna došlo u vzorků vyrobených z popílků z elektráren Dětmorovice, Tušimice EO1 a Hodonín k nadýmání. Tento jev byl zřejmě způsoben příměsí vápna, které při výpalu působí jako tavivo a urychluje tak přechod z fáze slinutí do fáze nadouvání.

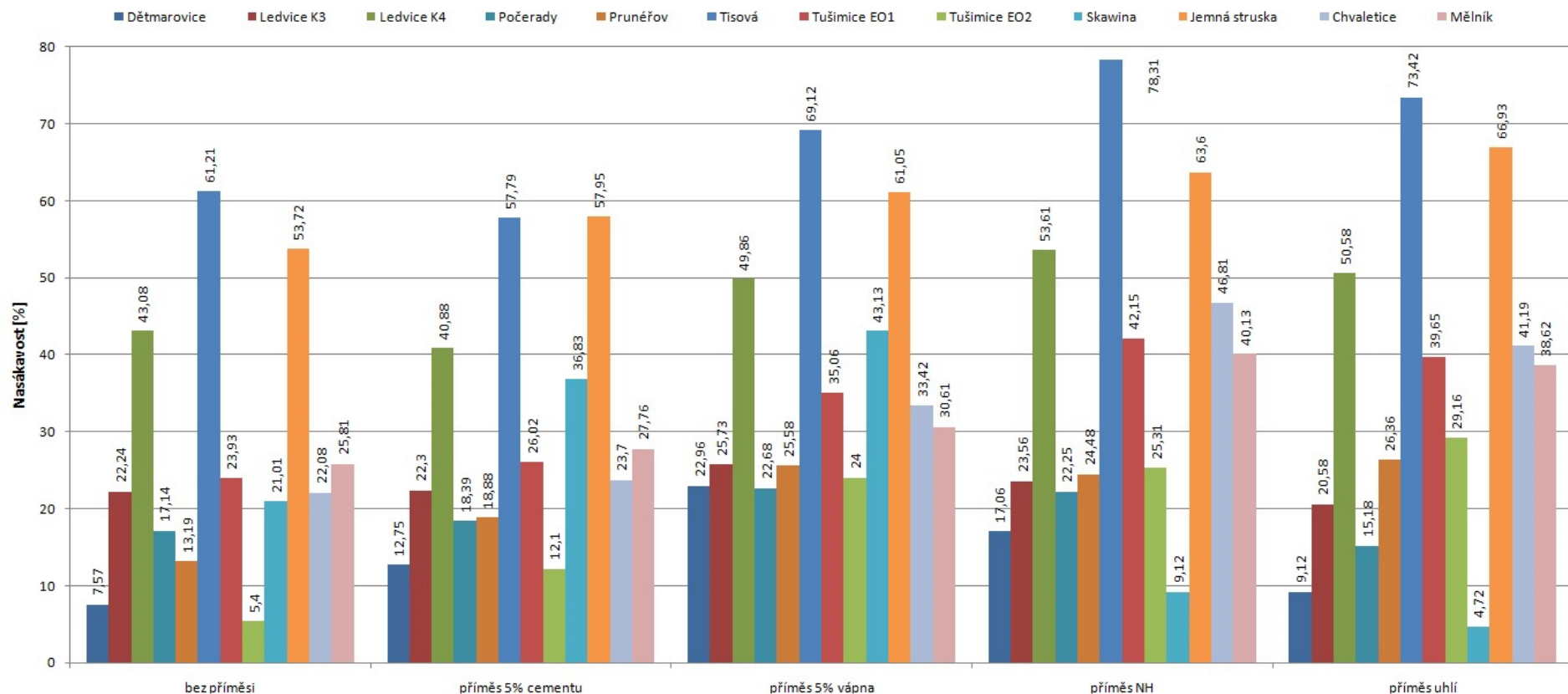


Graf č. 7: Objemová hmotnost vypálených zkušebních vzorků

Z výsledků je zřejmé, že příměsi cementu a vápna spíše snižují tento parametr vlivem rozkladu hydratačních produktů. Vzorky z poměrně hrubých popelů z fluidního způsobu spalování a popílku z mechanického odlučovače nedosahovali po výpalu manipulační pevnosti. Jednalo se zejména o popílky z elektrárny Hodonín a Tušimice LJ.



Graf č. 8: Pevnost v tlaku vypálených zkušebních vzorků



Graf č. 9: Nasákavost vypálených zkušebních vzorků

Z výsledků je zřejmé, že kvalitního střepu je dosaženo při použití kvalitních klasických popílků, kterými jsou vzorky z elektrárny Dětmovice, Ledvice, Pruněřov, Počerady a jemného popílku z druhého elektroodlučovače elektrárny Tušimice II. Fluidní popílků dosahují z důvodu své neuspořádané struktury nesrovnatelně nižších pevností. Příměs cementu nebo vápna oslabuje strukturu rozkladem hydratačních produktů a kromě snížení pevnosti, zvyšuje i nasákavost. V případě vzorků na bázi fluidního popílku z elektrárny Tisová, Hodonín a Ledvice nebylo možné z důvodu snížení manipulační pevnosti při zkoušení nasákavosti, tento parametr měřit. U klasického popílku z elektrárny Tušimice LJ byl zjištěn stejný problém.



Obr. č. 25: Nadýmaní zkušebních vzorků

Na obrázku č. 24 jsou zobrazeny vypálené vzorky z vysokoteplotního popílku z elektrárny Tušimice. Vlevo se jedná o vzorky s příměsí popílku z Arcelormitallu Ostrava a v pravé části jsou vzorky s příměsí černého uhlí. Při výpalu došlo k nadýmání a následnému spečení vzorků pravděpodobně z důvodu vysokého obsahu železa, které zapříčinilo vznik taveniny na povrchu střepu a vznikající zplodiny CO, resp. CO₂ tak nemohli ze střepu uniknout.

2.1.2. Environmentální parametry popílkového střepu

Environmentální parametry popílkového střepu byly posuzovány podle příloh 2 a 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb., které jsou uvedeny v metodice diplomové práce.

2.1.2.1. Vyluhovatelnost škodlivin

Na popílkovém střepu vyrobeném z vybraných popílků z různých tuzemských zdrojů byla provedena zkouška vyluhovatelnosti škodlivin. Naměřené hodnoty jsou uspořádány v následující tabulce, kde zeleně jsou vyznačeny výsledky, které splňují zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Oranžová barva značí ostatní hodnoty, které všechny bezpečně splňují požadavky pro zařazení do IIa skupiny vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. Hodnoty, v následující tabulce, uvedené pod jednotkami označují limit pro I třídu vyluhovatelnosti, v závorkách pod nimi jsou pak uváděny hodnoty udávající omezení pro IIa třídu.

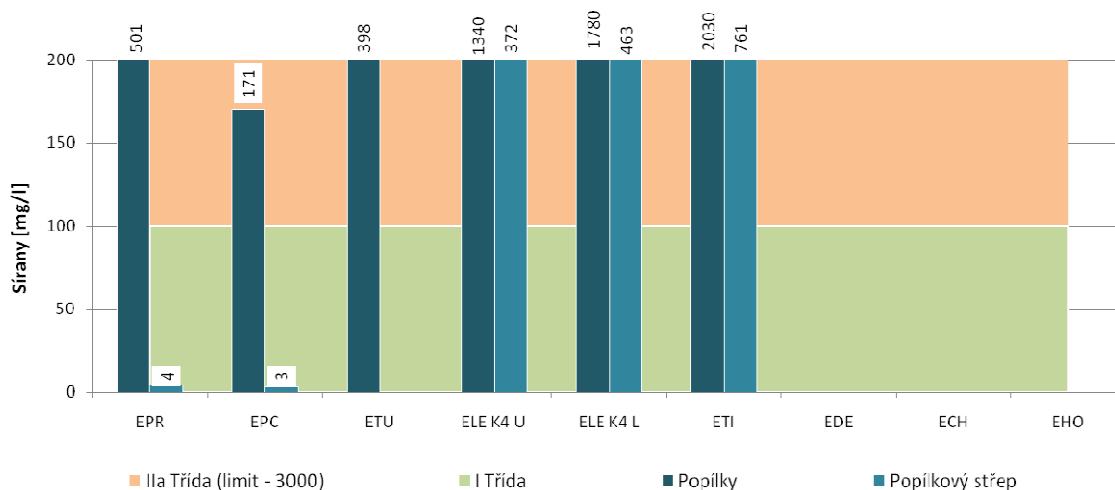
Tab. č. 17: Vyluhovatelnost škodlivin popílků a popílkového střepu

Vzorek	Rozpuštěné látky	Chloridy	Síraný	Arsen	Kadmium	Chrom	Nikl	Olovo
Jednotka	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
vyhl. č. 294/2005 Sb.	400 (8000)	80 (1500)	100 (3000)	0,05 (2,5)	0,004 (0,5)	0,05 (7,0)	0,04 (4,0)	0,05 (5,0)
EPR popílek	794	2,1	501	< 0,001	0,016	< 0,03	0,227	< 0,05
EPR pop. střep	8	1,4	4	0,134	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
EPC popílek	264	5,6	171	< 0,001	< 0,005	< 0,03	0,041	< 0,05
EPC pop. střep	20	1,1	3	0,024	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
ETU popílek	268	< 1	398	< 0,0046	0,00076	< 0,03	0,082	< 0,001
ETU pop. střep	24	< 1	2	< 0,01	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
ELE K4 U popílek	3420	3	1340	0,002	0,00041	0,107	< 0,02	0,0017
ELE K4 U pop. střep	542	< 1	372	< 0,01	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
ELE K4 L popílek	5570	21,5	1780	< 0,001	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
ELE K4 L pop. střep	1890	9,5	463	< 0,01	< 0,005	0,067	< 0,02	< 0,05
ETI popílek	4530	8,2	2030	0,0022	0,00036	0,075	< 0,02	0,0024
ETI pop. střep	1220	4,6	761	< 0,01	< 0,005	0,062	< 0,02	< 0,05
EDE popílek	176	1,2	124	< 0,005	< 0,004	< 0,04	< 0,04	< 0,04
EDE pop. střep	12	< 1	6	< 0,005	< 0,004	< 0,04	< 0,04	< 0,004
ELE K3 popílek	234	1,5	134	< 0,005	< 0,0002	< 0,04	< 0,04	< 0,004
ELE K3 pop. střep	16	< 1	4	< 0,005	< 0,0002	< 0,04	< 0,04	< 0,04

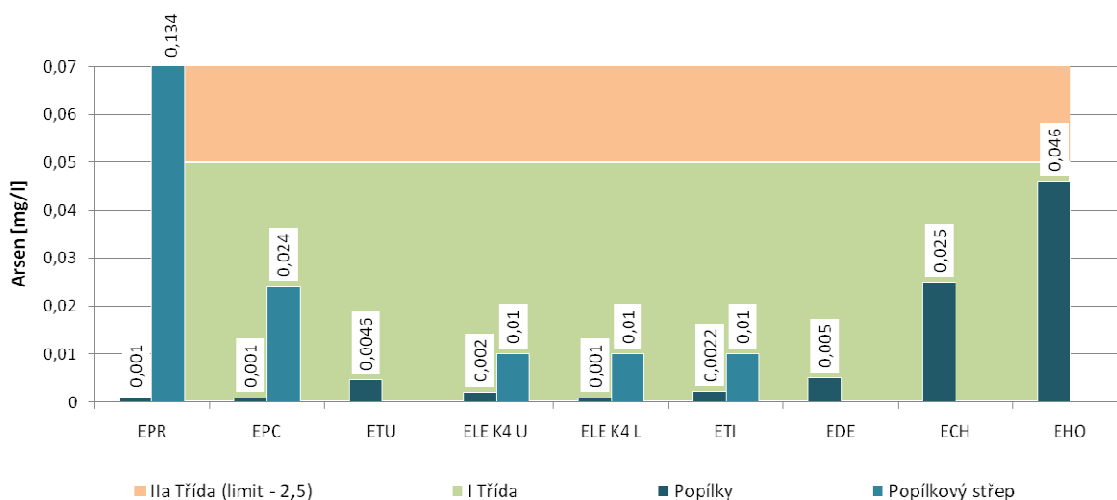
Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že většina vzorků nesplňuje požadavky pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti dle přílohy č. 2 vyhlášky č. 294/2005 Sb a to hlavně z důvodu vysoké vyluhovatelnosti síranů. Nejlepších výsledků dosáhl popílkový střep vyrobený z popílku z elektrárny Počerady, který jako jediný popílkový střep ze zkoušených vzorků splňuje veškeré parametry pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Dobrých výsledků dosáhl také střep vyrobený z popílku z elektrárny Prunéřov, který měl pouze jeden parametr vyšší, než požaduje vyhláška pro první třídu. Nejvíce nevhodných hodnot pro první třídu bylo naměřeno u střepů vyrobených z popílků z elektráren Ledvice a Tisová.

2.1.2.2. Grafické porovnání vlastností popílků a popílkového střepe

V následujících grafických přehledech je znázorněno porovnání hlavních nevyhovujících parametrů pro zařazení popílkového střepe do první třídy vyluhovatelnosti.



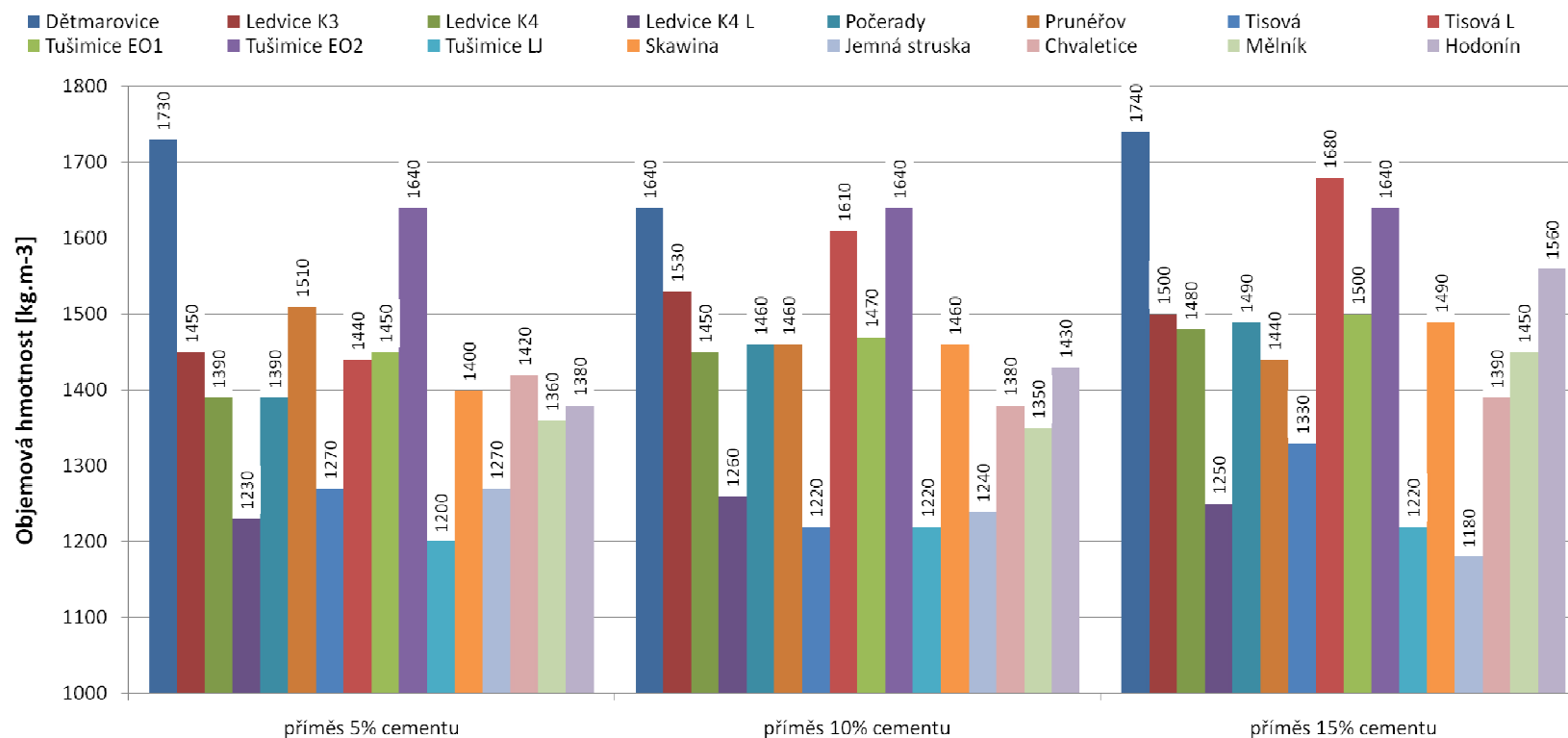
Graf č. 10: Rozdíl vyluhovatelnosti síranů mezi popílký a popílkovým střepe



Graf č. 11: Rozdíl vyluhovatelnosti arsenu mezi popílký a popílkovým střepe

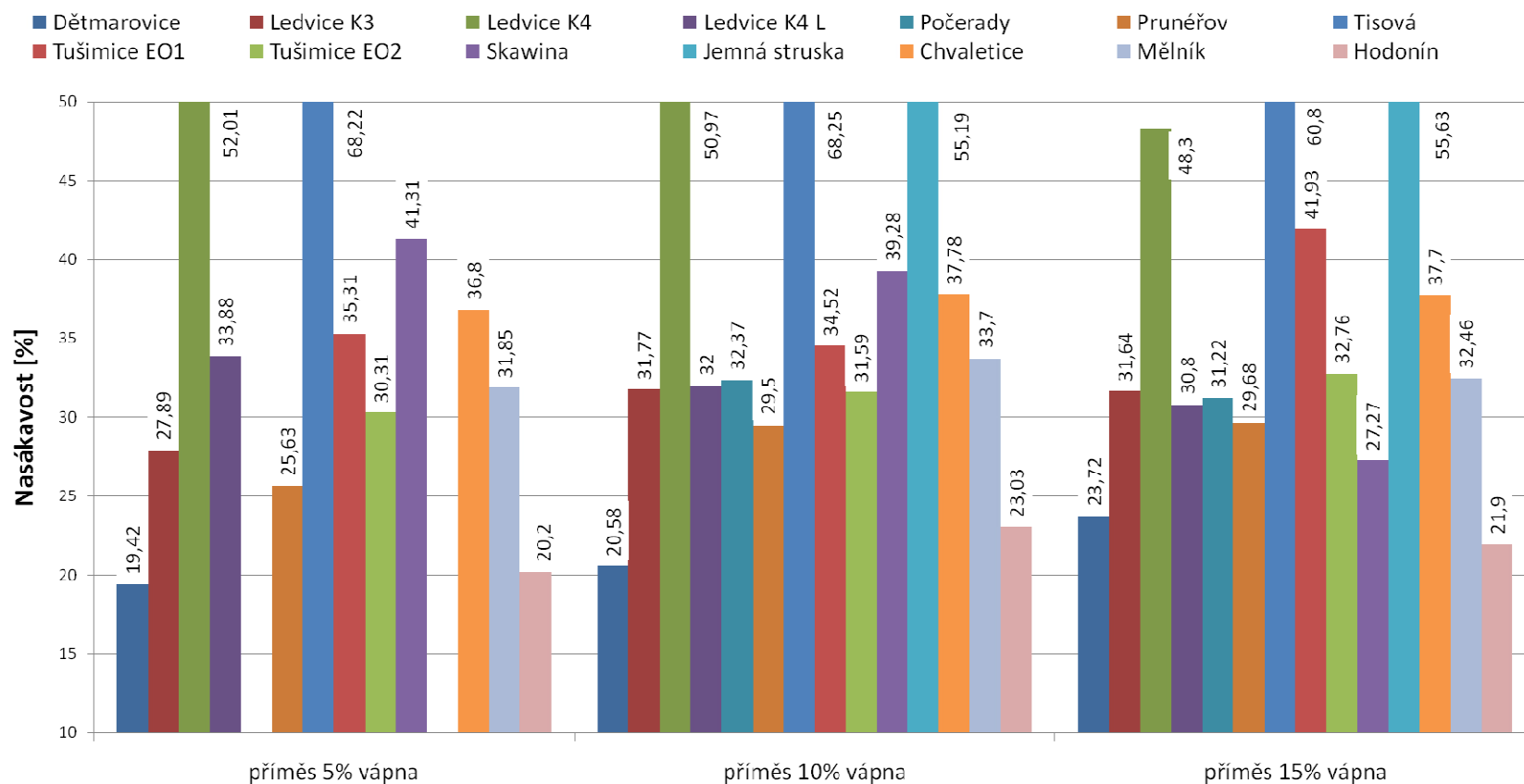
2.2. Kamenivo vytvrzované za studena

V této fázi práce bude ověřen vliv příměsí vápna a cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R na fyzikálně-mechanické vlastnosti popílkového kameniva vytvrzovaného za studena. Pro výrobu zkušebních vzorků z různých druhů tuzemských popílků bylo použito množství 5, 10 a 15 % cementu. V případě vápna se jednalo o stejné množství příměsí. Takto vyrobené vzorky se po odformování uložily do vlhkého prostředí, kde byly ponechány po dobu 7 a 28 dní. Po vyjmutí vzorků z vlhkého prostředí byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v prostém tlaku a nasákavost. Výsledky těchto zkoušek jsou znázorněny v následujícím grafickém zobrazení.



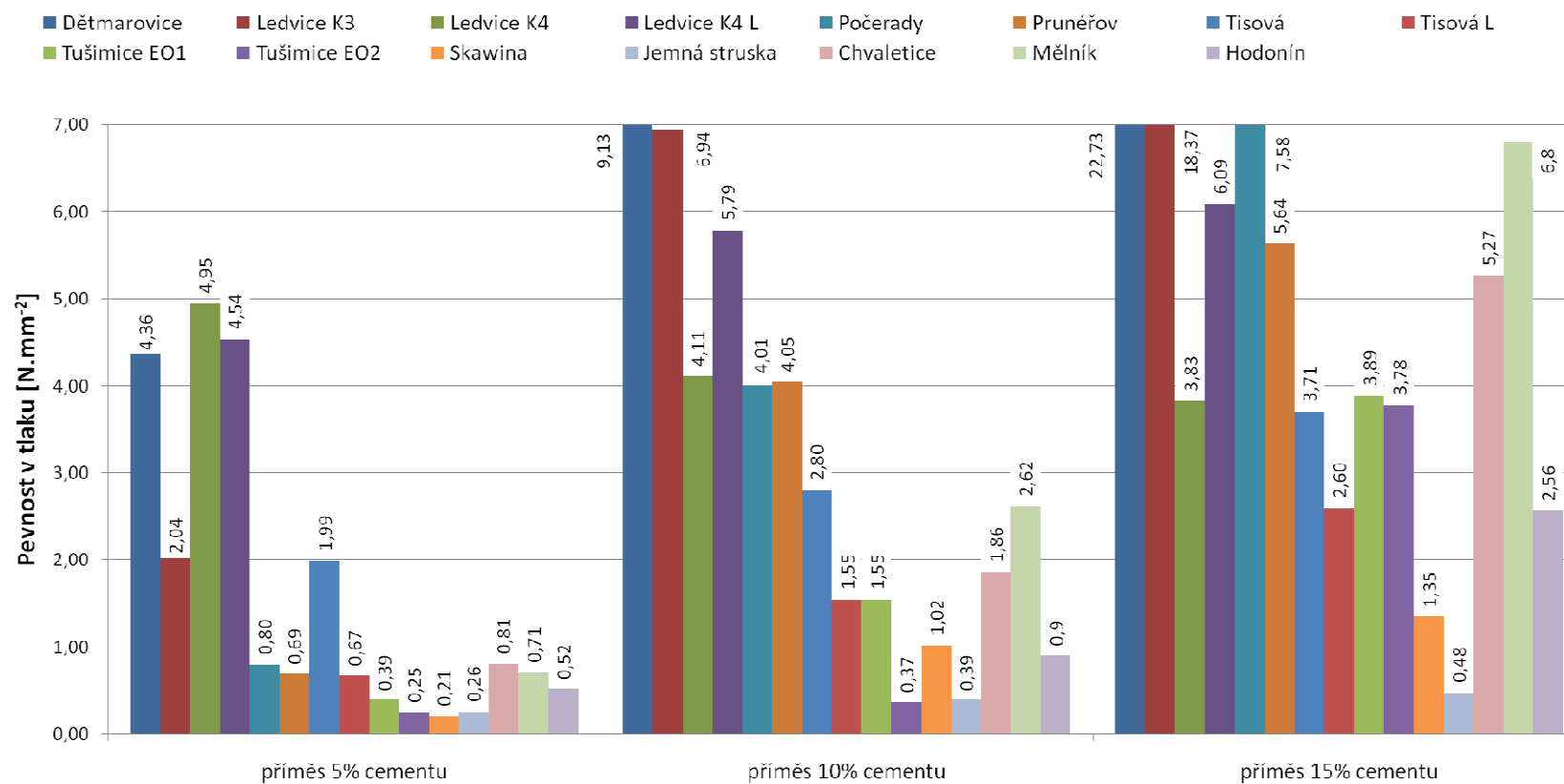
Graf č. 12: Objemová hmotnost popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí cementu po 28 dnech

Z grafu je zřejmé, že vyšších objemových hmotností dosahují vysokoteplotní popílků, zatímco popílků z fluidního způsobu spalování vykazují nižší hodnoty. Nejvyšších hodnot pak dosahují kvalitní popílků z elektrárny Dětmovice a popílků z Tušimic.

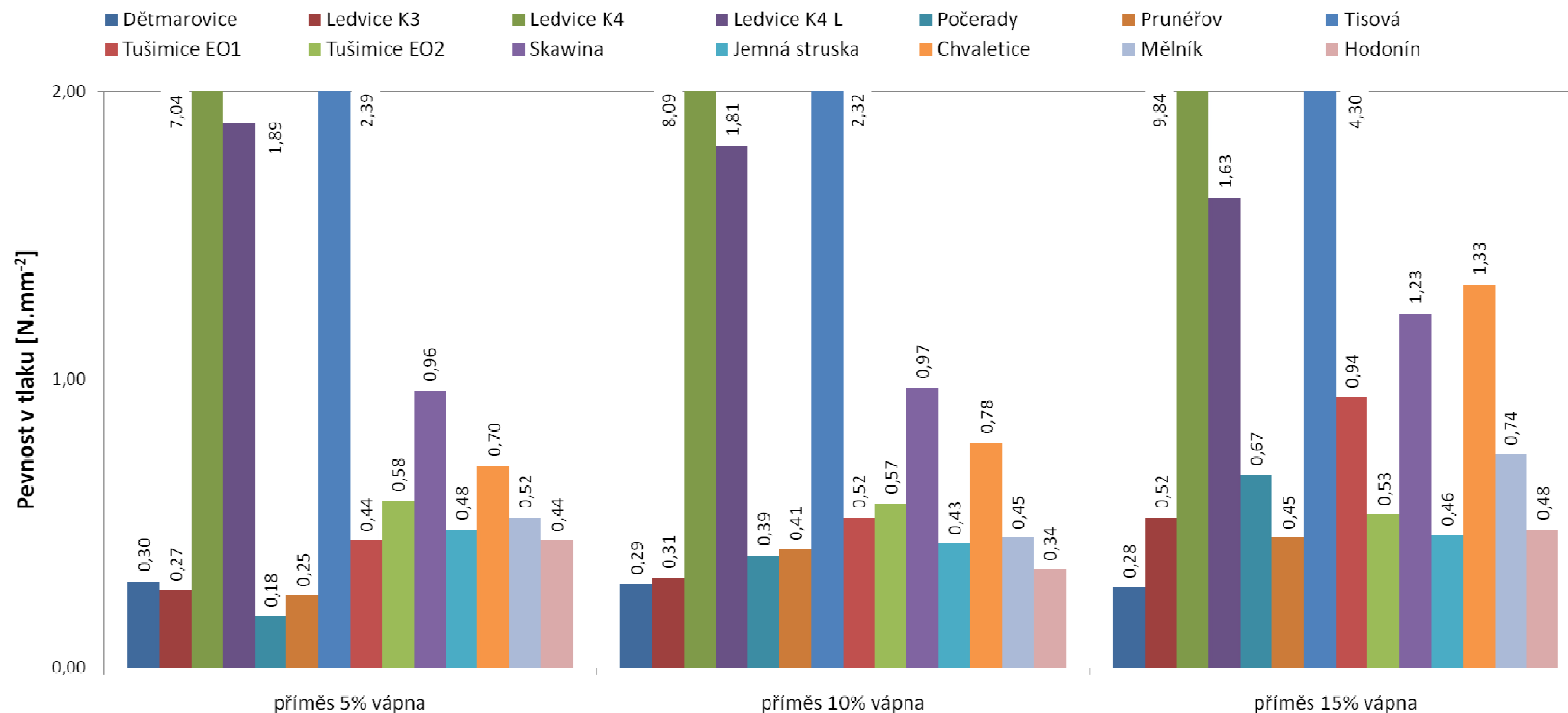


Graf č. 13: Nasákavost popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí vápna po 28 dnech

Z grafického přehledu je patrné, že vyšší nasákavost mají vzorky vyrobené z fluidních popílků, protože z důvodu neuspořádané ("načechrané") struktury a vyššího obsahu volného vápna vyžadují pro dosažení stejné konzistence pasty výrazně vyšší množství vody než popílků klasické s pravidelnou strukturou s vysokým podílem skelné fáze. U některých vzorků došlo při zkoušce nasákavosti k jejich rozpadu, proto hodnoty chybí.



Graf č. 14: Pevnost v tlaku popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí cementu po 28 dnech



Graf č. 15: Pevnost v tlaku popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí vápna po 28 dnech

Z grafů č. 14 a 15 vyplívá, že v případě vápna jako příměsí nejvyšších pevností dosahují vzorky vyrobené z popílků z fluidního způsobu spalování a to zejména z popílku z elektrárny Ledvice. Co se týká příměsí cementu, zde už tolik fluidní popílků nedominují, ale i přes to dosahují více než průměrných pevností v porovnání s ostatními vysokoteplotními popílků.

2.3. Shrnutí vlastností popílkového kameniva vyrobeného v laboratorních podmínkách

2.3.1. Spékané popílkové kamenivo

Lze předpokládat, že kvalitního popílkového střeptu bude získáno s využitím popílků z elektráren Dětmarovice a Ledvice. V případě použití popílků z fluidního způsobu spalování, bude kvalitnějšího popílkového střeptu dosaženo při použití úletových popílků. Vzhledem však k neuspořádané struktuře těchto popílků s minimálním množstvím amorfni fáze se nepředpokládá získání kameniva srovnatelné kvality jako v případě využití popílků klasických.

2.3.2. Kamenivo vytvrzované za studena

Objemové hmotnosti mezi 7 a 28 dnů se u kameniva vytvrzovaného za studena liší minimálně, stejně tomu je i v porovnání příměsí cementu a vápna. Při porovnání nasákavosti zkušebních vzorků s příměsí vápna a cementu lze konstatovat, že vzorky s vápnem mají tento parametr vyšší. Mezi obdobími 7 a 28 dnů dochází k nepatrnému nárůstu nasákavosti. Pevnost popílkových zkušebních vzorků se v případě vysokoteplotních popílků s přídavkem cementu rapidně zvyšuje, u popílků fluidních zůstává s navyšováním množství příměsí téměř konstantní. V časovém porovnání nárůstu pevnosti dochází u příměsí vápna pouze k minimálnímu nárůstu, u cementu je ovšem nárůst markantnější.

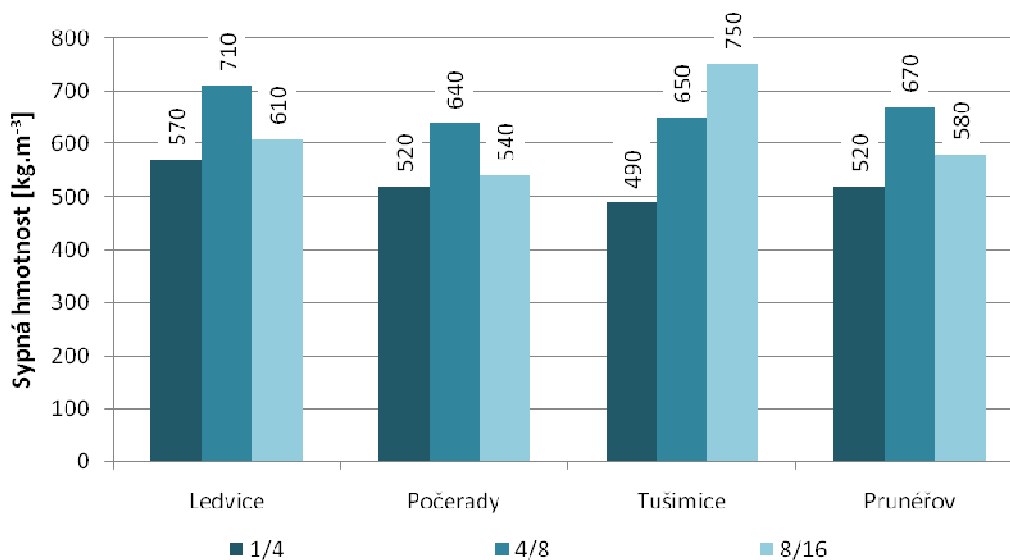
Ve většině případů zvyšování množství příměsí nemělo na výsledné parametry zkušebních vzorků příliš velký vliv, spíše naopak v některých případech docházelo k mírnému snížení zkoušených vlastností a to hlavně v oblasti objemové hmotnosti a nasákavosti. Jak již bylo zmiňováno, nejvhodnějšími popílkami pro výrobu spékaného kameniva studenou cestou jsou popílků fluidní a to hlavně díky jejich zvýšenému obsahu volného CaO , které se po smísení popílků s vodou výrazně podílí na vzniku hydratačních produktů, kterými jsou ettringit $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ a sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

3. Etapa III. - Ověření výroby popílkového kameniva v technologických podmínkách

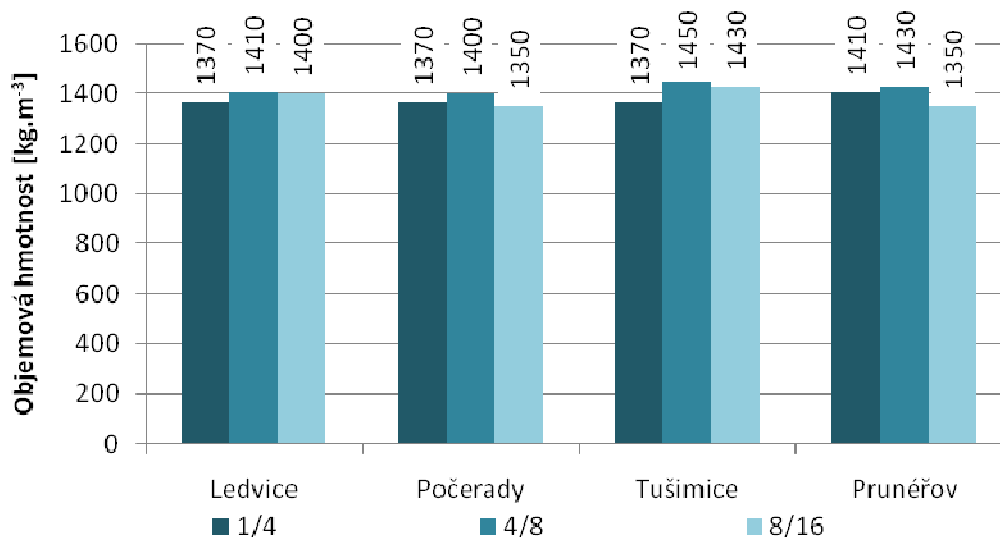
Tato etapa práce se zabývá výrobou umělého popílkového kameniva z vybraných tuzemských energetických zdrojů v technologických podmínkách. Bylo řešeno kamenivo spékané i kamenivo vyrobené za studena.

3.1. Spékané umělé kamenivo

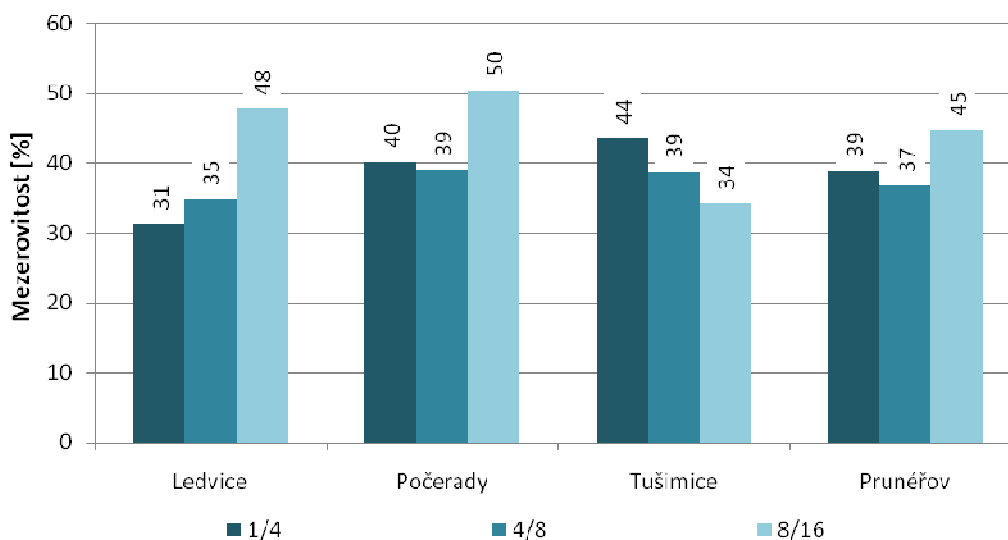
Pro výrobu spékaného popílkového kameniva byly nejprve z popílků vyrobeny sbalky pomocí granulačních válců. Připravené sbalky byly dále vypalovány v horizontální peci s výškou vsázky 40 cm. Jako korekční palivo byla použita uhelná moučka. Obsah spalitelných látek ve vsázce byl 8 % a jako podsyp byl použit Agloporit ve výšce 7 cm. Na takto vyrobeném kamenivu byly testovány jeho základní vlastnosti. Hlavním zkoušeným parametrem byla odolnost kameniva proti drcení, dále byla zjišťována objemová a sypná hmotnost, nasákavost a mezerovitost. V následujících grafických přehledech jsou uvedeny výsledky těchto zkoušek.



Graf č. 16: Sypná hmotnost spékaného kameniva volně sypaná

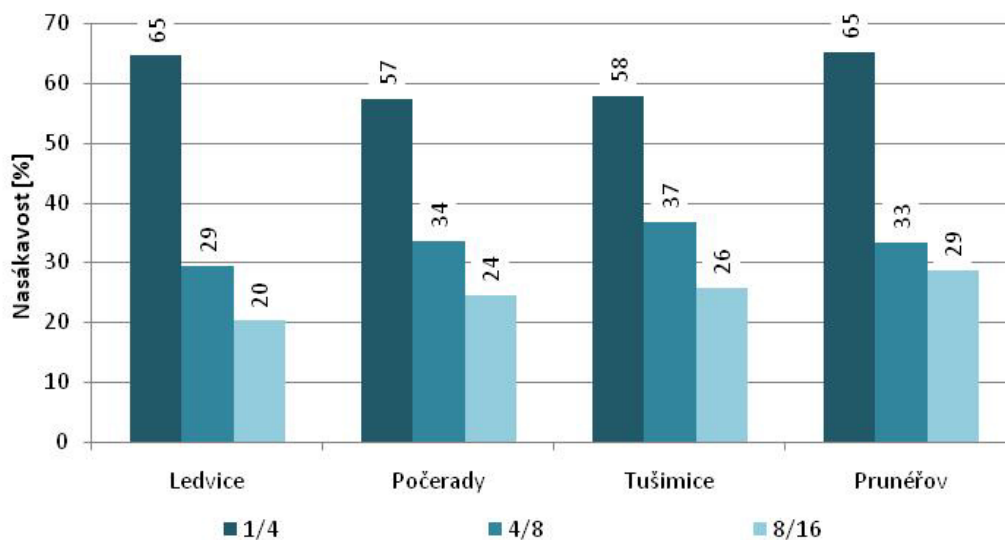


Graf č. 17: Objemová hmotnost spékaného kameniva



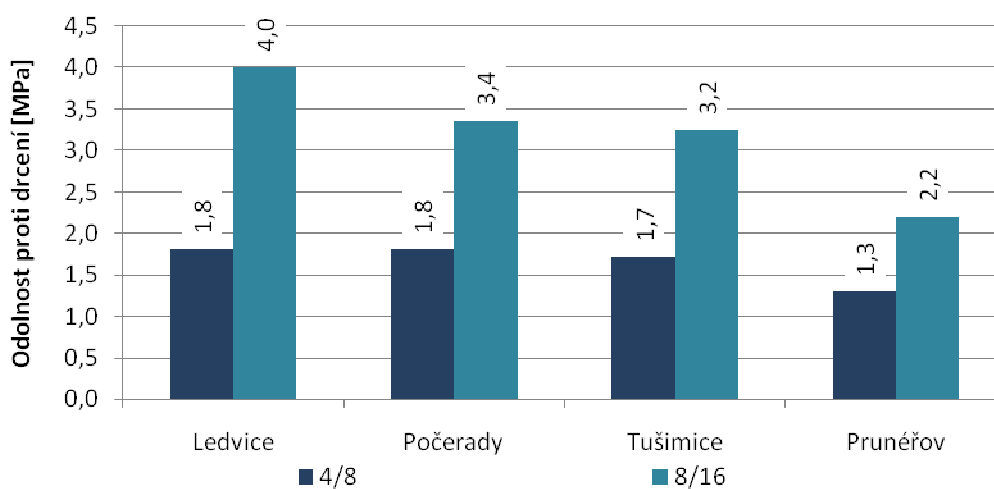
Graf č. 18: Mezerovitost spékaného kameniva

Z grafu je zřejmé, že nejvyšších hodnot mezerovitosti dosahuje ve většině případů kamenivo frakce 8/16. Pouze u kameniva z popílků z elektrárny Tušimice byla nejvyšší hodnota naměřena u frakce 1/4. V případě kameniv vyrobených z popílků z Počerad a Pruněřova lze pozorovat jejich podobnost, kde nejnižších hodnot dosahují kameniva frakce 4/8, následované frakcí 1/4 a 8/16.



Graf č. 19: Nasákavost spékaného kameniva

Z grafických přehledů vyplývá, že mezi vlastnostmi zkoušených kameniv nejsou výrazné rozdíly, protože kameniva jsou vyrobena z vysokoteplotních popílků obdobných fyzikálně mechanických vlastností.

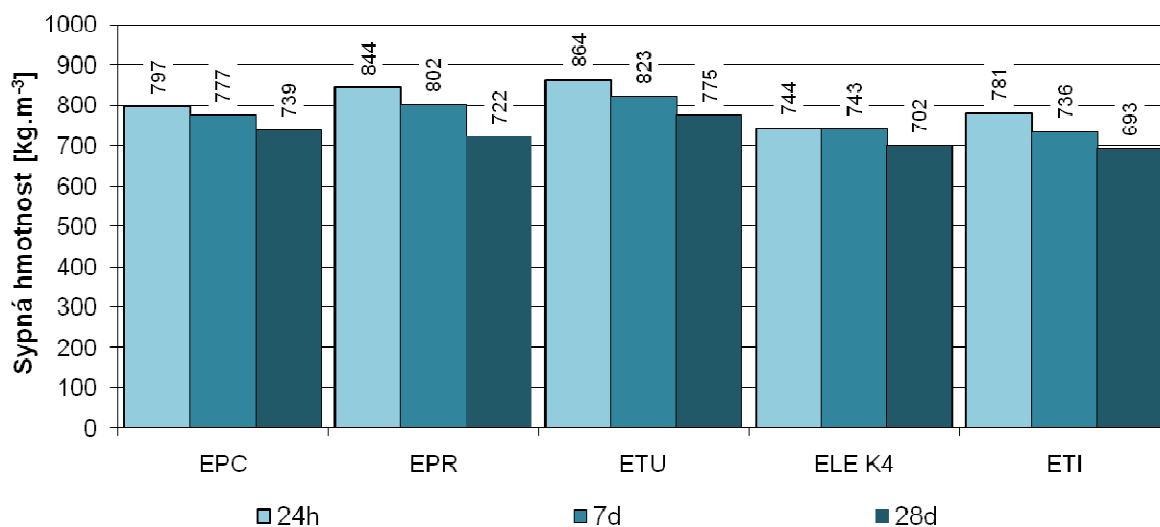


Graf č. 20: Odolnost spékaného kameniva proti drcení

Z grafu je zřejmé, že nejkvalitnější kamenivo v ohledu na pevnost bylo vyrobeno z popílku z elektrárny Ledvice. Nejnížší odolnosti proti drcení naopak dosahovalo kamenivo z popílku z elektrárny Prunéřov z důvodu vyššího obsahu železa v popílku, které způsobuje nadýmání a oslabuje tak výslednou pevnost kameniva.

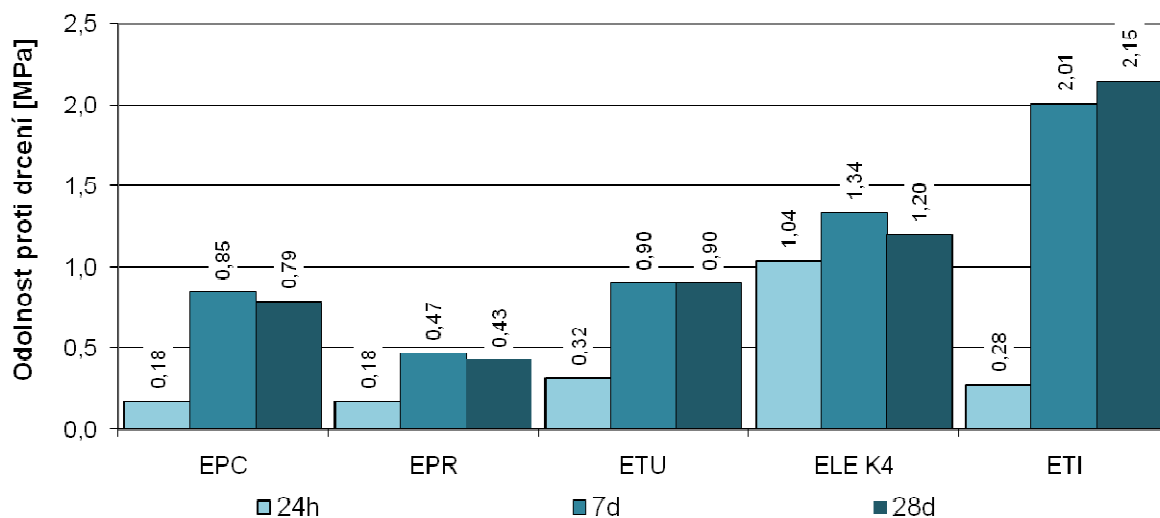
3.2. Kamenivo vytvrzované za studena

Pro výrobu kameniva vytvrzovaného za studena byly vybrány popílký z elektráren Počerady, Prunéřov, Tušimice, Ledvice a Tisová. K popílkům byla přidána příměs 10 % cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R a z této směsi byly posléze vyrobeny sbalky v granulačních válcích. Po vytvoření sbalků bylo kamenivo uloženo do vlhkého prostředí na 28 dní. Po uplynutí této doby byly na kamenivu prováděny zkoušky jeho základních vlastností. Hlavním zkoušeným parametrem byla odolnost kameniva proti drcení, před kterou bylo kamenivo vysušeno při teplotě 50 °C do ustálení hmotnosti. Dále byla zjišťována sypná hmotnost, nasákavost a vlhkost kameniva. V následujících grafických přehledech jsou uvedeny výsledky těchto zkoušek.



Graf č. 21: Sypná hmotnost kameniva vytvrzovaného za studena volně sypaná o frakci 8/16

Z grafického přehledu vyplývá, že dochází k mírnému snižování sypné hmotnosti kameniva s časem. Žádné z uvedených kameniv se hodnotou sypné hmotnosti výrazně nevychyluje od ostatních zkoušených popílkových kameniv.



Graf č. 22: Odolnost proti drcení kameniva vytvrzovaného za studena o frakci 8/16

Z grafu vyplývá, že nejlepší odolnosti proti drcení dosahují kameniva vyrobená z fluidních popílků z elektráren Tisová a Ledvice. V případě kameniva z popílku z Tisové došlo k nejvýraznějšímu zvýšení odolnosti proti drcení v časovém horizontu mezi 24 hodinami a 7 dny.

3.3. Environmentální parametry výroby a využití umělého kameniva

Environmentální parametry popílkového střeptu byly posuzovány podle příloh 2 a 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb., které jsou uvedeny v metodice diplomové práce.

3.3.1. Vyluhovatelnost škodlivin

Na spékaném kamenivu a kamenivu vyrobeném za studena z vybraných popílků z různých tuzemských zdrojů byla provedena zkouška vyluhovatelnosti škodlivin. Naměřené hodnoty jsou uspořádány v následujících tabulkách, kde zeleně jsou vyznačeny výsledky, které splňují zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Oranžová barva značí ostatní hodnoty, které všechny bezpečně splňují požadavky pro zařazení do IIa skupiny vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. Hodnoty, v následujících tabulkách, uvedené pod jednotkami označují limit pro I třídu vyluhovatelnosti, v závorkách pod nimi jsou pak uváděny hodnoty udávající omezení pro IIa třídu.

Tab. č. 18: Vyluhovatelnost škodlivin kameniva vyrobeného za studena

Vzorek	Rozpuštěné látky	Chloridy	Sírany	Arsen	Kadmium	Chrom	Nikl	Olovo
Jednotka	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
vyhl. č. 294/2005 Sb.	400 (8000)	80 (1500)	100 (3000)	0,05 (2,5)	0,004 (0,5)	0,05 (7,0)	0,04 (4,0)	0,05 (5,0)
Kamenivo za studena								
EPR (10 % CEM) LAB	82	1,4	16	0,0199	< 0,005	0,03	< 0,02	< 0,05
EPR (10% CEM) TECH	264	3,3	63	0,042	0,0013	0,064	< 0,02	< 0,001
EPC (10 % CEM) LAB	88	1,4	12	0,01	< 0,005	0,03	< 0,02	< 0,05
EPC (10% CEM) TECH	28	2	35	0,015	0,00014	0,04	< 0,02	< 0,001
ELE K4 (10 % CEM) LAB	98	2,1	35	0,01	< 0,005	0,03	< 0,02	< 0,05
ELE K4 (10% CEM) TECH	684	2,1	29	0,0015	< 0,0001	0,03	< 0,02	< 0,001
ETI (10 % CEM) LAB	176	1,8	24	0,01	< 0,005	0,05	< 0,02	< 0,001
ETI (10% CEM) TECH	382	3,8	98	0,003	< 0,0001	0,105	< 0,02	< 0,001
ETU (10 % CEM) LAB	142	2,2	37	0,01	< 0,0001	0,04	< 0,02	< 0,001
ETU (10% CEM) TECH	236	3,2	42	0,018	< 0,0001	0,081	< 0,02	< 0,001

Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že kamenivo vyrobené za studena v laboratorních podmínkách z vybraných popílků splňuje požadavky pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti dle přílohy č. 2 vyhlášky č. 294/2005 Sb. Jako nadlimitní parametr, při použití 10% příměsí cementu, se jeví vyluhovatelnost chromu, která byla prokázána ve většině případů.

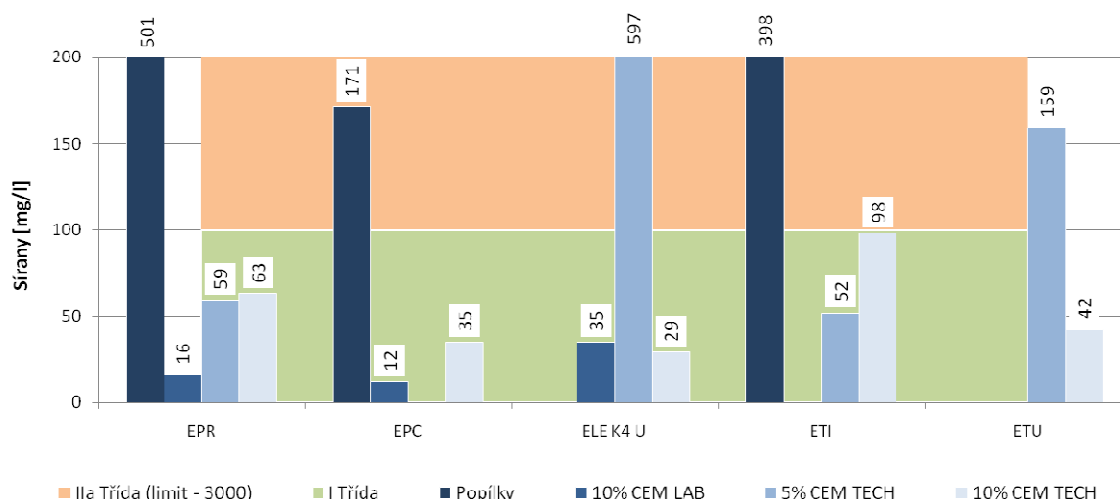
Tab. č. 19: Vyluhovatelnost škodlivin spékaného kameniva

Vzorek	Rozpuštěné látky	Chloridy	Síraný	Arsen	Kadmium	Chrom	Nikl	Olovo
Jednotka	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
vyhl. č. 294/2005 Sb.	400 (8000)	80 (1500)	100 (3000)	0,05 (2,5)	0,004 (0,5)	0,05 (7,0)	0,04 (4,0)	0,05 (5,0)
Kamenivo spékané								
EPR LAB	8	1,4	4	0,134	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
EPR + uhlí	114	< 1	68	0,331	0,00013	< 0,03	< 0,02	< 0,001
EPC LAB	20	1,1	3	0,024	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
EPC + uhlí	58	< 1	34	0,047	< 0,0001	< 0,03	< 0,02	< 0,001
ELE K3 LAB	16	< 1	4	< 0,005	< 0,0002	< 0,04	< 0,04	< 0,04
ELE K3 + uhlí	378	< 1	151	0,214	0,00019	< 0,03	< 0,02	< 0,001
ETU LAB	24	< 1	2	< 0,01	< 0,005	< 0,03	< 0,02	< 0,05
ETU + uhlí	158	< 1	61	0,263	0,00012	< 0,03	< 0,02	< 0,001

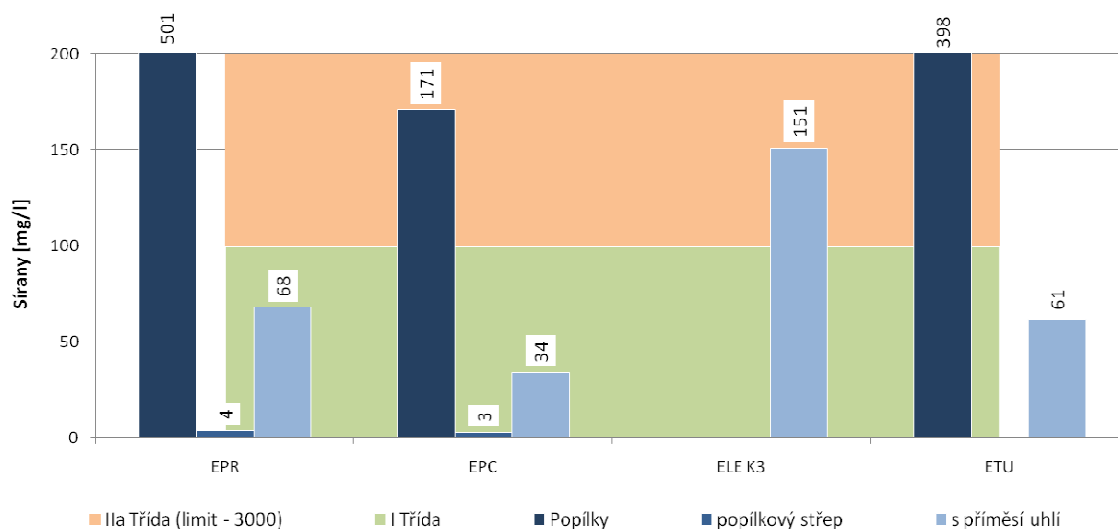
Spékané kamenivo vyrobené z vybraných popílků nesplňuje ve většině případů požadavky pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti dle přílohy č. 2 vyhlášky č. 294/2005 Sb. a to hlavně z důvodu vysoké vyluhovatelnosti arsenu, která byla prokázána u většiny zkoušených vzorků. Dále byla u téměř poloviny zkoušených vzorků prokázána nadlimitní vyluhovatelnost síranů. Nejlepších výsledků dosáhlo kamenivo vyrobené z popílku z elektrárny Počerady (bez příměsí i s příměsí uhlí), které jako jediné ze zkoušených vzorků splňuje všechny požadavky pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Nejvíce nevhodných hodnot pro první třídu bylo naměřeno u popílku z elektrárny Ledvice.

3.3.2. Grafické porovnání vlastností popílků, popílkového střepu a kameniva vyrobeného z popílků

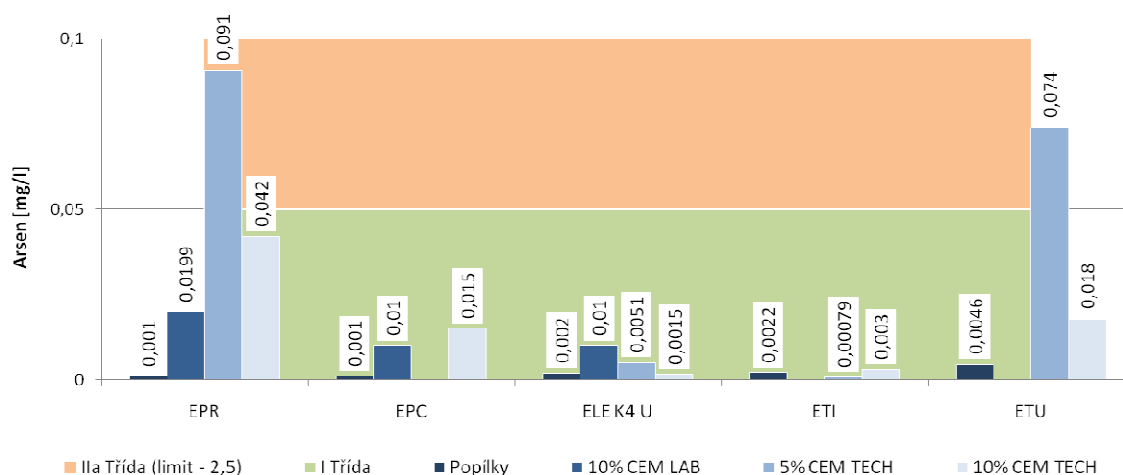
V následujících grafických přehledech je znázorněno porovnání hlavních nevyhovujících parametrů pro zařazení popílkového kameniva do první třídy vyluhovatelnosti.



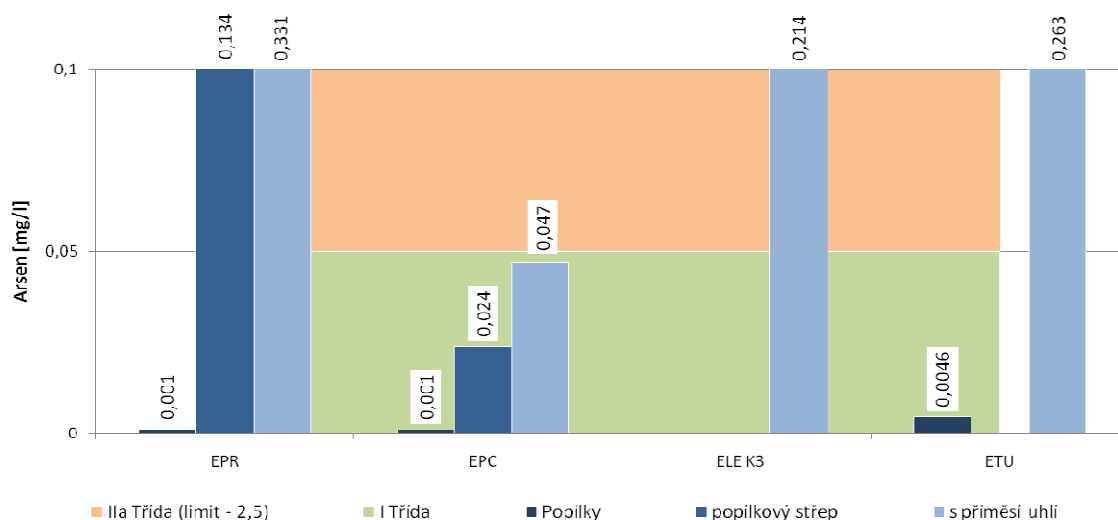
Graf č. 23: Rozdíl vyluhovatelnosti síranů mezi popílký, laboratorními vzorky a popílkovým kamenivem vyrobeným za studena



Graf č. 24: Rozdíl vyluhovatelnosti síranů mezi popílky, popílkovým střepe a popílkovým spékáním kamenivem



Graf č. 25: Rozdíl vyluhovatelnosti arsenu mezi popílky, laboratorními vzorky a popílkovým kamenivem vyrobeným za studena



Graf č. 26: Rozdíl vyluhovatelnosti arsenu mezi popílky, popílkovým střepe a popílkovým spékáním kamenivem

3.3.3. Ekotoxicita

Z ekotoxikologických zkoušek byly na spékaném kamenivu a kamenivu vyrobeném za studena z vybraných popílků provedeny zkoušky stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby, zkouška akutní toxicity, test inhibice růstu sladkovodní řasy a test inhibice růstu kořene hořčice bílé. Naměřené hodnoty jsou uspořádány v následujících tabulkách, kde zeleně jsou vyznačeny výsledky, které splňují zařazení do první třídy ekotoxicity. Červená barva značí hodnoty, které požadavky pro zařazení do první třídy ekotoxicity dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. nesplňují.

3.3.3.1. Kamenivo vyrobené za studena

Tab. č. 20: Zkouška inhibice pohyblivosti *Daphnia magna* Straus – Zkouška akutní toxicity

Kamenivo za studena s příměsí 5% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
imobilizace perlooček za 48 hod (ks) / počet perlooček v testu (ks)	0/20	13/60	3/60	42/60	5/60	60/60
mortalita perlooček za 48 hod (%)	0	21,7	5,0	70	8,3	100
Kamenivo za studena s příměsí 10% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
imobilizace perlooček za 48 hod (ks) / počet perlooček v testu (ks)	0/20	2/60	4/60	51/60	27/60	10/60
mortalita perlooček za 48 hod (%)	0	3,3	6,6	85,0	45,0	16,7

Z výsledků ekotoxikologických zkoušek kameniva vyrobeného za studena je zřejmé, že všechna zkoušená kameniva splňují veškeré parametry potřebné pro zařazení do první třídy ekotoxicity dle přílohy č. 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb. Výjimkou byla pouze zkouška akutní toxicity, ve které dosáhli veškeré zkoušené vzorky nadlimitních hodnot pro zařazení do první třídy.

3.3.3.2. Spékané kamenivo

Tab. č. 21: Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby (*Poecilia reticulata*)

Spékané kamenivo + uhlí					
Vzorek	Kontrola	EPR + uhlí	EPC + uhlí	ELE K3 + uhlí	ETU + uhlí
vyhl. č. 294/2005 Sb.	0	0	0	0	0
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
mortalita ryb za 96 hod (ks)/ počet ryb v testu (ks)	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
mortalita ryb za 96 hod (%)	0	0	0	0	0
Spékané kamenivo + ArcelorMittal					
Vzorek	Kontrola	EPR + AM	EPC + AM	ELE K3 + AM	ETU + AM
vyhl. č. 294/2005 Sb.	0	0	0	0	0
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
mortalita ryb za 96 hod (ks)/ počet ryb v testu (ks)	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
mortalita ryb za 96 hod (%)	0	0	0	0	0

Při ekotoxikologických zkouškách spékaného kameniva bylo dosaženo obdobných výsledků jako u kameniva vyrobeného za studena, kde všechna zkoušená kameniva splnila veškeré parametry potřebné pro zařazení do první třídy ekotoxicity dle přílohy č. 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb. Výjimkou byla pouze zkouška akutní toxicity u kameniva vyrobeného za studena, ve které dosáhli vzorky kameniva vyrobeného z popílků ELE K4 a ETU nadlimitních hodnot pro zařazení do první třídy.

3.4. Shrnutí vlastností umělého popílkového kameniva vyrobeného v technologických podmínkách

Ze zkoušek spékaného umělého kameniva bylo zjištěno, že nejkvalitnější kamenivo je možné získat při použití popílku z elektrárny Ledvice. Toto kamenivo dosahovalo nejvyšších pevností ze všech zkoušených vzorků. V oblasti objemové hmotnosti a nasákavosti se žádné z kameniv svými vlastnostmi nijak výrazně neodlišovalo od ostatních. Velký vliv na nasákavost kameniva měla jeho frakce, kde kameniva s menší frakcí dosahovali podstatně vyšších hodnot než kameniva o větších frakcích. Nejhorší pevnosti pak vykazovalo kamenivo z popílku z elektrárny Pruněřov.

Pro výrobu umělého kameniva vytvrzovaného za studena jsou podle zjištěných výsledků nejvhodnější popílků z fluidního způsobu spalování. Nejlepších výsledků v odolnosti proti drcení dosáhlo kamenivo vyrobené z popílků z elektráren Tisová a Ledvice. V případě sypané hmotnosti docházelo k jejímu mírnému snižování s časem. Ohledně nasákavosti popílkových kameniv bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot dosahuje kamenivo z popílku z elektrárny Ledvice, nejnižších pak kamenivo z popílku z Počerad.

Hlavními řešenými environmentálními parametry byly vyluhovatelnost škodlivin a ekotoxicita. Byly sestaveny tabulky výsledků zkoušek, které graficky rozlišují vhodnost jednotlivých parametrů pro zařazení do jednotlivých tříd vyluhovatelnosti a ekotoxicity. Mezi nejlepší popílková kameniva, která splňují nejvíce parametrů pro zařazení do prvních tříd jak

vyluhovatelnosti škodlivin, tak ekotoxicity, patří kameniva vyrobené z popílků z elektráren Počerady a Pruněřov. Nejvíce nevhodných hodnot pro první třídu bylo naměřeno u popílku z elektrárny Ledvice.

4. Etapa IV. - Orientační ověření využitelnosti umělého popílkového kameniva v betonech

Tato etapa je zaměřena na základní ověření možnosti aplikace umělého popílkového kameniva vyrobeného spékáním i za studena vytvrzovaného při výrobě lehkých betonů.

Pro tuto část řešení byly použity následující složky:

Tab. č. 22: Výpis složek použitých pro výrobu zkoušených betonů

Složky	Závod
přírodní kamenivo 0 - 4	Pískovna Žabčice
spékané kamenivo ELE 4-8 mm, 8-16 mm	Elektrárna Ledvice
spékané kamenivo EPC 4-8 mm, 8-16 mm	Elektrárna Počerady
spékané kamenivo EPR 4-8 mm, 8-16 mm	Elektrárna Pruněřov
spékané kamenivo ETU 4-8 mm, 8-16 mm	Elektrárna Tušimice
kamenivo vytvrzované za studena ETI + cement 4-8 mm, 8-16 mm	Elektrárna Tisová
kamenivo vytvrzované za studena ETI + vápno 4-8 mm, 8-16 mm	Elektrárna Tisová
cement CEM II/A-S-32,5R	Cementárna Mokrá
cement CEM I-42,5R	Cementárna Mokrá
popílek ELE	Elektrárna Ledvice
popílek EPC	Elektrárna Počerady
popílek EPR	Elektrárna Pruněřov
popílek ETU	Elektrárna Tušimice
Mikrosilika	SIKA
Struska	Kotouč Štramberk
plastifikátor Sika® ViscoCrete®-1035/CZ	SIKA

4.1. Zkoušky lehkých betonů běžných pevnostních tříd s použitím umělého kameniva

Na zkušebních tělesech byly prováděny zkoušky, které ověřují, zda je možné s použitím spékaného a za studena vytvrzovaného popílkového kameniva vyrobit betony požadovaných vlastností.

V laboratorních podmínkách byly vyrobeny série zkušebních těles, tj. krychle o hraně 150 mm, pevnostní třídy LC 20/22 a LC 30/33 podle receptur uvedených v tabulkách č. 22 až 25. Od

každé pevnostní třídy bylo vyrobeno 9 zkušebních těles, na kterých byly následně provedeny stanovení jejich vlastností. Všechny receptury byly míchány tak, aby svoji konzistencí spadali do třídy S1 podle zkoušky sednutím kužele. Také byla zjištěna objemová hmotnost.

Na základě předchozích výzkumů prováděných na ústavu THD Fakulty stavební VUT v Brně [5] a průběžných konzultací byly zvoleny receptury uvedené v následujících tabulkách.

Tab. č. 23: Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Ledvice (suroviny na m³ betonu)

Ledvice			
Základní hmoty	Jednotka	LC 20/22	LC 30/33
cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	kg	385	-
cement CEM I-42,5 R	kg	-	480
voda	kg	123	130
písek 0/4 mm	kg	578	622
spékané kamenivo vlhčené			
- 4/8 mm	kg	235,5	211,5
- 8/16 mm	kg	466,2	420

Tab. č. 24: Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Počeradý (suroviny na m³ betonu)

Počeradý			
Základní hmoty	Jednotka	LC 20/22	LC 30/33
cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	kg	385	-
cement CEM I-42,5 R	kg	-	480
voda	kg	123	130
písek 0/4 mm	kg	578	622
spékané kamenivo vlhčené			
- 4/8 mm	kg	233,8	210
- 8/16 mm	kg	449,55	405

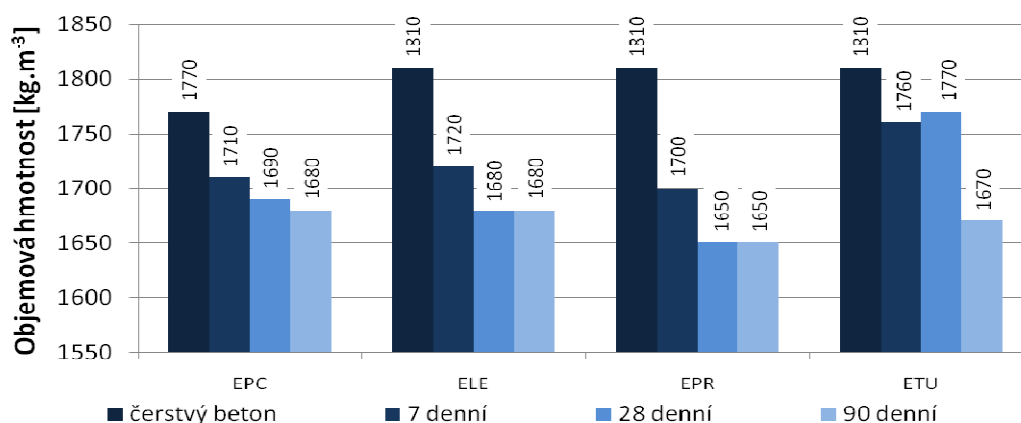
Tab. č. 25: Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Prunéřov (suroviny na m³ betonu)

Prunéřov			
Základní hmoty	Jednotka	LC 20/22	LC 30/33
cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	kg	385	-
cement CEM I-42,5R	kg	-	480
voda	kg	123	130
písek 0/4 mm	kg	578	622
spékané kamenivo vlhčené			
- 4/8 mm	kg	233,8	210
- 8/16 mm	kg	449,55	405

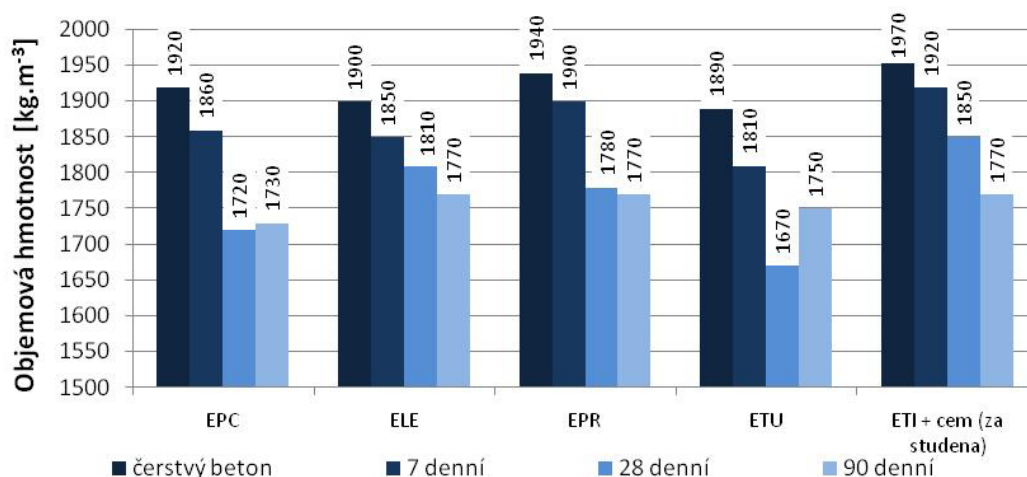
Tab. č. 26: Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Tušimice (suroviny na m³ betonu)

Tušimice			
Základní hmoty	Jednotka	LC 20/22	LC 30/33
cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	kg	385	-
cement CEM I-42,5R	kg	-	480
voda	kg	123	130
písek 0/4 mm	kg	578	622
spékané kamenivo vlhčené			
- 4/8 mm	kg	242,15	217,5
- 8/16 mm	kg	476,19	429

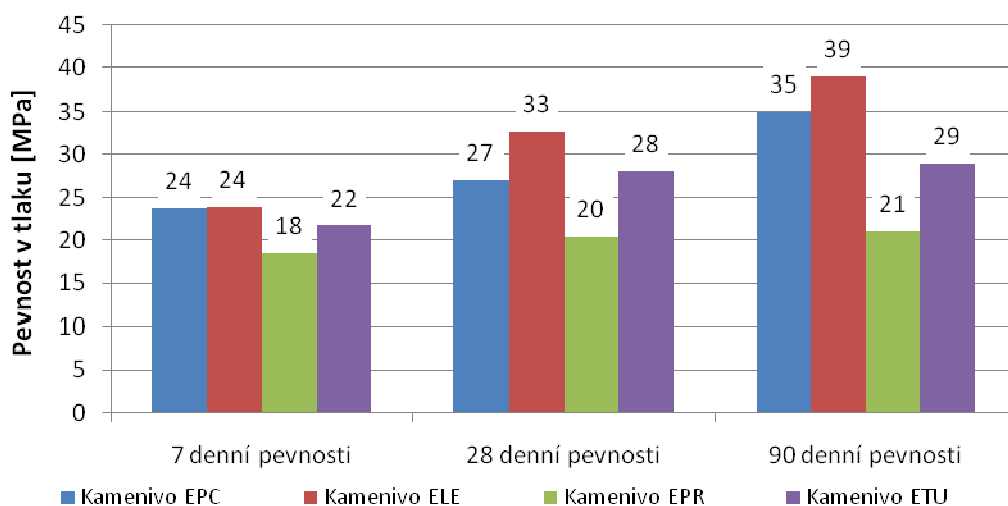
Na zkušebních tělesech se zjišťovala objemová hmotnost a byla provedena zkouška pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech. Před přípravou zkušebních těles (tj. 48 hodin) bylo kamenivo ponecháno ve vodě, přičemž cca 30 minut před zahájením míchání bylo umístěno na perforovanou podložku, aby došlo k úniku přebytečné (volné) vody. Jako hlavní parametr ověřovaných betonů byla zkoušena pevnost v tlaku, jak je znázorněno v následujících grafických přehledech. V grafech je také znázorněna objemová hmotnost betonu.



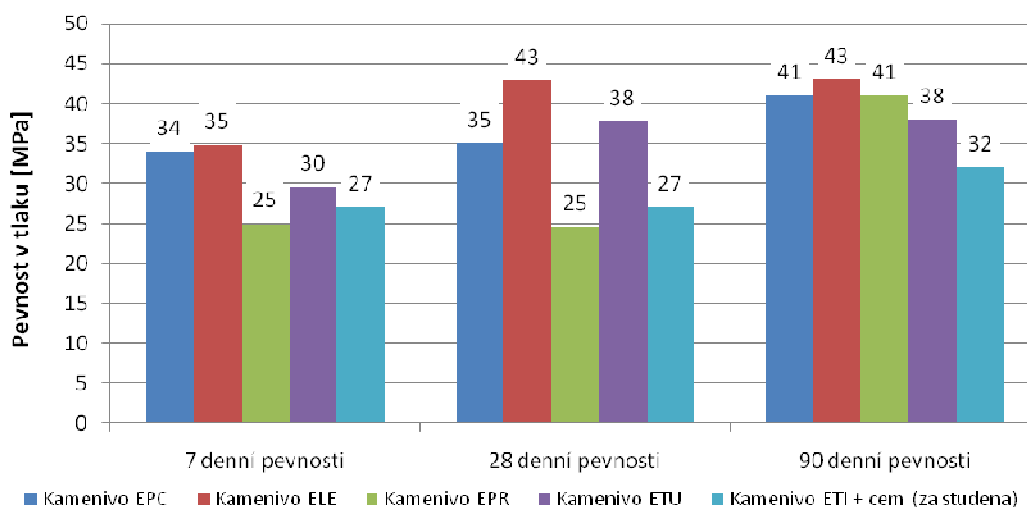
Graf č. 27: Objemová hmotnost lehkých betonů pevnostní třídy LC 20/22 se spékaným popílkovým kamenivem



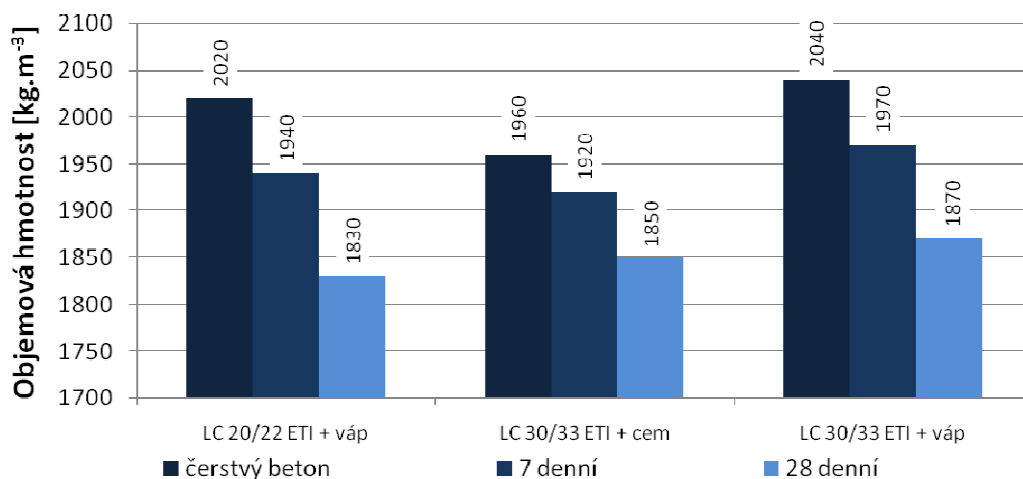
Graf č. 28: Objemová hmotnost lehkých betonů pevnostní třídy LC 30/33 se spékaným popílkovým kamenivem



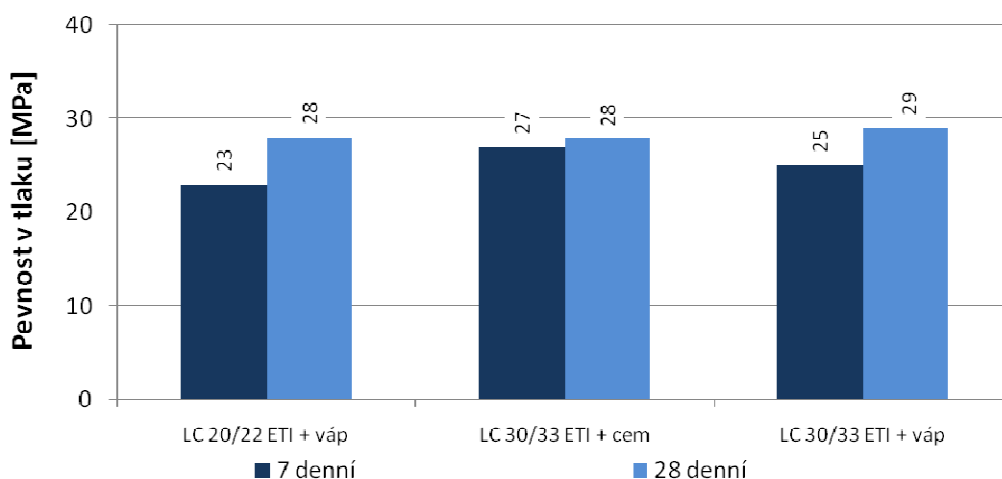
Graf č. 29: Pevnost v tlaku lehkých betonů pevnostní třídy LC 20/22 se spékaným popílkovým kamenivem



Graf č. 30: Pevnost v tlaku lehkých betonů pevnostní třídy LC 30/33 se spékaným popílkovým kamenivem



Graf č. 31: Objemová hmotnost lehkých betonů s popílkovým kamenivem vytvrzovaným za studena



Graf č. 32: Pevnost v tlaku lehkých betonů s popílkovým kamenivem vytvrzovaným za studena

Z grafického porovnání je zřejmé, že nejvyšších pevností, a to jak 7 denních, 28 denních tak i po 90 dnech, dosahují lehké betony s použitím umělého kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Ledvice. Rychlý nárůst pevností po 7 dnech se projevila u betonů s kamenivem EPC a ETU. U lehkých betonů s kamenivem z popílku z elektrárny Prunéřov nedošlo mezi 7 a 28 dnů k nárůstu pevností pravděpodobně z důvodu použití nepříliš kvalitního kameniva.

U betonů pevnostní třídy LC 20/22 byla zjištěna nejvyšší objemová hmotnost při použití kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Tušimice, naopak při použití tohoto kameniva v betonech třídy LC 30/33 dosahovala objemová hmotnost nejnižších hodnot v porovnání s ostatními zkoušenými kamenivy.

V případě lehkých betonů třídy LC 20/22 vyrobených z umělého kameniva vytvrzovaného za studena bylo s příměsí cementu i vápna dosaženo pevností odpovídajících hodnotám potřebným pro zařazení do této třídy dle ČSN EN 206-1.

4.2. Vysokopevnostní lehké betony

Tato etapa je zaměřena na základní ověření možnosti aplikace nového druhu vysokohodnotného kameniva při výrobě vysokopevnostních lehkých betonů. Na zkušebních tělesech byly prováděny zkoušky, které zjišťují, zda je možné s použitím popílkového kameniva vyrobit lehké vysokopevnostní betony.

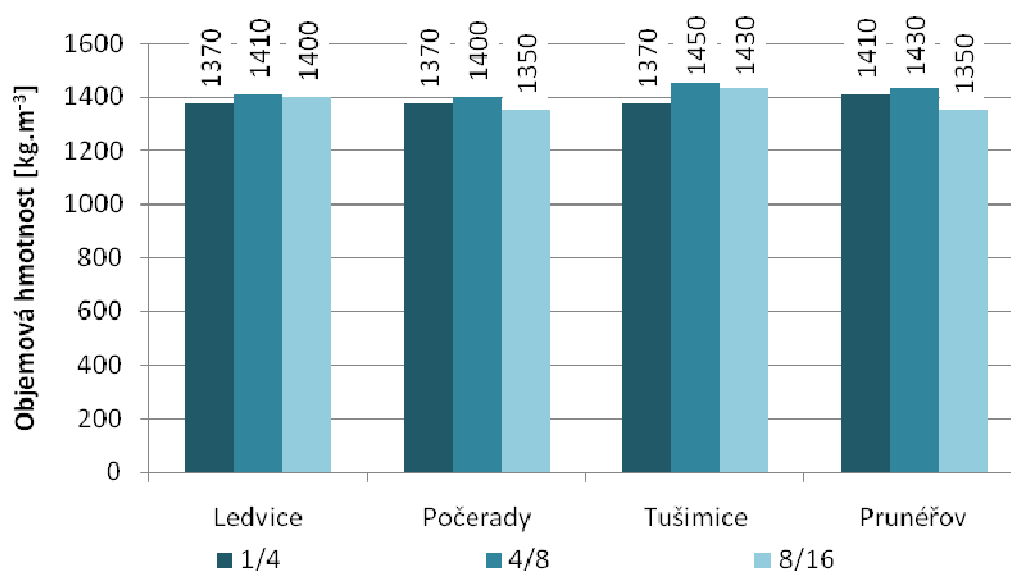
V laboratorních podmínkách byly vyrobeny série zkušebních těles, tj. krychle o hraně 150 mm, s příměsemi popílku, strusky a mikrosiliky podle dvou typů receptur (R1, R2), uvedených v tabulce č. 26. Hlavní rozdíl mezi těmito recepturami je v množství cementu. Ve vzorcích s příměsí popílku byl vždy použit stejný typ popílku, jaký byl použit při výrobě umělého spékaného kamenivo. Na vzorcích byly následně provedeny zkoušky jejich fyzikálně-mechanických vlastností. Na čerstvém betonu byla zjištěna objemová hmotnost.

Na základě předchozích výzkumů prováděných na ústavu THD Fakulty stavební VUT v Brně [5] a průběžných konzultací byly zvoleny receptury uvedené v následujících tabulkách.

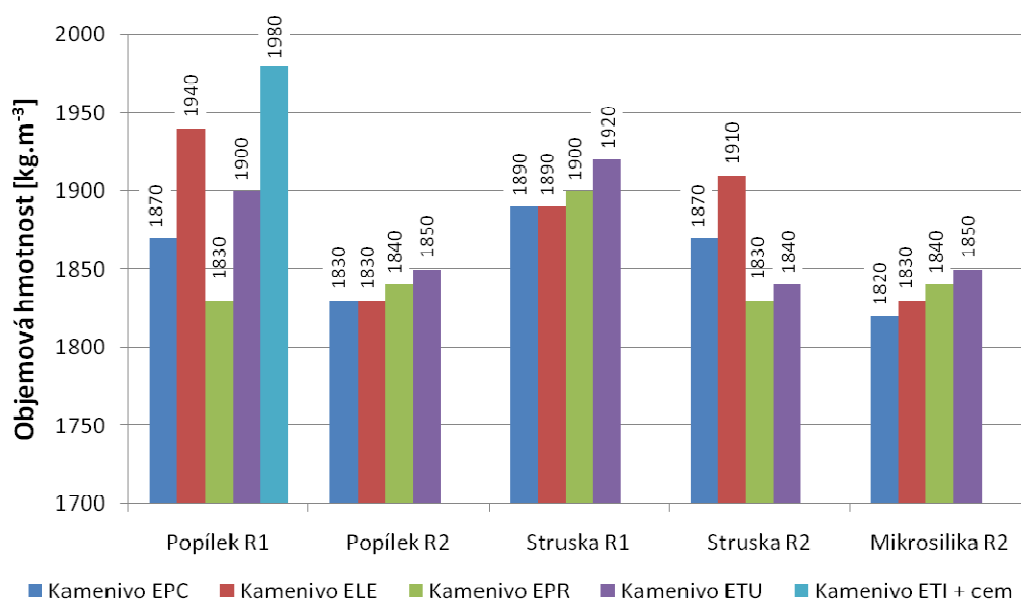
Tab. č. 27: Receptury pro výrobu vysokopevnostních lehkých betonů s použitím umělého popílkového kameniva

Receptury [kg/m ³]			
Základní hmoty	Jednotka	R1	R2
		LC 50/55	LC 50/55
cement CEM I-42,5R	kg	500	450
voda	lit.	125	115
písek 0/4 mm	kg	685	687
agloporit vlhčený			
- 4/8 mm	kg	220	251
- 8/16 mm	kg	338	306
příměs (popílek/struska/mikrosilika)	kg	75	75
plastifikátor Sika® ViscoCrete®-1035 / CZ	kg	4,5	4,5

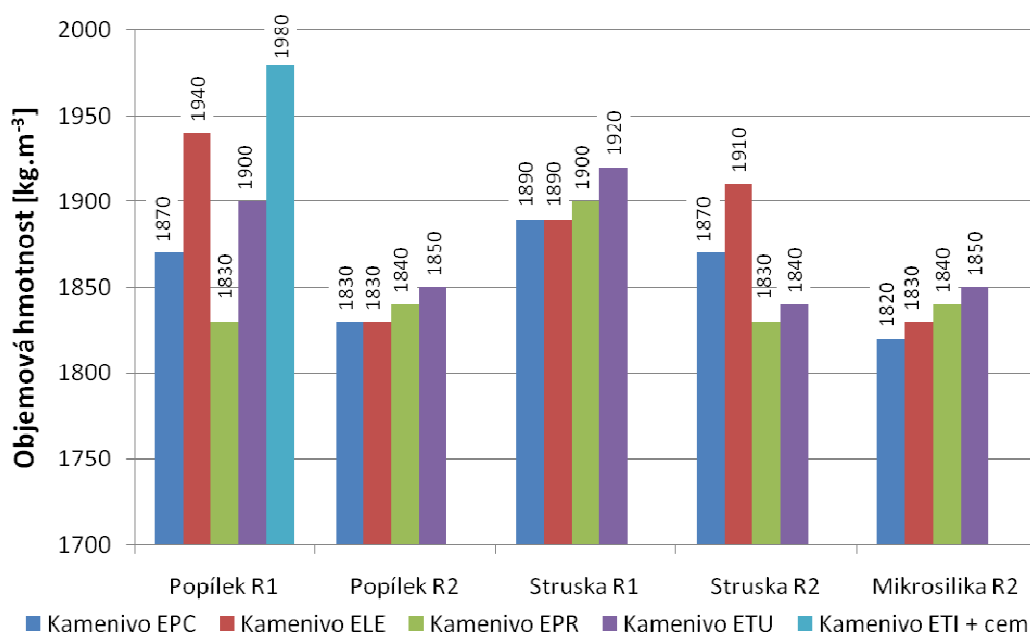
Na zkušebních tělesech se zjišťovala objemová hmotnost a byla provedena zkouška pevnosti v tlaku po 3, 7 a 28 dnech. Před přípravou zkušebních těles (tj. cca 48 hodin) bylo kamenivo ponecháno ve vodě, přičemž cca 30 minut před zahájením míchání bylo umístěno na perforovanou podložku, aby došlo k úniku přebytečné (volné) vody. Jako hlavní parametr ověřovaných betonů byla zkoušena pevnost v tlaku, jak je znázorněno v následujících grafických přehledech. V grafech je také znázorněna objemová hmotnost zatvrdlých betonů.



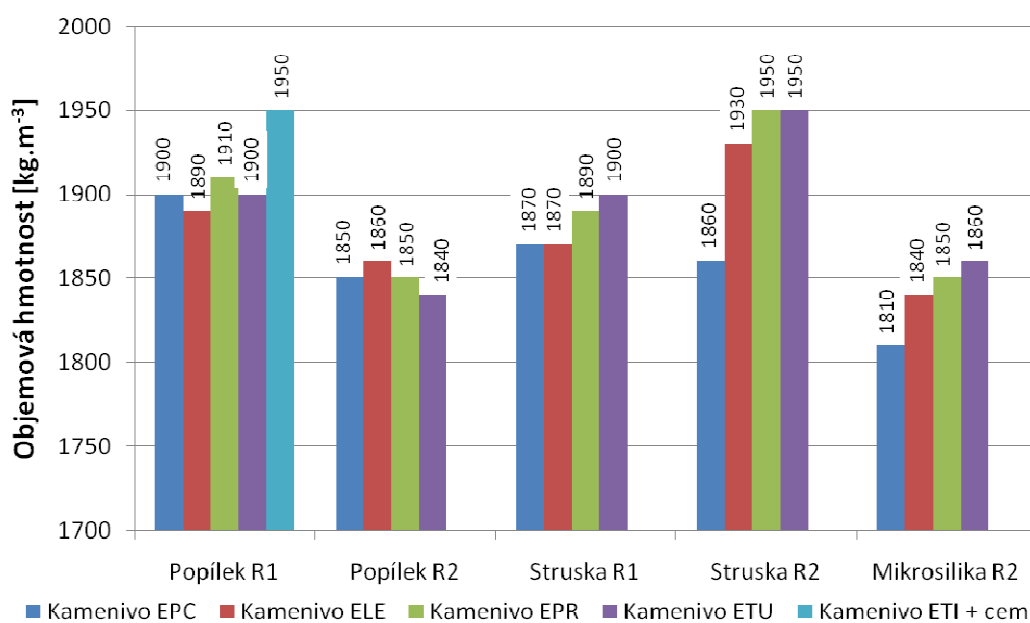
Graf č. 33: Objemová hmotnost umělého spékaného kameniva



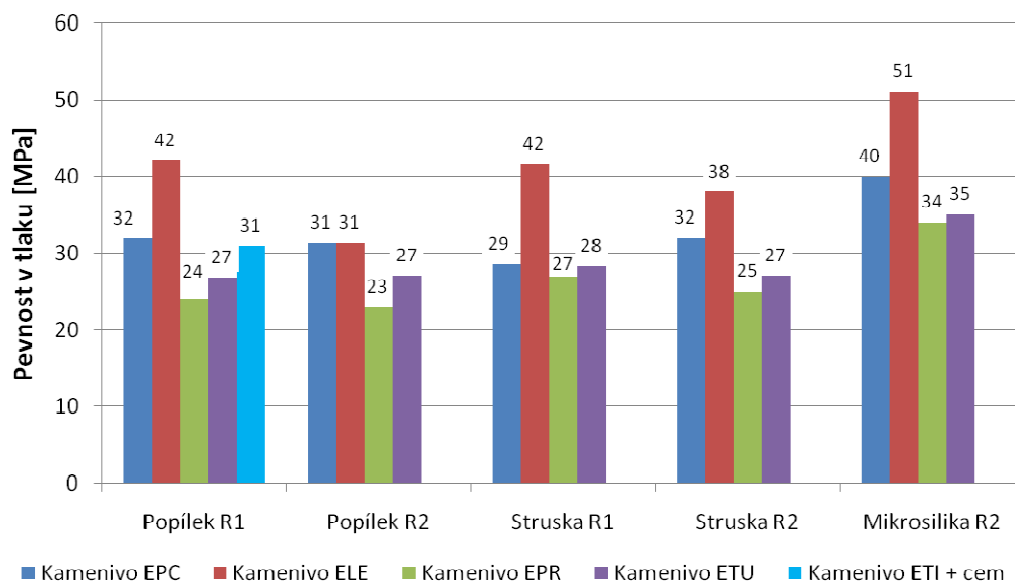
Graf č. 34: Objemová hmotnost lehkých betonů po 3 dnech



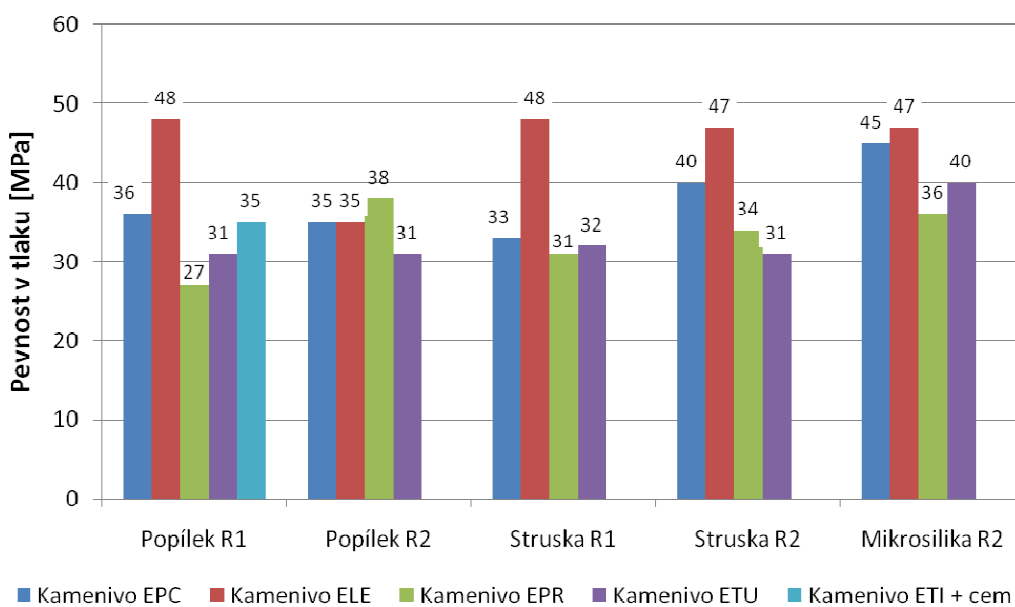
Graf č. 35: Objemová hmotnost lehkých betonů po 7 dnech



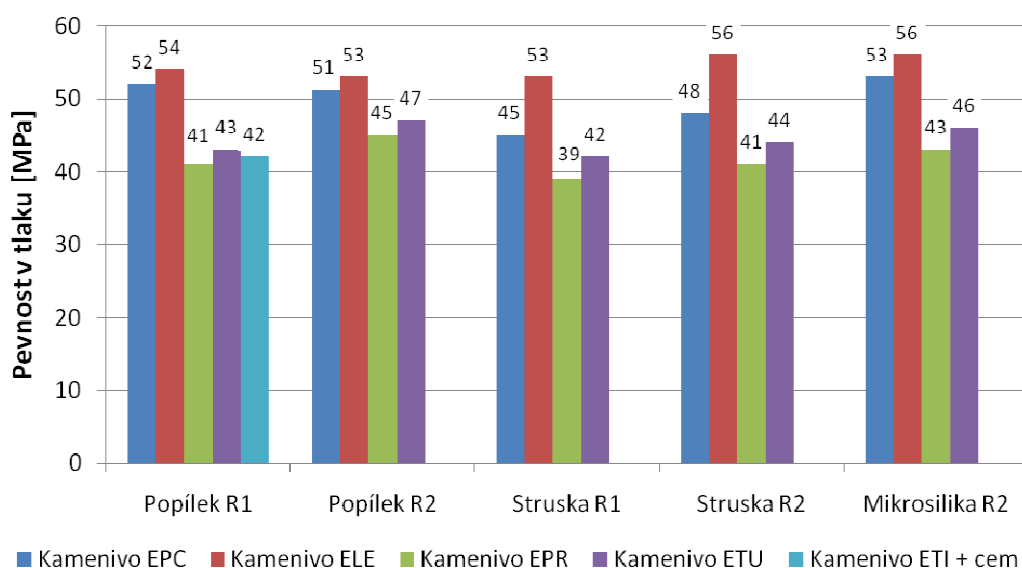
Graf č. 36: Objemová hmotnost lehkých betonů po 28 dnech



Graf č. 37: Pevnost v tlaku lehkých betonů po 3 dnech



Graf č. 38: Pevnost v tlaku lehkých betonů po 7 dnech



Graf č. 39: Pevnost v tlaku lehkých betonů po 28 dnech

Z grafického porovnání je zřejmé, že nejvyšších 3 denních pevností ve všech zkoušených recepturách dosahují lehké betony s použitím kameniva z popílku z elektrárny Ledvice. Nejnižší pevnosti měly betony při použití kameniva EPR. Kromě receptur R1 s kamenivem ELE a příměsí popílku a strusky nebylo dosaženo pevností 55 MPa potřebných pro použití umělého popílkového kameniva do vysokopevnostních lehkých betonů třídy LC 50/55 dle normy ČSN EN 206-1. Nejnižší objemové hmotnosti byly naměřeny u betonů podle receptury R1 s příměsí popílku, která měla vyšší obsah cementu než receptura R2.

Většina zkoušených vzorků nedosáhla po 28 dnech pevností 55 MPa, což je minimální pevnost požadovaná normou pro zařazení vzorků mezi vysokopevnostní lehké betony. Nejblíže tomuto kritériu byli vzorky vyrobené z lehkého popílkového kameniva z elektrárny Ledvice, které v případě receptur R2 s příměsí strusky a mikrosiliky dosahovali pevností 56 MPa a dají se tedy považovat za LWHSC.

4.3. Environmentální parametry lehkých betonů z umělého popílkového kameniva

Environmentální parametry betonů byly posuzovány podle příloh 2 a 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb., které jsou uvedeny v metodice diplomové práce.

4.3.1. Vyluhovatelnost škodlivin

Na betonech vyrobených z umělého popílkového kameniva z vybraných popílků z různých tuzemských zdrojů byla provedena zkouška vyluhovatelnosti škodlivin. Naměřené hodnoty jsou uspořádány v následující tabulce, kde zeleně jsou vyznačeny výsledky, které splňují zařazení do první třídy vyluhovatelnosti. Oranžová barva značí ostatní hodnoty, které všechny bezpečně splňují požadavky pro zařazení do IIa skupiny vyluhovatelnosti dle vyhlášky č. 294/2005 Sb.

Hodnoty, v následující tabulce, uvedené pod jednotkami označují limit pro I třídu vyluhovatelnosti, v závorkách pod nimi jsou pak uváděny hodnoty udávající omezení pro IIa třídu.

Tab. č. 28: Vyluhovatelnost škodlivin vybraných vzorků betonu

Vzorek	Ztráta sušením 105 °C	Rozpuštěné látky	Chloridy	Síraný	Arsen	Kadmium	Chrom	Nikl	Olovo
Jednotka	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
vyhl. č. 294/2005 Sb.		400 (8000)	80 (1500)	100 (3000)	0,05 (2,5)	0,004 (0,5)	0,05 (7,0)	0,04 (4,0)	0,05 (5,0)
Beton									
ETU LC 20/22	3,77	974	2,68	36,9	0,0011	< 0,0001	0,046	< 0,02	< 0,001
ETU LC 30/33	4,09	1410	4,29	22,1	< 0,001	< 0,0001	< 0,03	< 0,02	< 0,001
ELE LC 20/22	3,22	986	6,16	22,1	< 0,001	< 0,0001	0,037	< 0,02	< 0,001
R2	4,03	2090	3,74	22,1	< 0,001	< 0,0001	< 0,03	< 0,02	< 0,001

Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že betony z umělého popílkového kameniva splňují požadavky pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti dle přílohy č. 2 vyhlášky č. 294/2005 Sb. Jako nadlimitní parametr pro zařazení do první třídy se jeví vyluhovatelnost rozpuštěných látek, která byla prokázána ve všech případech.

4.3.2. Ekotoxická

Z ekotoxikologických zkoušek byly na lehkých betonech vyrobených z popílkového kameniva provedeny zkoušky stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby, zkouška akutní toxicity, test inhibice růstu sladkovodní řasy a test inhibice růstu kořene hořčice bílé. Všechny naměřené hodnoty splňují zařazení do první třídy ekotoxicity dle vyhlášky č. 294/2005 Sb. a v následujících tabulkách jsou vyznačeny zeleně.

Tab. č. 29: Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby (*Poecilia reticulata*)

Vzorek	ELE R2	ELE 25	ETU 25
vyhl. č. 294/2005 Sb.	0	0	0
koncentrace výluhu (ml/l)	1000	1000	1000
mortalita ryb za 96 hod (ks)/ počet ryb v testu (ks)	0/10	0/10	0/10
mortalita ryb za 96 hod (%)	0	0	0

Při ekotoxikologických zkouškách lehkých betonů všechny zkoušené betony splnily veškeré parametry potřebné pro zařazení do první třídy ekotoxicity dle přílohy č. 10 vyhlášky č. 294/2005 Sb.

4.4. Shrnutí orientačních zkoušek využití popílkového kameniva v betonech

Bylo prokázáno, že nejlepším kamenivem je kamenivo vyrobené z popílku z elektrárny Ledvice, které umožňuje vyrobit betony nejvyšších pevností v porovnání s ostatními zkoušenými kamenivy. Při použití tohoto kameniva bylo ve všech zkoušených recepturách dosaženo nejvyšších pevností. Nejnižších pevností byly získány při použití kameniva EPR, které u betonů

pevnostní třídy LC 30/33 nedosáhlo minimálních pevností potřebných pro zařazení do této třídy a bylo by třeba upravit recepturu zvýšením množství cementu. Při výrobě vysokopevnostních lehkých betonů s použitím spékaného popílkového kameniva byly naměřeny poměrně nízké pevnosti, a proto není vhodné používat spékané popílkové kamenivo pro tyto účely. Objemová hmotnost všech zkoušených receptur byla nižší než 2000 kg/m^3 , takže žádný z betonů nepřesáhl hranici vymezující lehké betony.

Diskuze výsledků

V této kapitole jsou shrnuty zjištěné výsledky jednotlivých etap diplomové práce.

Etapa I. - Vstupní suroviny

Praktická část práce byla rozdělena do čtyř etap, které na sebe systematicky navazovali. V první fázi byly řešeny vstupní suroviny pro výrobu popílkového kameniva, jednalo se zejména o popílky z tuzemských energetických zdrojů. Na surovinách byly provedeny různé zkoušky, jako jsou ztráta žiháním, sypná hmotnost a další. Na vybraných popílcích byla řešena také vyluhovatelnost škodlivin a ekotoxicita. Podle stanovených parametrů surovin lze konstatovat, že nejvhodnějšími popílky pro výrobu spékaného kameniva jsou vysokoteplotní. K výrobě kameniva vytvrzovaného za studena budou pak vhodnější popílky z fluidního spalování.

Etapa II. - Laboratorní zkoušení popílkového kameniva

Druhá část se zabývala výrobou kameniva v laboratorních podmínkách. Byly vyrobeny zkušební vzorky s různými typy příměsí. Část zkušebních těles se vypalovala v muflové peci a další byla vytvrzována za studena. Na obou typech zkušebních vzorků byly provedeny zkoušky jejich základních parametrů, jako jsou pevnost v tlaku, objemová hmotnost, pevnost v tlaku a nasákavost. Zjištěné výsledky potvrdily technologické předpoklady z předchozí fáze práce a jako nejvhodnější suroviny pro spékané kamenivo byly vyhodnoceny vysokoteplotní popílky z elektráren Dětmárovice a Ledvice, se kterými bylo u zkušebních vzorků dosaženo nejvyšších pevností. Příměsí cementu nebo vápna nebyly získány výrazně lepší vlastnosti střepe, tyto příměsi spíše oslabují strukturu rozkladem hydratačních produktů a kromě snížení pevnosti, zvyšují i nasákavost. V případě vzorků vytvrzovaných za studena mělo zvyšování množství příměsí vápna v některých případech za následek mírné snížení zkoušených vlastností a to hlavně v oblasti objemové hmotnosti a nasákavosti. Zvyšováním příměsí cementu však bylo dosaženo vyšších pevností kameniva. Jak již bylo zmiňováno, nejvhodnějšími popílky pro výrobu umělého kameniva studenou cestou jsou popílky fluidní a to hlavně díky jejich zvýšenému obsahu volného CaO, které se po smísení popílků s vodou výrazně podílí na vzniku hydratačních produktů, kterými jsou ettringit $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ a sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Tato etapa se také zabývala environmentálními parametry popílkového střepe, hlavním bodem řešení byla vyluhovatelnost škodlivin. Mezi nejlepší popílkové střepy patří popílkový střepe vyrobený z popílku z elektrárny Počerady, který jako jediný ze zkoušených vzorků splňuje všechny parametry pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti škodlivin. Za další kvalitní popílkový střepe můžeme považovat střepe vyrobený z popílku z elektrárny Prunéřov, u kterého byl pro zařazení do první třídy nadlimitní pouze obsah arsenu. Popílky z elektráren Ledvice a Tisová nejčastěji

překračovaly hodnoty pro zařazení do první třídy vyluhovatelnosti dle přílohy č. 2 vyhlášky č. 294/2005 Sb., nicméně všechny zkoušené vzorky jasně splňují veškeré požadavky pro zařazení do IIa skupiny.

Etapa III. - Ověření výroby popílkového kameniva v technologických podmínkách

Třetí etapa řešila ověření vybraných popílků vhodných pro výrobu umělého kameniva v technologických podmínkách. Spékané kamenivo bylo vyrobeno technologickými výpaly v horizontální peci s výškou vsázky 40 cm. Kamenivo vytvrzované za studena bylo vyrobeno s příměsí 10 % cementu a svůj tvar získalo v granulačních válcích. Poté bylo uloženo do vlhkého prostředí. Na obou typech kameniva se stanovily jejich základních vlastnosti, především odolnost proti drcení, dále potom objemová a sypná hmotnost, nasákavost a mezerovitost. Ze zkoušek spékaného umělého kameniva bylo zjištěno, že nejkvalitnější produkty je možné získat při použití popílku z elektrárny Ledvice. Toto kamenivo dosahovalo nejvyšších pevností ze všech zkoušených vzorků. Nejnižší pevnosti pak vykazovaly produkty z popílku z elektrárny Prunéřov. Pro výrobu umělého kameniva vytvrzovaného za studena jsou podle zjištěných výsledků nejvhodnější popílků z fluidního způsobu spalování. Nejlepších výsledků v odolnosti proti drcení dosáhlo kamenivo vyrobené z popílků z elektráren Tisová a Ledvice. Hlavními řešenými environmentálními parametry byly vyluhovatelnost škodlivin a ekotoxicita. Mezi nejlepší popílková kameniva, která splňují nejvíce parametrů pro zařazení do prvních tříd jak vyluhovatelnosti škodlivin, tak ekotoxicity, patří kameniva vyrobené z popílků z elektráren Počerady a Prunéřov. Umělá kameniva vyrobená z popílku z Ledvic nejčastěji překračovala hodnoty pro zařazení do prvních tříd vyluhovatelnosti i toxicity dle vyhlášky č. 294/2005 Sb., nicméně všechny zkoušené vzorky jasně splňují veškeré požadavky pro zařazení do IIa skupiny.

Etapa IV. - Orientační ověření využitelnosti umělého popílkového kameniva v betonech

Poslední, čtvrtá etapa diplomové práce se zabývala informativním ověřením umělého popílkového kameniva v betonech. Byly vyrobeny zkušební vzorky lehkých betonů běžných pevnostních tříd a probíhal pokus o výrobu lehkých betonů vysokopevnostních podle různých receptur, na kterých byly následně prováděny zkoušky. Hlavními zkoušenými parametry betonů byly pevnost v tlaku a objemová hmotnost. Bylo prokázáno, že nejlepším kamenivem je kamenivo vyrobené z popílku z elektrárny Ledvice, které umožňuje vyrobit betony nejvyšších pevností v porovnání s ostatními zkoušenými kamenivy. Při použití tohoto kameniva bylo ve všech zkoušených recepturách dosaženo nejvyšších pevností. Nejnižších pevností byly získány při použití kameniva EPR, které u betonů pevnostní třídy LC 30/33 nedosáhlo minimálních pevností potřebných pro zařazení do této třídy podle normy ČSN EN 206-1 a bylo by třeba upravit recepturu zvýšením množství cementu. Při pokusu o výrobu vysokopevnostních lehkých betonů s použitím popílkového kameniva byly naměřeny poměrně nízké pevnosti, a proto není vhodné používat spékané popílkové kamenivo pro tyto účely. Objemová hmotnost všech zkoušených receptur byla nižší než 2000 kg/m^3 , takže žádný z betonů nepřesáhl hranici vymezující lehké betony. Tyto pevnosti byly překonány pouze v případě popílkového kameniva z elektrárny Ledvice, které v případě receptur R2 s příměsí strusky a mikrosiliky dosahovali pevností 56 MPa a dají se tedy považovat za LWHSC dle normy ČSN EN 206-1.

Závěr

Pro výrobu umělého kameniva jak studenou cestou, tak spékáním bylo v laboratorních podmínkách ověřováno velké množství popílků nejen z tuzemských zdrojů. Bylo zjištěno, že nejvhodnějšími z nich jsou pro výrobu spékaného kameniva vysokoteplotní popílků z elektráren Dětmárovice a Ledvice díky jejich chemickému složení a to zejména vyššímu obsahu SiO_2 než je tomu v případě popílků fluidních. Spékané kamenivo vyrobené z fluidních popílků dosahuje nesrovnatelně nižších pevností z důvodu jejich neuspořádané struktury a odlišného chemického složení, hlavně díky zvýšenému obsahu volného CaO a síranů. Popílků z fluidního způsobu spalování, zejména z elektráren Tisová a Ledvice, jsou naopak vhodnější k výrobě kameniva vytvrzovaného za studena. Hlavním důvodem je právě jejich zvýšený obsah volného CaO , které se po smísení popílků s vodou výrazně podílí na vzniku hydratačních produktů. Následná laboratorní a technologická výroba popílkového kameniva tento fakt potvrdila. V případě spékaného kameniva bylo v laboratorních podmínkách zjištěno, že příměsí cementu nebo vápna nebyly získány vyšší pevnosti střepu, tyto příměsi spíše oslabují strukturu rozkladem hydratačních produktů a kromě snížení pevnosti, zvyšují i nasákavost, protože v nich příměsí působí jako tavivo a dochází tak k nadýmání střepu. Výsledky zkoušek kameniva vytvrzovaného za studena udávají, že příměsí cementu k vysokoteplotním popílkům získáme vyšší pevnosti kameniva, než je tomu u příměsí vápna. Zvyšování množství příměsí cementu z 5 % na 10 % přineslo výrazné zvýšení pevností. Mezi 10 % a 15 % obsahu cementu však již k výraznému nárůstu tohoto parametru nedošlo, proto lze konstatovat, že z ekonomického i technologického hlediska je pro kamenivo vytvrzované za studena optimální množství příměsí cementu 10 %.

Z umělého popílkového kameniva byly vyrobeny lehké betony. Jednalo se o betony pevnostní třídy LC 20/22 a LC 30/33. Také byly vyrobeny lehké betony vyšších pevností, u kterých byla snaha dosáhnout pevnostní třídy LC 50/55 dle normy ČSN EN 206-1. V případě třídy LC 20/22 splňovali téměř všechny vyrobené vzorky pevnostní charakteristiky, potřebné pro zařazení do této třídy. Nevyhovující byly pouze betony vyrobené ze spékaného kameniva z popílku z Pruněrova a betony z kameniva vytvrzovaného za studena z popílku z elektrárny Tisová. V případě betonů pevnostní třídy LC 30/33 splňovali pevnostní požadavky pouze lehké betony vyrobené ze spékaného kameniva z popílků z Ledvic a Tušimic. Při pokusu o výrobu vysokopevnostních lehkých betonů s použitím popílkového kameniva byly ve většině případů naměřeny pevnosti neodpovídající hodnotě 55 MPa po 28 dnech potřebné pro zařazení lehkých betonů do této třídy. Tyto pevnosti byly dosaženy pouze ve dvou z pěti zkoušených receptur s použitím spékaného popílkového kameniva z elektrárny Ledvice. Zvýšením dávky cementu a plastifikátoru by pravděpodobně bylo možné dosáhnout pevností potřebných pro zařazení do pevnostní třídy LC 50/55 s použitím umělých popílkových kameniv, zde je ovšem riziko překročení hodnoty objemové hmotnosti 2000 m^3 , vymezující lehké betony. Také by pro zvýšení pevností mohla být možnost zvýšit podíl frakce 4/8, to je ovšem předmětem dalšího výzkumu.

Hlavním přínosem diplomové práce je ověření možnosti využití popílků jako vedlejšího energetického produktu v různých stavebních materiálech jako jsou umělé popílkové kamenivo a lehké betony s použitím tohoto kameniva. Na základě jejich mechanických a chemických vlastností z nich byly pro další fázi výzkumu vybrány ty nejvhodnější, ze kterých bylo následně

vyrobena kvalitní umělé kamenivo jak spékáním, tak i za studena vytvrzované. Dále bylo ověřeno, že oba vyrobené typy kameniv jsou použitelné do lehkých betonů třídy LC 20/22. Převážná většina vyrobených kameniv je také vhodná pro výrobu lehkých betonů třídy LC 30/33. Bylo prokázáno, že spékané popílkové kamenivo lze využít i pro lehké vysokopevnostní betony třídy LC 50/55. Všechny zkoušené popílkové produkty z nich vyrobené splňují požadavky legislativy na vliv na životní prostředí.

Literatura

- [1] DROCHYTKA, R. *Lehké stavební látky*. 1. vydání. Brno: Nakladatelství VUT, 1993, 124 stran Společný výklad
- [2] PYTLÍK, Petr; SOKOLÁŘ, Radomír. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. CERM, 2002
- [3] KOTLÍK, P. *Stavební materiály historických objektů*. 1. vydání. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha 1999.
- [4] HLAVÁČ, J. *Základy technologie silikátů*. 2. vydání. Praha. Nakladatelství technické literatury, 1988
- [5] ČERNÝ, V. *Optimalizace parametrů samovýpalu spékaného popelkového kameniva*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Brno, 2006. 124 s., 3 s. příl. Vedoucí diplomové práce: Prof.Ing.Rostislav Drochytka, CSc., MBA
- [6] VEHOVSKÁ, L. *Studium vlastností a možnosti aplikace fluidních popílků ve stavebnictví*. Brno, 2008. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí disertační práce Marcela Fridrichová
- [7] PROCHÁZKA, D. *Vytvoření předpokladů hodnocení vlastností vysokopevnostních betonů s využitím nedestruktivních metod zkoušení*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Brno, 2013. 239 s. Vedoucí dizertační práce: doc.Ing.Jiří Brožovský, CSc.
- [8] EURELECTRIC/ECOPA. *Klasifikace vedlejších energetických produktů podle revidované rámcové směrnice o odpadech (2008/98/ES)*
- [9] Kuchař D., Vondruška M., *Potenciál popílku pro stabilizaci kalů* In: Enviweb [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupný z <http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/43258/>
- [10] *Keramzit* [online]. 2011. [cit. 2011-02-13]. Dostupný z <http://www.keramzit.cz/>
- [11] *Grow Shop Olomouc* [online]. 2011. [cit. 2011-03-07]. Dostupný z <http://www.growshop-olomouc.cz/perlit-5l.html>. 2011
- [12] *Magické houby* [online]. 2011. [cit. 2011-03-07]. Dostupný z <http://www.magicke-houby.cz/cz/koupit/Vermikulit.aspx>
- [13] *Sako* [online]. 2008. [cit. 2008-04-07]. Dostupný z <http://www.sako.cz>
- [14] *Energyweb* [online]. 2013. [cit. 2013-12-09]. Dostupný z <http://www.energyweb.cz>
- [15] *Lytag* [online]. 2011. [cit. 2011-02-13]. Dostupný z <http://lytag.com/>
- [16] *Pollytag* [online]. 2011. [cit. 2011-02-13]. Dostupný z <http://www.pollytag.com.pl>
- [17] *Aardelite* [online]. 2011. [cit. 2011-02-13]. Dostupný z <http://www.aardinglg.com>
- [18] *SiloTransport* [online]. 2013 [cit. 2013-12-09]. Dostupný z <http://www.silotransport.cz/umele-kamenivo>
- [19] Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Tepelná elektrárna. 2013. [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_elektr%C3%A1rna
- [20] ČEZ [online]. 2008 [cit. 2008-04-07]. Dostupný z <http://www.cez.cz>
- [21] ČSN 72 2072-6 Popílek pro stavební účely část 6: Popílek pro výrobu umělého kameniva spékání
- [22] ČSN 72 2072-8 Popílek pro stavební účely část 8: Popílek pro výrobu umělého kameniva

za studena a urychleně vytvrzovaného

- [23] ČSN P 722081-5 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely-Část 5: Fluidní popel a fluidní popílek pro výrobu umělého zrnitého plniva za studena
- [24] ČSN P 722081-8 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely-Část 8: Fluidní popel a fluidní popílek pro výrobu umělého zrnitého plniva spékáním
- [25] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti
- [26] ČSN EN 206-1 Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [27] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím
- [28] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

Seznam obrázků

Obr. č. 1 - Kamenivo keramzit	14
Obr. č. 2 - Expandovaný perlit	16
Obr. č. 3 - Vermikulit	17
Obr. č. 4 - Schéma technologie Corson	20
Obr. č. 5 - Lytag	21
Obr. č. 6 - Aardelite	23
Obr. č. 7 - Technologické schéma výroby Aardelitu	23
Obr. č. 8 - Schéma tepelné elektrárny s klasickým spalováním	26
Obr. č. 9 - Schéma tepelné elektrárny s fluidním spalováním	28
Obr. č. 10 - Modifikační přeměny křemene v závislosti na teplotě a příslušné objemové změny během výpalu	30
Obr. č. 11 - Sled přeměn při zahřívání sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ za různých podmínek (podle V. Šatavy)	35
Obr. č. 12 - Vzorek popílku Dětmárovice při zvětšení 1000x	48
Obr. č. 13 - Vzorek popílku Prunéřov při zvětšení 1000x	48
Obr. č. 14 - Vzorek popílku Počerady při zvětšení 1000x	48
Obr. č. 15 - Vzorek popílku Ledvice K3 při zvětšení 1000x	48
Obr. č. 16 - Vzorek popílku Tušimice EO1 při zvětšení 1000x	49
Obr. č. 17 - Vzorek popílku Tušimice EO2 při zvětšení 1000x	49
Obr. č. 18 - Vzorek popílku Tušimice LJ při zvětšení 1000x	49
Obr. č. 19 - Vzorek popílku Skawina při zvětšení 1000x	50
Obr. č. 20 - Vzorek popílku Arcelormittal při zvětšení 1000x	50
Obr. č. 21 - Vzorek popílku Ledvice K4 při zvětšení 100x	50
Obr. č. 22 - Vzorek ložového popela Ledvice K4 při zvětšení 100x	50
Obr. č. 23 - Vzorek popílku Tisová při zvětšení 100x	50
Obr. č. 24 - Vzorek ložového popela Tisová při zvětšení 100x	50
Obr. č. 25 - Nadýmaní zkušebních vzorků	62

Seznam tabulek

Tab. č. 1 - Využití keramzit	15
Tab. č. 2 - Vlastností lehkých umělých kameniv	25
Tab. č. 3 - Body tání a eutektické body systémů	30
Tab. č. 4 - Fáze soustavy $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ (podle A. Lehmann)	34
Tab. č. 5 - Nejvýše přípustné hodnoty ukazatelů pro jednotlivé třídy vyluhovatelnosti	43
Tab. č. 6 - Požadavky na výsledky ekotoxikologických testů	44
Tab. č. 7 - Vlastnosti vstupních surovin	46
Tab. č. 8 - Výpis ostatních použitých surovin	46
Tab. č. 9 - Chemické složení zkoušených klasických i fluidních popílků	47
Tab. č. 10 - Kvantitativní rozbor vybraných typů popílků	51

Tab. č. 11 - Kvalitativní rozbor vybraných typů popílků	51
Tab. č. 12 - Vyluhovatelnost škodlivin vybraných tuzemských popílků	54
Tab. č. 13 - Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby (<i>Poecilia reticulata</i>)	55
Tab. č. 14 - Zkouška inhibice pohyblivosti <i>Daphnia magna</i> Straus – Zkouška akutní toxicity	56
Tab. č. 15 - Test inhibice růstu sladkovodní řasy (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	56
Tab. č. 16 - Test inhibice růstu kořene hořčice bílé (<i>Sinapis alba</i>)	56
Tab. č. 17 - Vyluhovatelnost škodlivin popílků a popílkového střeptu	63
Tab. č. 18 - Vyluhovatelnost škodlivin kameniva vyrobeného za studena	74
Tab. č. 19 - Vyluhovatelnost škodlivin spékaného kameniva	75
Tab. č. 20 - Zkouška inhibice pohyblivosti <i>Daphnia magna</i> Straus – Zkouška akutní toxicity	77
Tab. č. 21 - Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby (<i>Poecilia reticulata</i>)	78
Tab. č. 22 - Výpis složek použitých pro výrobu zkoušených betonů	79
Tab. č. 23 - Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Ledvice (suroviny na m3 betonu)	80
Tab. č. 24 - Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Počeradý (suroviny na m3 betonu)	80
Tab. č. 25 - Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Pruněšov (suroviny na m3 betonu)	81
Tab. č. 26 - Receptura pro výrobu lehkých betonů s použitím spékaného kameniva vyrobeného z popílku z elektrárny Tušimice (suroviny na m3 betonu)	81
Tab. č. 27 - Receptury pro výrobu vysokopevnostních lehkých betonů s použitím spékaného popílkového kameniva	84
Tab. č. 28 - Vyluhovatelnost škodlivin vybraných vzorků betonu	89
Tab. č. 29 - Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby (<i>Poecilia reticulata</i>)	89

Seznam grafů

Graf č. 1 - Granulometrie vstupních surovin	45
Graf č. 2 - Vodní součinitel pro konzistenci pasta zkušebních vzorků	52
Graf č. 3 - Pevnost v tlaku předsušených zkušebních vzorků	53
Graf č. 4 - Zobrazení množství síranů v popílcích	54
Graf č. 5 - Porovnání množství chromu v popílcích	55
Graf č. 6 - Smrštění vypálených zkušebních vzorků	58
Graf č. 7 - Objemová hmotnost vypálených zkušebních vzorků	59
Graf č. 8 - Pevnost v tlaku vypálených zkušebních vzorků	60
Graf č. 9 - Nasákavost vypálených zkušebních vzorků	61
Graf č. 10 - Rozdíl vyluhovatelnosti síranů mezi popílkami a popílkovým střeptem	64

Graf č. 11 - Rozdíl vyluhovatelnosti arsenu mezi popílky a popílkovým střepem	64
Graf č. 12 - Objemová hmotnost popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí cementu po 28 dnech	65
Graf č. 13 - Nasákavost popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí vápna po 28 dnech	66
Graf č. 14 - Pevnost v tlaku popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí cementu po 28 dnech	67
Graf č. 15 - Pevnost v tlaku popílkového kameniva vytvrzovaného za studena s příměsí vápna po 28 dnech	68
Graf č. 16 - Sypná hmotnost spékaného kameniva volně sypaná	70
Graf č. 17 - Objemová hmotnost spékaného kameniva	71
Graf č. 18 - Mezerovitost spékaného kameniva	71
Graf č. 19 - Nasákavost spékaného kameniva volně sypaná	72
Graf č. 20 - Odolnost spékaného kameniva proti drcení	72
Graf č. 21 - Sypná hmotnost kameniva vytvrzovaného za studena volně sypaná	73
Graf č. 22 - Odolnost proti drcení kameniva vytvrzovaného za studena	73
Graf č. 23 - Rozdíl vyluhovatelnosti síranů mezi popílky, laboratorními vzorky a popílkovým kamenivem vyrobeným za studena	75
Graf č. 24 - Rozdíl vyluhovatelnosti síranů mezi popílky, popílkovým střepem a popílkovým spékaným kamenivem	76
Graf č. 25 - Rozdíl vyluhovatelnosti arsenu mezi popílky, laboratorními vzorky a popílkovým kamenivem vyrobeným za studena	76
Graf č. 26 - Rozdíl vyluhovatelnosti arsenu mezi popílky, popílkovým střepem a popílkovým spékaným kamenivem	76
Graf č. 27 - Objemová hmotnost lehkých betonů pevnostní třídy C 20/25 se spékaným popílkovým kamenivem	81
Graf č. 28 - Objemová hmotnost lehkých betonů pevnostní třídy C 30/37 se spékaným popílkovým kamenivem	82
Graf č. 29 - Pevnost v tlaku lehkých betonů pevnostní třídy C 20/25 se spékaným popílkovým kamenivem	82
Graf č. 30 - Pevnost v tlaku lehkých betonů pevnostní třídy C 30/37 se spékaným popílkovým kamenivem	82
Graf č. 31 - Objemová hmotnost lehkých betonů s popílkovým kamenivem vytvrzovaným za studena	83
Graf č. 32 - Pevnost v tlaku lehkých betonů s popílkovým kamenivem vytvrzovaným za studena	83
Graf č. 33 - Objemová hmotnost umělého spékaného kameniva	85
Graf č. 34 - Objemová hmotnost lehkých betonů po 3 dnech	85
Graf č. 35 - Objemová hmotnost lehkých betonů po 7 dnech	86
Graf č. 36 - Objemová hmotnost lehkých betonů po 28 dnech	86
Graf č. 37 - Pevnost v tlaku lehkých betonů po 3 dnech	87
Graf č. 38 - Pevnost v tlaku lehkých betonů po 7 dnech	87
Graf č. 39 - Pevnost v tlaku lehkých betonů po 28 dnech	88

PŘÍLOHA č. 1
Výsledky ekotoxicity

1. Kamenivo vyrobené za studena

Tab. č. 1: Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby (*Poecilia reticulata*)

Kamenivo za studena s příměsí 5% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	0	0	0	0	0	0
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
mortalita ryb za 96 hod (ks)/ počet ryb v testu (ks)	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
mortalita ryb za 96 hod (%)	0	0	0	0	0	0
Kamenivo za studena s příměsí 10% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	0	0	0	0	0	0
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
mortalita ryb za 96 hod (ks)/ počet ryb v testu (ks)	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
mortalita ryb za 96 hod (%)	0	0	0	0	0	0

Tab. č. 2: Test inhibice růstu sladkovodní řasy (*Scenedesmus subspicatus*)

Kamenivo za studena s příměsí 5% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení	3	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu řasy (%)	/	-0,80	1,95	16,80	-1,95	15,00
Kamenivo za studena s příměsí 10% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení	3	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu řasy (%)	/	7,7	10,6	10,8	14,4	16,3

Tab. č. 3: Test inhibice růstu kořene hořčice bílé (*Sinapis alba*)

Kamenivo za studena s příměsí 5% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení po 30 semenech	3	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu kořene (%)	/	5,0	15,1	7,9	6,7	-42,0
Kamenivo za studena s příměsí 10% cementu						
Vzorek	Kontrola	EPC	EPR	ELE K4	ETU	ETI
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení po 30 semenech	3	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu kořene (%)	/	10,4	-24,9	-8,8	-11,3	-21,7

2. Spékané kamenivo

Tab. č. 4: Zkouška inhibice pohyblivosti *Daphnia magna* Straus – Zkouška akutní toxicity

Spékané kamenivo + uhlí					
Vzorek	Kontrola	EPR + uhlí	EPC + uhlí	ELE K3 + uhlí	ETU + uhlí
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
imobilizace perlooček za 48 hod (ks) / počet perlooček v testu (ks)	0/20	4/60	1/60	2/60	4/60
mortalita perlooček za 48 hod (%)	0	6,7	1,6	3,3	6,7
Spékané kamenivo + ArcelorMittal					
Vzorek	Kontrola	EPR + AM	EPC + AM	ELE K3 + AM	ETU + AM
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
imobilizace perlooček za 48 hod (ks) / počet perlooček v testu (ks)	0/20	2/60	2/60	3/60	6/60
mortalita perlooček za 48 hod (%)	0	3,3	3,3	5,0	10,0

Tab. č. 5: Test inhibice růstu sladkovodní řasy (*Scenedesmus subspicatus*)

Spékané kamenivo + uhlí					
Vzorek	Kontrola	EPR + uhlí	EPC + uhlí	ELE K3 + uhlí	ETU + uhlí
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu řasy (%)	/	0,5	9,0	-1,2	-9,8
Spékané kamenivo + ArcelorMittal					
Vzorek	Kontrola	EPR + AM	EPC + AM	ELE K3 + AM	ETU + AM
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu řasy (%)	/	-10,1	-11,2	1,6	-1,7

Tab. č. 6: Test inhibice růstu kořene hořčice bílé (*Sinapis alba*)

Spékané kamenivo + uhlí					
Vzorek	Kontrola	EPR + uhlí	EPC + uhlí	ELE K3 + uhlí	ETU + uhlí
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení po 30 semenech	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu kořene (%)	/	-6,6	1,5	3,1	6,3
Spékané kamenivo + ArcelorMittal					
Vzorek	Kontrola	EPR + AM	EPC + AM	ELE K3 + AM	ETU + AM
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	0	1000	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení po 30 semenech	3	3	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu kořene (%)	/	10,5	6,7	16,0	5,0

3. Lehké betony

Tab. č. 7: Zkouška inhibice pohyblivosti *Daphnia magna* Straus – Zkouška akutní toxicity

Vzorek	ELE R2	ELE 25	ETU 25
vyhl. č. 294/2005 Sb.	0	0	0
koncentrace výluhu (ml/l)	1000	1000	1000
imobilizace perlooček za 48 hod (ks) / počet perlooček v testu (ks)	3/60	58/60	2/60
mortalita perlooček za 48 hod (%)	5	0,0	3,3

Tab. č. 8: Test inhibice růstu sladkovodní řasy (*Scenedesmus subspicatus*)

Vzorek	ELE R2	ELE 25	ETU 25
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu řasy (%)	5,6	9,4	-8,5

Tab. č. 9: Test inhibice růstu kořene hořčice bílé (*Sinapis alba*)

Vzorek	ELE R2	ELE 25	ETU 25
vyhl. č. 294/2005 Sb.	<30%	<30%	<30%
koncentrace výluhu (ml/l)	1000	1000	1000
počet paralelních stanovení po 30 semenech	3	3	3
Ø inhibice/stimulace růstu kořene (%)	-2,0	20,5	-0,3