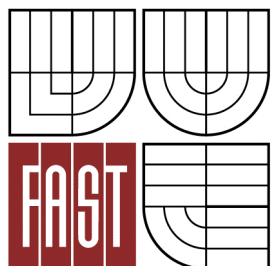




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM VLASTNOSTÍ PLNIV DO KOMPOZITŮ S POŽADAVKEM NA VYSOKOU TEPLOTNÍ ODOLNOST

STUDY OF THE PROPERTIES FOR FILLERS TO THE COMPOSITES REQUIRING HIGH
TEMPERATURE RESISTANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

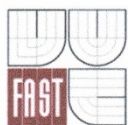
Bc. VÁCLAV VOVESNÝ, DIS.

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2016



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. Václav Vovesný, DiS.
Název Studium vlastností plniv do kompozitů s požadavkem na vysokou teplotní odolnost

Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2015

Datum odevzdání diplomové práce 15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu



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

Podklady a literatura

Bodnárová, L. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 122 s.

Nevřivová, L. Speciální keramika, Modul BJ14_M04, Žárovzdorné materiály. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. VUT v Brně, FAST. Brno 2006.

Matoušek, J. Anorganické nekovové materiály. VŠCHT v Praze, 1992. 160 s.

Ntinger, I., Varevac, D., Bjegovic, D., Moric, D. Effect of high temperature on properties of steel slag aggregate concrete. Fire Safety Journal 59, 2013, 1-7. Construction and Building Materials 25, 2011.

ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky, 2000.

Související publikace dostupné na www.sciencedirect.com

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

V případě malt a betonů představuje dominantní podíl objemu plnivo. Při vývoji správkových hmot s požadavkem na extrémní teplotní odolnost je tedy při výběru vhodných složek třeba věnovat nejprve pozornost právě plnivu. Cílem práce je analyzování různých druhů plniv pro kompozity s odolností vůči vysokým teplotám – předpoklad 1200 až 1400 °C, s následným výběrem potenciálně vhodných pojiv pro navazující výzkum.

V rámci vypracování diplomové práce jsou požadovány následující výstupy:

1. Studium vybraných odborných publikací zaměřených na již probíhající výzkum v oblasti plniv pro kompozitní materiály odolných vůči extrémním teplotním podmínkám.
2. Selektce potenciálně vhodných plniv a jejich ověření před a po tepelné expozici – pevnost, nasákavost, pórovitost, fázové složení, mikrostruktura atd. Při výběru bude pozornost věnována jak přírodním, tak uměle vyráběným plnivům vč. zohlednění primárních i alternativních surovinových zdrojů.
3. Laboratorní zkoušení vlastností vybraných plniv v kompozitním systému (budou zvoleny dva typy matic) dle příslušných metod a postupů (objemová hmotnost, pevnost v tlaku a tahu za ohybu, objemové změny, atd.) včetně teplotního zatěžování těles.
4. Zhodnocení výsledků a zjištění s vyvozením patřičných závěrů s výběrem nejvhodnějších plniv pro navazující vývoj tepelně odolného kompozitního materiálu.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na chování přírodního i umělého kameniva a jejich chování v polymer – cementových kompozitech při působení vysokých teplot. V teoretické části byly popsány procesy, které probíhají v kamenivu a maltách při teplotním zatížení. Bylo popsáno zkoušení kameniva a malt při působení vysokých teplot. Dále byl popsán vliv vysokých teplot na jednotlivé složky betonu a návrh vhodných komponent pro betony při působení vysokých teplot. V experimentální části byly zkoušeny jednotlivé druhy kameniva. Na kamenivu byly zjišťovány základní fyzikálně mechanické vlastnosti a mineralogické složení pomocí metod XRD, DTA a SEM. U malt byl stanoven vliv vysokých teplot na objemovou hmotnost betonu, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Na závěr byly vyhodnoceny získané poznatky.

Klíčová slova

Požár, vysoká teplota, odolnost, plnivo, lehké kamenivo, hutné kamenivo, polymer – cementový kompozit, vlastnosti, fyzikálně – mechanické, mikrostruktura

Abstract

The diploma thesis is focused on the behaviour of natural and synthetic aggregates and their behaviour in polymer – cement composites, while being exposed to high temperature. The processes, happening in aggregates and mortar under the thermal load, were described in the theoretical part of the thesis same as the testing of heat effects on the aggregates and mortar. Further, the influence of high temperature on each component of concrete was described, followed by the suggestion of the appropriate components for concrete exposed to high temperature. Various aggregates were tested in the experimental part of the thesis. The basic physical and mechanical properties of aggregates were examined same as their mineralogical composition with using XRD, DTA and SEM methods. At the mortar, the influence of high temperature on the concrete density, compressive strength and tensile strength was defined. The gained knowledge was evaluated in the final part of the thesis

Keywords

Fire, high temperature, durability, filler, lightweight aggregate, polymer – cement composite, properties, physical – mechanical, microstructure.

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Václav Vovesný, DiS. *Studium vlastností plniv do kompozitů s požadavkem na vysokou teplotní odolnost*. Brno, 2015. XX s., YY s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28.12.2015

.....
podpis autora

Bc. Václav Vovesný, DiS.

Prohlášení:

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

V Brně dne

.....
podpis autora
Bc. Václav Vovesný, DiS.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. a dále Ing. Tomášovi Melicharovi, Ph.D. za připomínky, cenné rady a odbornou pomoc při zpracování mé diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	5
3	TEORETICKÁ ČÁST	6
3.1	Požární odolnost stavebních konstrukcí	6
3.2	Správkové malty	7
3.3	Působení vysokých teplot na cementové kompozity	10
3.3.1	Vliv vysokých teplot na cementový tmel	11
3.3.2	Kamenivo v cementových kompozitech	12
3.3.2.1	Vliv vysokých teplot na kamenivo	13
3.3.3	Kompozitní působení kameniva a cementového tmele namáhaných vysokou teplotou 16	
3.3.4	Polypropylenová vlákna	17
3.4	Přírodní kamenivo	17
3.4.1	Magmatická tvorba minerálů	17
3.4.2	Minerály sedimentárního původu	18
3.4.3	Minerály metamorfního původu	18
3.4.4	Příklady přírodního kameniva odolávajícího vysokým teplotám	18
3.4.4.1	Drcená pemza	18
3.4.4.2	Diatomity (křemelina a trypl)	18
3.5	Umělé pórovité kamenivo	19
3.5.1.1	Škvára	19
3.5.1.2	Agloporit	19
3.5.1.3	Keramzit	20
3.6	Žáruvzdorné materiály	20
3.6.1	Žáruvzdorné materiály v soustavě $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$	21
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
4.1	Metodika práce	24
4.2	Výběr vhodných zástupců plniv (kameniv)	25
4.3	Zkušební metody a postupy	26
4.3.1	Příprava vzorků – kamenivo	26
4.3.2	Zkoušení kameniva	27
4.3.2.1	Sledování změn pomocí pozorovací pece	27
4.3.2.2	Teplotní expozice vzorků	27
4.3.2.3	Pevnost stlačením ve válci	28
4.3.2.4	Objemová hmotnost	29

4.3.2.5	Měrná hmotnost	30
4.3.2.6	Sypná hmotnost	31
4.3.2.7	Makroskopické pozorování.....	31
4.3.2.8	Úbytek hmotnosti	31
4.3.2.9	Sítový rozbor	32
4.3.2.10	XRD - RTG difrakční analýza	32
4.3.2.11	SEM - Rastrovací elektronový mikroskop	33
4.3.3	Testování malt	34
4.3.4	Příprava vzorků – malta.....	34
4.3.4.1	Pevnost v tlaku.....	35
4.3.4.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	35
4.3.4.3	Objemová hmotnost a změny rozměrů ztvrdlé matly	36
4.4	Použité materiály.....	37
4.4.1	Pojivo.....	37
4.4.1.1	Cement ze závodu Mokrá (Českomoravský cement a.s.).....	37
4.4.2	Kamenivo (plnivo)	38
4.4.2.1	Živcový písek.....	38
4.4.2.2	Čedič.....	38
4.4.2.3	Amfibolit.....	39
4.4.2.4	Kamenivo Liapor	39
4.4.2.5	Popílkový agloporit	40
4.4.2.6	Škvára	41
4.4.2.7	Lupek	41
4.4.3	Příměsi.....	42
4.4.3.1	Vysokoteplotní popílek.....	42
4.4.3.2	Struska	43
4.4.3.3	Vinnapas 5043 N	43
4.4.4	Rozptýlená výztuž	43
4.4.4.1	Polypropylenová vlákna	43
4.5	Výsledky experimentální části.....	44
4.5.1	Výsledky testů kameniva.....	44
4.5.1.1	Tepelná expozice v pozorovací peci	44
4.5.1.2	Makroskopické pozorování po tepelné expozici v muflové peci	47
4.5.1.3	Sítový rozbor	52
4.5.1.4	Objemová hmotnost zrn, nasákavost, měrná hmotnost, pórovitost.....	56
4.5.1.5	Pevnost kameniva stlačením ve válci, sypná hmotnost, hmotnost vzorku	65

4.5.1.6	Vyhodnocení SEM	72
4.5.1.7	Vyhodnocení RTG.....	75
4.5.2	Testování navržených kompozitů	86
4.5.2.1	Zatížení vzorku v pozorovací peci	86
4.5.2.2	Vizuální posouzení vzorků	89
4.5.2.3	Fyzikálně – mechanické parametry malt.....	90
4.6	Diskuse výsledků.....	95
5	ZÁVĚR	98
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	99
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
8	SEZNAM TABULEK	103

1 ÚVOD

V dnešní době je velmi aktuální problém týkající se odolnosti betonových konstrukcí vůči vysokým teplotám. Tento problém je nejčastěji spojen s nehodami v silničních tunelech, při nichž v některých případech dochází k požáru. Následkem požáru, kde teploty převyšují 1000 °C, dochází k intenzivnímu zatížení betonové konstrukce a tím k extrémní degradaci a znehodnocení betonu.

Při zvyšování teploty dochází v cementových kompozitech k mnoha jevům. Tyto lze rozdělit dle jednotlivých komponent. V první řadě se jedná o degradaci matrice, kde dochází k postupnému rozkladu jejích složek, modifikačním přeměnám atd. Dále dochází k podobným jevům i v plnivu, kde se v závislosti na použitém typu spíše projevují fázové změny a teplotní dilatace. Specifická je pak kontaktní zóna matrice, kde se nejvíce projevují rozdílné teplotní roztažnosti, resp. smrštění matrice a plniva, čímž dochází k poruchám jejich vzájemné soudržnosti.

Plnivo je obvykle co do objemu převažující složkou cementového kompozitu a tvoří přibližně 60 – 80 % jeho objemu. Pro zajištění dostatečné trvanlivosti a odolnosti cementového kompozitu z hlediska působení extrémních teplot je třeba plnivo věnovat vysokou pozornost. Při výběru vhodného typu je důležité zohlednit jeho původ, který souvisí prakticky se všemi podstatnými faktory, tj. má zásadní vliv na objemovou stálost, trvanlivost, fázové změny a dilatace při vysokých teplotách. Pro tyto účely lze jako plnivo využít jak přírodní kamenivo, tak i kamenivo uměle vyráběné, čímž lze zahrnout jak zdroje primární, tak alternativní.

V praxi užívané přírodní kamenivo většinou vzniká sopečnou aktivitou, kde působí vysoké teploty a tlaky. Nejznámějším zástupcem je čedič a amfibolit. Nejznámějším uměle vyráběným kamenivem je keramzit (Liapor) a popílkový agloporit, které vznikají sbalkováním a následným vypalováním na roštu při vysokých teplotách. Těmto a dalším typům plniva je dále věnována pozornost v této diplomové práci se zaměřením na jejich chování za vysokých teplot z hlediska základních parametrů a mikrostruktury.

2 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je studium vlastností plniv do kompozitů s požadavkem na vysokou teplotní odolnost. Tato práce analyzuje různé druhy plniv pro kompozity s odolností vůči vysokým teplotám s předpokladem pro teploty 1200 – 1400 °C. Diplomová práce je rozdělena na několik částí – teoretickou, experimentální a závěrečnou.

V teoretické části diplomové práce je zpracována rešerše o problematice působení vysokých teplot na plnivo do betonů a celkové zhodnocení působení vysokých teplot na samotný betonový kompozit.

- Vlastnosti a požadavky na sanační malty
- Vliv vysokých teplot na jednotlivé složky betonu, malt
- Žáruvzdorné materiály

Cílem experimentální části je ověření vlastností vybraných plniv:

- Pevnost
- Nasákavost
- Pórovitost
- Fázové složení, mikrostruktura

Plniva jsou zastoupena jak přírodními kamenivy, tak i kamenivy uměle vyráběnými. Ověřování vlastností probíhá na referenčním vzorku kameniva nezatíženého vysokými teplotami a na vzorku zatíženém vysokými teplotami. V této části diplomové práce byl navrhnutá matrice, ve které budou použita vybraná plniva. Na těchto vzorcích se provede testování jednotlivých vlastností a opět se porovnájí referenční vzorky bez zatížení a vzorky zatížené vysokou teplotou.

V poslední (závěrečné) části jsou vyhodnoceny výsledky experimentální části diplomové práce a na základě zjištěných výsledků jsou vybrána nejvhodnější plniva pro využití v polymercementovém kompozitu s odolností vůči vysokým teplotám.

3 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části jsou shrnuty stávající poznatky z dané oblasti, které jsou dále použity v experimentální části.

3.1 Požární odolnost stavebních konstrukcí

Požární odolnost stavebních konstrukcí je důležitý faktor z pohledu bezpečnosti. Je to doba, po kterou je stavební konstrukce schopná odolávat účinkům požáru, aniž by došlo k porušení jejich funkce, specifikované mezními stavy požární odolnosti. Narušením funkce konstrukce je myšlena ztráta stability nebo zřícení konstrukce, vytvoření trhlin či otvorů, zapálení hořlavých látek prostupem tepla na druhé straně konstrukce. Požární odolnost musí být zachována po celou dobu životnosti stavby a určuje se podle stupně požární bezpečnosti požárního úseku. Udává se v minutách. Zároveň se určuje i druh konstrukce (DP1, DP2, DP3) podle použitých hmot (A1, A2, B, C, D, E, F – dle ČSN EN 13 501 – 1).

Tabulka 1: Shrnutí vlastností nechráněných konstrukčních materiálů vystavených požáru [26]

Nechráněný konstrukční materiál	Požární odolnost	Hořlavost	Přispívání k požárnímu zatížení	Rychlost šíření tepla v průřezu	Zabudovaná (přirozená) požární ochrana	Možnost opravy po požáru	Ochrana pro evakuaci a požární zásah
Dřevo	Nízká	Vysoká	Vysoké	Velmi nízká	Velmi nízká	Nulová	Nízká
Ocel	Velmi nízká	Nulová	Nulová	Velmi vysoká	Nízká	Nízká	Nízká
Beton	Vysoká	Nulová	Nulové	Nízká	Vysoká	Vysoká	Vysoká

Tabulka 2: Požadavky na požární bezpečnost ve vztahu k betonu podle Eurokódu 2 [26]

Cíl	Požadavky	Použití betonu
Omezení rozvoje požáru	Stěny, podlahy a stropy by měly být provedeny z nehořlavého materiálu	Beton je materiál inertní a nehořlavý
Zachování stability nosných konstrukčních prvků po stanovenou dobu požáru	Prvky by měly být provedeny z nehořlavého materiálu a měly by mít vysokou požární odolnost	Beton je nehořlavý a díky své nízké tepelné vodivosti si při běžných požárech zachovává většinou své pevnosti

Omezení rozvoje a šíření požáru a kouře	Požárně dělící stěny stropy by měly být nehořlavé a měly by mít vysokou požární odolnost	Kromě výše uvedeného snižují vhodně navržené betonové spoje možnost porušení požárem a tak plně využívají konstrukční kontinuitu betonu
Napomáhání při evakuaci obyvatel a zajištění bezpečnosti záchranných jednotek	Únikové cesty by měly být provedeny z nehořlavého materiálu a měly by mít vysokou požární odolnost, aby mohly být bezpečně využity delší dobu	Betonová jádra jsou velice masivní a mohou poskytovat velmi vysokou požární odolnost. Obzvláště účinnou metodou výstavby je posuvné či šplhající bednění
Usnadnění zásahu požárních jednotek	Nosné prvky by měly mít vysokou požární okolnost pro zajištění účinného zásahu požárních jednotek. Neměly by z nich odpadávat hořící části (kapky)	Nosné prvky si zachovávají svou celistvost po dlouhou dobu. Z betonu neodpadávají rozžhavené části.

3.2 Správkové malty

Úkolem správkových hmot je obnovit železobetonové konstrukční prvky do původního tvaru, resp. dosažení původní vrstvy tloušťky krycí vrstvy nad výztuží, případně staticky zesílit konstrukci. Správková hmota slouží především k obnovení trvanlivosti železobetonových prvků a k jejich vzhledovému uvedení do původního stavu. V případě, že správková hmota má vytvořit vrstvu zesilující železobetonový prvek, je třeba na to v projektu sanace zvláštním způsobem upozornit a současně navrhnout taková opatření, která by účinně zajistila statické spolupůsobení původního betonu a správkových hmot. Ve zvlášť významných případech se doporučuje ověřit toto statické spolupůsobení zvláštními zkouškami. [13]

Správkové malty musí splňovat především tyto požadavky:

- Vysokou soudržnost s podkladem
- Mrazuvzdornost
- Omezený vznik smršťovacích trhlin
- Minimální objemové změny v důsledku změn vlhkosti a teploty
- Dobrou vodotěsnost resp. malou nasákavost
- Co nejnižší modul pružnosti, který by měl být nižší než modul pružnosti podkladního betonu

- Pevnost v tlaku, resp. v tahu za ohybu na shodné nebo mírně vyšší úrovni než podkladní beton
- Zvýšenou odolnost vůči agresivním médiím

Tabulka 3: Požadované základní parametry správkových hmot dle ČSN EN 1504 – 3 [33]

Parametr	Správkové hmoty bez statické funkce		Správkové hmoty se statickou funkcí	
	Třída R1	Třída R2	Třída R3	Třída R4
Pevnost v tlaku (ČSN EN 12109)	$\geq 10 \text{ MPa}$	$\geq 15 \text{ MPa}$	$\geq 25 \text{ MPa}$	$\geq 45 \text{ MPa}$
Obsah chloridových iontů (ČSN EN 1015-17 nebo ČSN EN 14629)	$\leq 0,05 \%$	$\leq 0,05 \%$	$\leq 0,05 \%$	$\leq 0,05 \%$
Soudržnost (ČSN EN 1542)	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
Vázané smršťování/rozpínání ^{1,2} – soudržnost po zkoušce (ČSN EN 12617 – 4)	Bez požadavků	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
Modul pružnosti (ČSN EN 13412 nebo ČSN EN ISO 6784)	Bez požadavků	Bez požadavků	$\geq 15 \text{ GPa}$	$\geq 20 \text{ GPa}$

Parametr	Správkové hmoty bez statické funkce		Správkové hmoty se statickou funkcí	
	Třída R1	Třída R2	Třída R3	Třída R4
Odolnost proti karbonataci (ČSN EN 13295)	Bez požadavků	Bez požadavků	$dk \leq \text{kontrolní beton (MC(0,45))}$	$dk \leq \text{kontrolní beton (MC(0,45))}$
Tepelná sloučitelnost ^{1,2}				
Zmrazování a tání – soudržnost po 50 cyklech	Vizuální prohlídka	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
Náporové skrápění – soudržnost po 30 cyklech	Vizuální prohlídka	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
Cyklování za sucha – soudržnost po 30 cyklech (ČSN 13687 - 1 až 5)	Vizuální prohlídka	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$

Pozn. :

1 Uvedená hodnota je hodnotou průměrnou a jednotlivé hodnoty nesmí být menší než 75 % uvedeného požadavku.

2 Maximální přípustná průměrná šířka trhliny je $\leq 0,05 \text{ mm}$, bez delaminace.

Nejpodstatnějšími požadavky na správkové malty je jejich optimální přídržnost k podkladnímu betonu a absence smršťovacích trhlin. Aby bylo dosaženo optimálního výsledku v tomto směru, je třeba použít nejen vhodnou správkovou maltu, ale také ji správně aplikovat a přiměřeným způsobem ošetřovat. I velmi dobrá správková malta, použitá nevhodně a neošetřovaná, nezajistí dosažení požadovaného výsledku.

Prioritně se volí použití správkových malt polymercementových, vzhledem k jejich vysoké alkalitě, která zajišťuje pasivaci odhalené výztuže a částečně je schopna i repasivovat povrchové i zkarbonatované vrstvy. Čistě polymerní, např. epoxidové správkové hmoty, jsou používány pro reprofilace jen výjimečně. Užívány jsou spíše jako záливkové či konstrukční výplňové materiály. Jejich předností je vysoká přídržnost k podkladu a dobré mechanické vlastnosti. Naopak jejich nevýhodou je vysoký koeficient teplotní roztažnosti, výrazná závislost materiálových vlastností na teplotě, vytvoření absolutní parozábrany na povrchu prvku a nevyhovující alkalita z hlediska pasivace výztuže. [12][11]

Správkové hmoty se obecně rozdělují dle druhu pojiva:

- Cementové malty a betony – CC (Cement Concrete) - malty a betony, které cement používají jako pojivo
- Polymercementové malty a betony – (PCC, PCM) – malty a betony s cementovým pojivem modifikované polymerními přísadami, nebo cementové betony impregnované polymerem PIC (Polymer Impregnated Concrete). Polymerní přísada a cementové modifikátory umožňují vytvořit pevnější vazbu mezi cementovým a polymerním pojivem.
- Polymerbetony a polymermalty – malty a betony, které jako pojivo využívají polymerní pryskyřice (PES, SI, epoxidové)
- Injektážní hmoty a záливky – báze portlandského cementu, epoxidové pryskyřice

Cementové kompozity jsou známy více jak 170 let a mají relativně dobré vlastnosti, které dovedeme ještě vylepšit modifikací pomocí polymerů. Nicméně tyto materiály mají i určité nevýhody, jako například nízkou tahovou pevnost, vysoké smrštění, nízkou odolnost vůči chemikáliím atd.

3.3 Působení vysokých teplot na cementové kompozity

Beton (cementový kompozit) je nehořlavý materiál s velkou odolností vůči působení ohně. Beton při požáru neprodukuje toxické plyny ani kouř. Teplo se betonem šíří s nízkou rychlostí a proto lze beton ve většině konstrukcí použít bez další požární ochrany. To ale neznamená, že betonové (železobetonové) konstrukce nejsou působením vysokých teplot negativně ovlivněny.

Působení ohně a vysokých teplot znamená výrazné zhoršení kvality betonu. Dochází ke změnám fyzikálně mechanických vlastností, které mohou být dočasné i trvalé. Trvanlivost a bezpečnost konstrukce je závislá na době trvání žáru, hasících zákrocích (ochlazování) anebo na tom, jak se pevnost betonu změní žářem. [27]

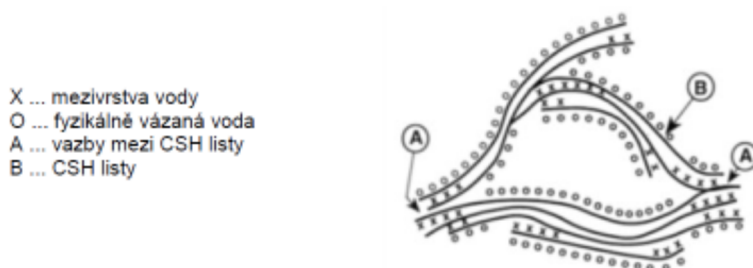
V průběhu působení teploty na beton se jeho vlastnosti z hlediska transportu tepla a vlhkosti významně mění v důsledku diferenciální teplotní roztažnosti způsobující rozevírání mikrotrhlin a změny pevné struktury spojené s chemickým rozkladem cementové pasty (dehydratace a dalších složek, včetně fázové přeměny křemene). Tyto procesy vedou ke snížení objemové hmotnosti betonu, zvýšení poréznosti a tím také k nižší tepelné vodivosti a zvýšení prostupnosti z hlediska migrace vodní páry. Důležité jsou teploty od 300 °C do 1000 °C nebo až do 1300 °C a jejich doba trvání. [27]

Tabulka 4: Rozdělení betonů do skupin dle požární odolnosti [27]

Skupina A		Skupina B
Objemová hmotnost do 1800 kg/m ³		Objemová hmotnost nad 1800 kg/m ³
Umělé kamenivo	Přírodní kamenivo	Hutné kamenivo
Keramzit, vysokopevní struska, expandovaný perlit, expandovaný vermikulit	Vulkanické tufy a tufity, pemza, křemelina	Křemen, živce, kalcit, čedič

3.3.1 Vliv vysokých teplot na cementový tmel

Při zahřívání cementového tmele se z jeho struktury odpařuje fyzikálně a chemicky vázaná voda. Voda volná se odpařuje jako první, dále pak voda v kapilárách a voda, která se nachází na povrchu pevných minerálů. Tyto vody jsou fyzikálně vázány a dokáží strukturu betonu poškodit jen při přeměně na vodní páru, která má větší objem. Při teplotě 200 °C se začíná uvolňovat chemicky vázaná voda z cementových hydrátů (dehydratace). Při následném odpařování chemicky vázané vody dochází k narušování mikrostruktury. CSH gely jsou tvořeny „listy“, které při odpařování vody ztrácejí svoji pevnost a soudržnost. Pravděpodobně 50 % pevnosti cementového tmele zajišťují síly mezi „listy“. Cementový tmel se do 200 °C rozpíná a při zvýšení teploty nad 200 °C začíná docházet ke smrštění zapříčiněného odchodem chemicky vázané vody a následnou tvorbou pórů.



Obrázek 1: Konstrukce modelu CSH fáze [38]

Tabulka 5: Chování betonu při zatěžování teplotou [2]

Teplota θ [°C]	Proces v betonu
20 – 100	Dochází k hydrataci (přeměna volně vázané vody na chemicky vázanou). Vznik hydrosilikátu vápenatého (C-S-H) a hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlandit.
100	Začíná dehydratace cementového tmele – uvolňování vázané vody za současného rozkladu hydrátů.
150	Vrcholí první fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH). 150 – 170°C rozklad sádry $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 171°C tavení polypropylenových vláken
200	Dochází k uvolňování fyzikálně vázané vody.
300	Pokračuje rozklad hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlandit) za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo (350°C)
500 – 600	Dochází k fázové přeměně křemene (v silikátovém kamenivu) z triklinické soustavy na soustavu hexahonální (β na α 573 °C). To vede společně s vlivem

	rozdílné teplotní roztažnosti k narušování vazeb mezi kamenivem a cementovým tmelem.
700 – 750	Vrcholí druhá fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH)
800	Hydraulické vazby v cementovém tmelu přecházejí na vazby keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při kterém vzniká oxid uhličitý (CO_2) - plynná látka rozrušující beton.
900	Totální dekompozice cementového tmelu.
1000	Začíná tavení některých složek betonu. Tvorba Wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).
1300	Celkové tavení materiálu.

3.3.2 Kamenivo v cementových kompozitech

Kamenivo je anorganický sytký materiál přírodního nebo umělého původu, používaný ve stavebnictví. Skládá se z jednotlivých zrn, která se do sebe zaklíní a vytvoří pevnou a mechanicky odolnou kostru.

Kamenivo se používá především jako plnivo do betonů a malt. Dále se využívá k tvorbě uměle ztuhnutých vrstev pro podloží dopravních staveb. Určujícími vlastnostmi pro kamenivo jsou například zrnitost, tvarový index, nadsítné a podsítné zbytky, mrazuvzdornost, trvanlivost, nasákavost, drtitelnost, množství odplavitelných částic, objemová hmotnost, měrná hmotnost a další.

Největší zastoupení v maltách má právě kamenivo (60 - 80 %), proto musí splňovat potřebné požadavky. Musí být brán zřetel hlavně na původ - mineralogické složení, které definuje, jak se bude plnivo chovat při extrémních teplotách.

Mineralogické složení je důležité především z hlediska objemových změn kameniva při teplotním zatížení. Při teplotním zatížení je důležitá teplota 573 °C, neboť při této teplotě dochází k modifikační přeměně křemene a zvětšování objemu kameniva. Z těchto důvodů je důležité, aby kamenivo obsahovalo co nejméně krystalické fáze křemene, aby objemové změny byly co nejmenší. U lehkého kameniva příznivě působí pórovitost kameniva na únik vody při zvýšené teplotě. Dále i modul pružnosti (poddajnost teplotně-dilatačním změnám polymer-cementové matrici) a tepelná vodivost lehkého kameniva. [11][12]

3.3.2.1 Vliv vysokých teplot na kamenivo

Jak bylo výše uvedeno, kamenivo zabírá v maltách a v betonu 60 – 80% jejich objemu malt a jednotlivé druhy kameniva mají zásadní vliv na odolnost při vysokých teplotách. Každý druh kameniva má odlišné reakce na zvýšenou teplotu. Nastávají zde fyzikálně – chemické změny. Chemická a fyzikální stabilita je při tepelném zatěžování malt zásadním faktorem. Pro zajištění tepelné stability při požáru je nutné správně určit druh kameniva (plniva).

Při tepelném zatěžování kameniva je nejsnadnější pozorovat jejich vizuální změnu. Dochází k rozpadu jednotlivých zrn a nastává barevná změna. Pro různé druhy kameniva jsou samozřejmě tyto změny odlišné.

Tabulka 6: Barevná změna kameniva při působení vysokých teplot [13]

Teplota	Barevná změna kameniva
250 – 300 °C	Křemenné kamenivo se zbarvuje do růžova až červena v důsledku oxidace sloučenin železa okolo 300 °C
450 – 500 °C	Zvýrazňuje se červené zbarvení křemenného kameniva až do teploty 600 °C Křemenné kamenivo se může zbarvit do šeda až bíla
800 – 1000 °C	Vápenaté kamenivo se zbarvuje do bíla

Se vzrůstající teplotou zvyšuje kamenivo svůj objem. Proto je teplotní roztažnost důležitou charakteristikou kameniva z hlediska jeho reakce na zvýšenou teplotu. Teplotní roztažnost je úzce spjata s mineralogickým a chemickým složením kameniva, protože jednotlivé minerály se v těchto hodnotách liší. Kromě teplotní roztažnosti mohou probíhat i metamorfnní přeměny jednotlivých minerálů.

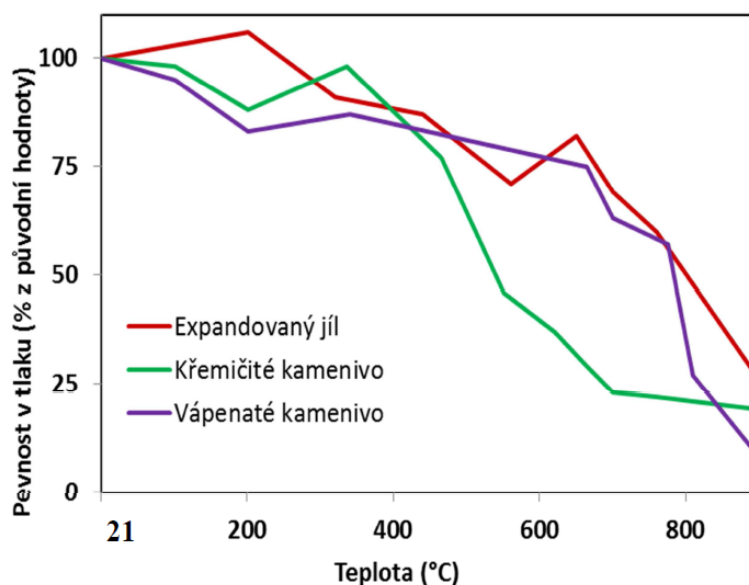
Například u křemene dochází ke změně při teplotě 573 °C a díky tomu se objem zvětší asi o 0,84 %. Problém nastává při zjišťování těchto změn. Tyto procesy jsou totiž reverzibilní a tak se změny křemenu po zchlazení vracejí do původního stavu. Proto je modifikační přeměny těžké detekovat. Níže na obrázku č. 2 je znázorněn vliv teploty na pevnost betonu v tlaku s různými typy kameniva. U křemičitého kameniva je patrný výraznější pokles pevností při teplotě nižší než 570 °C. Zde dochází ke konverzi křemene z modifikace β na modifikaci α spolu s působením změny objemu.

U vápence začíná teplotní nestabilita již při teplotě 600 °C a dochází k rozkladu uhličitanového kameniva na CaO a CO₂ při teplotě přibližně 800 °C. Při ochlazení mohou CaO formy hydratovat s výslednou expanzí až 40 %. [12]

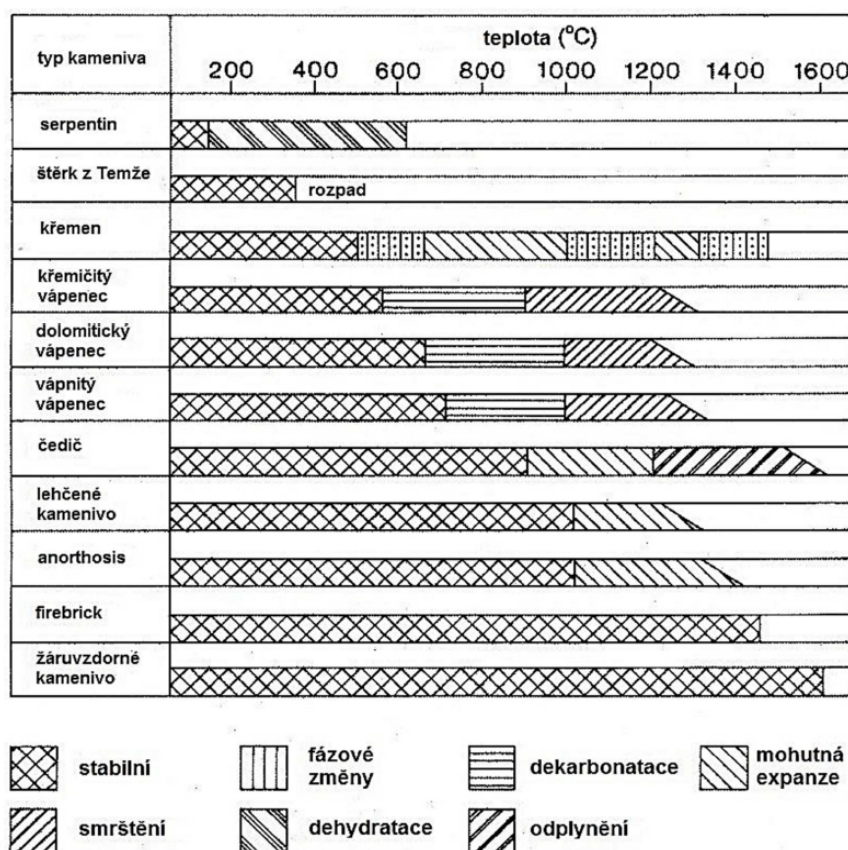
Tabulka 7: Koeficient lineární teplotní roztažnosti pro různé typy hornin [14]

Hornina	Koeficient lineární teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ /°C]
Žula	1,8 – 11,9
Čedič	3,6 – 9,7
Pískovec	4,3 – 13,9
Vápenec	0,9 – 12,2
Dolomit	6,7 – 8,6

Snížení pevnosti malt je daleko výraznější s použitím kameniva obsahujícího křemen, oproti vápenatému kamenivu, pokud je teplota nižší než 750 °C. Lepší chování u betonů s vápenatým kamenivem při vysokých teplotách je vysvětlováno vyšším množstvím tepla, které se spotřebuje při endotermickém rozkladu na oxid uhličitý při teplotě asi 800 °C.

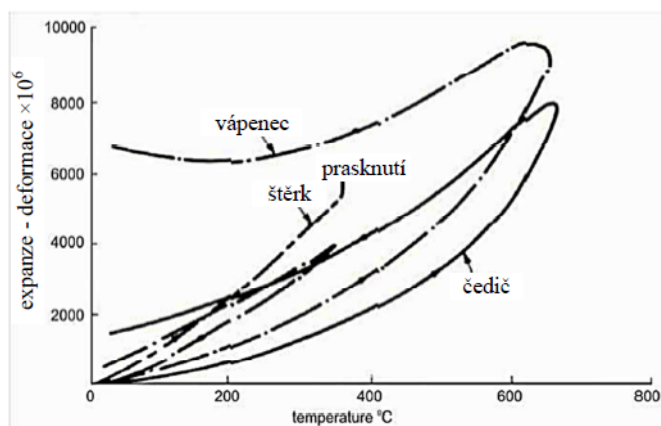


Obrázek 2: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku způsobené zvýšením teploty [19]



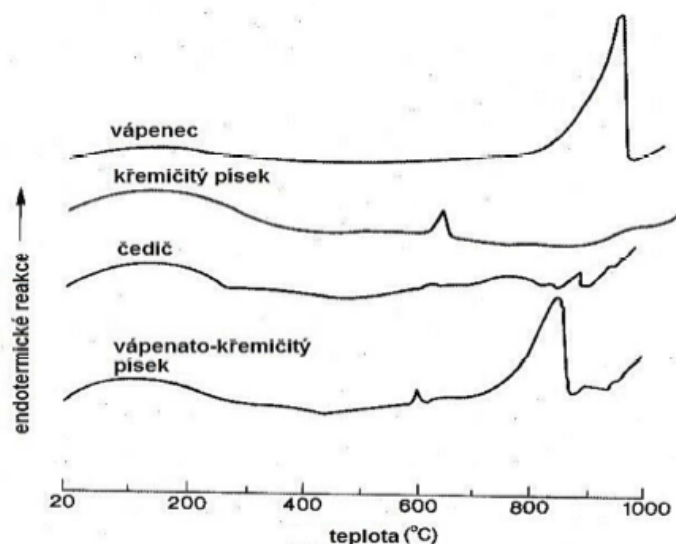
Obrázek 3: Stabilita a procesy probíhající v průběhu zahřívání kameniva [15]

Při výběru kameniva odolného vysokým teplotám je vhodné vybírat kamenivo s nízkou teplotní roztažností a zanedbatelným zbytkovým přetvořením při chlazení (viz Obr. 3). Kamenivo by nemělo vlivem vysoké teploty měnit své mechanické vlastnosti ani svůj objem. Případně by mohlo docházet ke změnám v takovém měřítku, aby nebyly příliš výrazně v negativní míře ovlivněny vlastnosti výsledného kompozitu. Teplotní roztažnost plniva a matrice by tedy měly být co nejpodobnější, v ideálním případě shodné. [28] [29]



Obrázek 4: Teplotní přetvoření vybraných kameniv [16]

V důsledku reakce kameniva na vysoké teploty je vhodné zvolit do betonu kamenivo s nízkou tepelnou roztažností a zanedbatelným zbytkovým přetvořením. Na Obr. Č. 4 jsou zobrazeny křivky teplotního přetvoření pro štěrky, vápenec a čedič. Kameniva, která vykazují tepelnou stabilitu, nemají žádné vrcholy podél DTA a TGA křivek (Obr. č. 5). Nejvhodnější přírodní kameniva jsou čedič, diabas nebo andezit. Nevhodná jsou křemenná kameniva a žula.



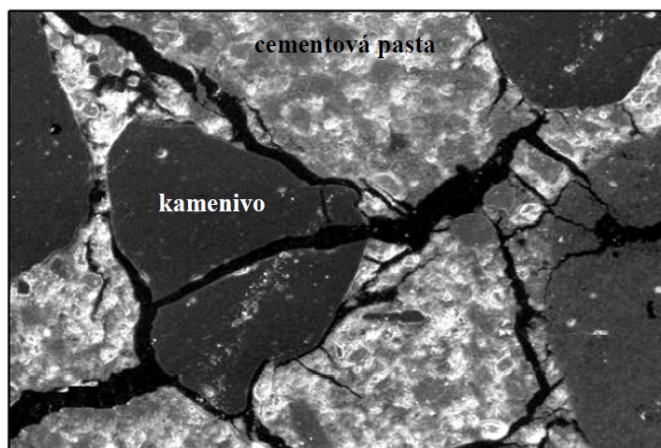
Obrázek 5: Termická analýza kameniv získaný při nárůstu teploty $0\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ v atmosféře dusíku [16]

3.3.3 Kompozitní působení kameniva a cementového tmele namáhaných vysokou teplotou

Malta a beton je kompozitní materiál tvořen ze dvou hlavních složek, cementového tmele a kameniva. Cementová malta v sobě obsahuje systém pórů. Stěny pórů jsou při nárůstu teplot namáhány tlakem od expandující vodní páry. Objem pórů se může v průběhu zvyšování teplot měnit, protože může docházet k dehydrataci cementového tmele (snižování objemu), vypalování výztužných vláken, tvorbě trhlin nebo jejich ucpávání (vznik krystalických novotvarů).

Soudržnost cementového tmele a kameniva závisí i na specifickém povrchu kameniva. Čím větší je specifický povrch, tím lepší bude jejich soudržnost.

Zahříváním kompozitu se kamenivo zvětšuje a cementový tmel smršťuje, dochází k praskání a následné ztrátě pevností.



Obrázek 6: Struktura betonu zahřátého na 600 °C, beton složený z křemičito – vápenatého kameniva [17]

Na tepelnou odolnost malt a betonů působí příznivě i lehké kamenivo na bázi expandovaného jílu, které je objemově stabilní až do teplot 1050 °C a nedochází v něm k modifikačním přeměnám. Malty a betony s expandovaným jílem vykazují lepší tepelně izolační vlastnosti než s běžným kamenivem. [18]

Použití mikropřniva se pro tepelně odolné malty nedoporučuje. Cementová matrice je zhutněna a sníží se obsah pórů. Poté může docházet k explozivnímu odprýskávání.

3.3.4 Polypropylenová vlákna

Explozivní odprýskávání a celkově poruchy cementových kompozitů při extrémních teplotách lze omezit pomocí polymerních vláken. Vlákná se okolo teploty 160 °C vytaví a vznikne systém kapilárních dutin. Expandovaná vodní pára může touto otevřenou kapilární pórovitou strukturou unikat a dojde tak ke snížení vnitřního napětí, které by případně mohlo vést k narušení struktury kompozitu. Pomocí této metody se dokáže zamezit vzniku trhlinek a odprýsknutí povrchových vrstev malt.

3.4 Přírodní kamenivo

3.4.1 Magmatická tvorba minerálů

Za určitých podmínek mohou v zemském nitru vznikat lokálně horninové taveniny (magma), jejichž teplota je závislá na jejich chemickém složení. Teploty se většinou pohybují v rozmezí 650 až 1250 °C. Taveniny vystupují buď na zemský povrch a vznikají tak výlevné vyvřelé horniny nebo zůstávají ve větších hloubkách a tím vznikají hlubinné vyvřelé horniny.

První krystaly vyvřelé horniny vznikají při ochlazení taveniny z vysokých teplot. V důsledku klesající teploty dochází ke krystalizaci, při které vznikají nejdůležitější magmatické minerály (olivín, pyroxeny, živce, křemen).

3.4.2 Minerály sedimentárního původu

Zemský povrch je vystaven různým rušivým vlivům, které označujeme jako zvětrávání. Díky fyzikálním a chemickým procesům a působením organismů se krystaly rozpouštějí, mění a transportují (naleziště zlata, diamantů). Voda dopravuje látky, které se při zvětrávání rozpouštějí (soli a uhličitany), do moře. Při vypařování lagun rozpuštěné látky znovu krystalizují a tvoří vysrážené horniny.

3.4.3 Minerály metamorfního původu

Žhavé tekuté magma působí na jednotlivé vrstvy zemské kůry, do nichž proniká. Přeměňuje starší horniny (hlavně usazené) pomocí chemických reakcí, vysokých teplot a tlaku. Vznikají přeměněné horniny a minerály, které mají jiný vzhled a fyzikální i chemické vlastnosti. [24]

3.4.4 Příklady přírodního kameniva odolávajícího vysokým teplotám

3.4.4.1 Drcená pemza

Přírodní pemza vzniká při vulkanických erupcích a díky plynům uvolňovaným z přírodního magmatu způsobujících napětí vyvrhovaných částic. Objemová hmotnost pemzy bývá 300 - 600 kg/m³ a pórovitost je cca 80 %. Tento materiál odolává teplotám až 600 °C a ztrácí jen 5 % ze své původní pevnosti. [32]

3.4.4.2 Diatomity (křemelina a trypl)

Diatomity (rozsivkové zeminy) vznikaly z křemičitých schránek jednobuněčných ve vodě žijících řas, zvaných rozsivky. Křemičité schránky mají různou velikost a tvar a jsou prostoupeny mikroskopickými póry. Volnou sedimentací vznikala ložiska nepatrně zpevněné zeminy (křemelina).

Pórovitost křemeliny je 10 – 30 %. Kvůli vysoké pórovitosti se vyznačuje také vysokou nasákavostí, ale i nízkou tepelnou vodivostí. Teplota tání se pohybuje v rozmezí 1400 °C až 1750 °C. [32]

Dalším kamenivem používaným v kompozitech, určených pro materiály odolné proti vysokým teplotám, je například vermiculit, perlit a lupek (šamot). Tyto materiály jsou více popsány v kapitole 3. 7. 1.

3.5 Umělé pórovité kamenivo

Umělé kamenivo se díky své pórovitosti používá do lehkých betonů. U konstrukčních lehkých betonů se spojuje nosná funkce s funkcí izolační. Tepelně izolační vlastnosti betonu s lehkým kamenivem jsou závislé na jeho objemové hmotnosti a na dalším použitém kamenivu. S vyšší objemovou hmotností se zvyšuje pevnost, ale zvyšuje se i tepelná vodivost a tím i riziko kolapsu konstrukce při požáru.

Při použití lehkého kameniva v betonové směsi se musí nechat kamenivo nasáknout, aby nedošlo k odebrání záměsové vody určené k hydrataci cementu. Tato vlhkost je pak postupně uvolňována v průběhu zrání betonu a dochází tím ke zvýšení pevnosti cementového tmele. V případě požáru nastává problém, protože voda se mění v páru a při nízké pórovitosti cementového tmele nemá kudy unikat a zvyšuje nebezpečí explozivního odprýskávání.

3.5.1.1 Škvára

Škvára je zástupcem pórovitého kameniva vzniklého zpracováním průmyslového odpadu. Vzniká při spalování různých druhů kamenného a hnědého uhlí, hořlavých břidlic a jiných pevných paliv a představují zpevnělé, ale nikoli úplně roztavené minerální zbytky uvedených pevných paliv. Nejdůležitějším činitelem je druh výchozího paliva a množství jeho zbytků ve škváře. Objemová hmotnost škvár volně sypaných je 400 až 1000 kg/m³.

Odolnost škváry proti vysokým teplotám je závislá na druhu spalovaného materiálu. Škvárový beton je ohnivzdorný a snáší zpravidla podle druhu použité škváry a cementu působení teploty kolem 250 °C. [32]

3.5.1.2 Agloporit

Jako agloporit označujeme skupinu pórovitých kameniv vyráběných slinováním krátkodobým výpalem na aglomeračních roštech. Jako surovina se využívá létavý popílek vznikající spalováním černého a hnědého uhlí, který je spékáný do syrových sbalků při teplotách 1100 až 1250 °C.

Pevnost stlačení ve válci činí 2 až 8 MPa. Pórovitost zrn agloporitu bývá 40 až 65 %. Objemová hmotnost bývá 600 až 1050 kg/m³ a nasákavost bývá velmi rozdílná, většinou 8 až 30 %. Součinitel tepelné vodivosti je 0,12 až 0,16 W/(m.K).

3.5.1.3 Keramzit

Dobré vlastnosti proti vysokým teplotám má kamenivo keramzit (Liapor), které je stabilní do teplot okolo 1000 °C. Při této teplotě je stabilní i jeho objem. Keramzit zajišťuje dobré izolační vlastnosti díky velkému množství pórů. Kamenivo z expandovaných jílu vykazuje vyšší požární odolnost a lepší tepelně izolační vlastnosti, což zpomaluje zahřívání výztuže a její následné poškození. [31]

3.6 Žáruvzdorné materiály

Žáruvzdorné materiály se definují jako nekovové polykrystalické materiály, které dokážou svými chemickými a fyzikálními vlastnostmi odolat vysokým teplotám minimálně 1500 °C. Žáruvzdornost je zajištěna převážně oxidy, jejich sloučeninami a směsí s vysokou teplotou tání (MgO, CaO, ZrO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃ a SiO₂). Mezi používané neoxidové suroviny lze zařadit karbid křemíku SiC a uhlík v různých formách. [20]

Tabulka 8: Rozdělení netvarových žáruvzdorných výrobků podle chemického složení [21]

Skupina	Popis
Hlinitokřemičité výrobky	Skládají se převážně z oxidu hlinitého, křemičitého a hlinitokřemičitanů
Bazické výrobky	Skládají se převážně z magnézie, dolomie, oxidu vápenatého, magneziochromu, chromové rudy a spinelu
Speciální výrobky	Skládají se převážně z jiných oxidů a neoxidů než první dvě skupiny
Výrobky obsahující uhlík	Skládají se převážně z kameniv podle ostatních tří skupin a obsahují více než 1 % uhlíku

3.6.1 Žáruvzdorné materiály v soustavě $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$

Nejznámějším a nejvíce vyráběným materiálem je šamot. Jedná se o výrobek z jílu, který je vypálen jako ostřivo. Podle použité suroviny se mění kvalita. Obsah Al_2O_3 se pohybuje v rozmezí 15 – 46 % a SiO_2 nad 65 %. Základní surovinou jsou žáruvzdorné jíly (tzv. lupky) s tvrdou vrstevnatou konzistencí zpevněné geologickým tlakem. Výpal probíhá v tunelových pecích při teplotě 1300 až 1450 °C.

Šamotový materiál se dá využít v různých oborech stavebnictví. Tvarové výrobky se využívají pro vyzdívky a zrnité šamotové směsi jsou určeny pro malty, na stavbu pecí nebo pro monolitické vyzdívky. Hlavním kritériem kvality je nejčastěji žáruvzdornost, obsah Al_2O_3 , pórovitost a pevnost.

Žáruvzdornost se dá zvýšit i díky pórovité struktuře materiálu. V pórovitém prostředí je přenos tepla pevnou látkou znesnadněn větším počtem přechodových odporů. [22]

Pórovitost se v materiálu vytváří:

- Přídavkem vyhořívajících příměsí – uhlí, antracit, koks, dřevěné uhlí, piliny.
- Naplněním vzduchem – pomocí pěnotvorné látky
- Vývinem plyných komponent chemickou reakcí
- Přídavkem těkavých látek
- Přidáním lehčeného plniva – pěnový polystyren
- Kombinací různých způsobů

$\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ se využívá díky své snadné dostupnosti a také díky své malé měrné tepelné vodivosti v systému. Dále se využívají příměsi CaO a MgO , oxidy železa, TiO_2 , alkálie. Tyto příměsi mají většinou za úkol snížit klasifikační teplotu. [22]

Přírodní suroviny se v průmyslu využívají do teploty nepřekračující 1000 °C. Mezi nejběžnější patří výrobky z křemeliny tvarované do bloků, s přídavkem jílu a spalitelných látek a vypalované na požadovaný stupeň zpevnění, s nepřímou pórovitostí (pro lepší izolační schopnosti).

Vermiculit je hořečnato - železitá slída s nízkou objemovou hmotností (80-120 kg/m³), nízkou tepelnou vodivostí (W/m.K) a poměrně vysokou teplotou tání (1240 – 1430 °C). Je šetrný k životnímu prostředí, chemicky inertní a odolný. [23] Při zatížení vysokou teplotou expanduje a z původní celistvé látky vzniká dehydratací velké množství tenkých šupinek,

oddělených vzduchovými mezerami. Materiál je však stále natolik kompaktní, že je z něho možné připravit zrnitou směs pro žárobetony.

Perlit je přírodní materiál podobný právě vermiculitu. Perlitem označujeme hydratované vulkanické sklo tvořené jemnými perličkami s koncentrickými trhlinami. Při dehydrataci kolem 1150 °C dochází k expanzi. Pomocí expanze dokážeme dosáhnout vysoké pórovitosti (až 85 %). [22]

Tabulka 9: Přehled běžných druhů žárovzdorných hmot, jejich složení a teplota použití [25]

Druhy žárovzdorných hmot	Výchozí suroviny	Minerální složky produktu	Chemický obsah hlavních surovin	Použití [°C]
Dinas vápenný (silika)	Křemence, silicity + do 5 % CaO	Cristobalit, tridymit, wollastonit	Nad 90 % SiO ₂ , pod 5 % CaO	Do 1710
Křemenné sklo	Křemen žilný	Amorfní SiO ₂	Nad 99 % SiO ₂	Do 1710
Šamot křemenný	Kaolin, jílovec, jíl, křemenný písek	Mullit, cristobalit, tridymit, křemen	10 – 30 % Al ₂ O ₃	Do 1670
Šamot jílový (normální)	Žárovzdorné jíl, jílovce	Mullit	35 – 45 % Al ₂ O ₃	Do 1750
Šamot vysoce hlinitý	Žárovzdorné jíl, jílovce, hydroxidy a oxidy Al, minerály Al ₂ SiO ₅	Mullit, cristobalit, korund	45 – 60% Al ₂ O ₃ 60 – 75% Al ₂ O ₃ Nad 75 % Al ₂ O ₃	Do 1840 Do 1900 Do 1950
Mullit	Hydroxidy a oxidy Al, sillimanit, andalusit, kyanit	Mullit, cristobalit, korund	60 – 85% Al ₂ O ₃	Do 1960
Korund	Hydroxidy a oxidy Al	Korund, mullit	Nad 85% Al ₂ O ₃	Do 1960
Magnezit (chrommagnesit) běžný spinelový	Magnezit slinutý Magnezit – chromit+ Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Cr ₂ O ₃	Periklas Periklas Spinel	Nad 80% MgO 30 – 70% MgO 10 – 30% Cr ₂ O ₃	Do 1700
Dolomit s vázaným CaO	Dolomit	Kalcium silikáty, periklas, Cao	Kol. 40% CaO	Do 1900
Dolomit s volným CaO (cementy)	Dolomit, vápenec, křemelina, magnezit, krevel, žárovzdorný jíl	Periklas, wollastonit, cristobalit, di-tri kalcium silikáty	Cca 35% MgO Příměsi 15 – 25%	Do 1780 Do 1900 – 2000
Chromitové	Chromit	Chromit	Nad 80% Cr ₂ O ₃	Do 2000
Karborundové (Si-karbidové) normální	Karborundum	Karbid křemíku	Do 80% C	Do 2200
Karborundové vysoce hodnotné (rekrytalované)	Žárovzdorný jíl organické tmely	Mullit, cristobalit	Nad 80% C	Do 1700

Uhlíkové keramické	Grafit, žárovzdorné jíly	Uhlík, mullit, cristobalit	30 - 80% C	Do 1700 – 1900
Uhlíkové rekrytalované	Grafit	Uhlík	80 – 100% C	Do 2500 (v redukčním prostředí)
Uhlíkové kokové	Kok	Uhlík (mikroskopický)	Nad 90% C	Do 2500 (v atmosféře)

Na základě popsaných informací bylo pro praktickou část zvoleno několik druhů kameniv. Byla vybrána přírodní hutná kameniva (čedič, amfibolit, živcový písek), uměle vyráběná pórovitá kameniva (liapor), kamenivo vyráběná z alternativních surovin (agloporit, škvára) a žáruvzdorná kameniva (lupek). Přírodní hutná kameniva (čedič, amfibolit) mají vhodný součinitel teplotní roztažnosti a odolnost proti tavení. Umělá pórovitá kameniva zajišťují dobré izolační vlastnosti díky velkému množství pórů, což zpomaluje zahřívání betonu. Alternativní suroviny jsou výhodné hlavně nízkou pořizovací cenou.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této práce je rozdělena do dvou základních částí. Dominuje studium vlastností kameniva a to jak po stránce základních parametrů, tak vlastností fyzikálně-chemických a mikrostruktury. Ve druhé části byli vybráni dva zástupci testovaných plniv, kteří byli aplikováni do kompozitů na bázi polymercementové matrice. Důraz byl kladen na odolnost vůči extrémním teplotám.

4.1 Metodika práce

Kamenivo:

- Výběr vhodných plniv byl realizován pouze v teoretické rovině na základě rešerší z odborných článků a již dosažených výsledků. Vybraná kameniva byla podrobena teplotnímu zatížení na různé teplotní stupně a následně testována, s cílem vyhodnotit kamenivo nejlépe odolné vůči vysokým teplotám.
- Vzorky byly tepelně zatíženy na různé teplotní stupně a poté byly testovány jejich vlastnosti. Teplotní zatížení bylo provedeno v laboratorní peci, kam byl vzorek umístěn v žáruvzdorné nádobě. Teplotní zatěžování kameniva probíhalo při teplotách 600 °C, 1000 °C, 1200 °C a vybrané vzorky při 1400 °C. Po dosažení této teploty probíhala teplotní výdrž po dobu 90 minut. Teplotní nárůst byl 10 °C/min. Po postupném samovolném ochlazení na laboratorní teplotu $\pm 20^\circ\text{C}$, které probíhalo v peci, byly vzorky podrobeny zkouškám.
- U jednotlivých vzorků byly pozorovány změny jejich vlastností před a po zatížení vysokou teplotou. Před samotným výpalem se vzorek vždy nechal vysušit v laboratorní sušárně při teplotě $100 \pm 5^\circ\text{C}$. Dále byly u každého kameniva vyzkoušeny vlastnosti po rychlém ochlazení z 1000 °C. Vzorek byl zatížen teplotou 1000 °C s 90 minutovou výdrží. Poté byl vyjmut z pece a přesypán do studené vody, kde došlo k jeho rychlému („šokovému“) ochlazení.
- Po ochlazení vzorků bylo provedeno makroskopické pozorování a testování základních parametrů – síťový rozbor, nasákavost, měrná hmotnost, objemová hmotnost, sypaná hmotnost, mezerovitost, pevnost stlačením ve válci.
- Dále bylo provedeno analyzování fyzikálně-chemických vlastností – mineralogický rozbor pomocí XRD.

- Pozorování mikrostruktury – SEM

Kompozity:

- Na základě předchozích zkoušek a analýz byla vybrána a provedena selekce vhodných složek malt.
- Expoziční podmínky pro testované vzorky byly obdobné jako u kameniva. Po 28 dnech zrání byla tělesa exponována v extrémních teplotních podmínkách do teploty 1200 °C a chlazena volně v laboratorní peci.
- V další části byly testovány základní materiálové vlastnosti zkoumaných malt - hmotnost, objemová hmotnost, pevnost, objemové změny, změny rozměrů.

4.2 Výběr vhodných zástupců plniv (kameniv)

Pro experimentální část práce bylo vybráno několik typů kameniva. Přírodní kamenivo bylo zastoupeno čedičem, amfibolitem a živcovým pískem. Z umělých kameniv byl vybrán agloporit, keramzit (Liapor), lupek. Posledním kamenivem byla škvára, která je vedlejším produktem ze spalování odpadu. Tento výběr proběhl na základě zhodnocení teoretické části.

Lupek představuje plnivo, které je schopno odolat vysokým teplotám bez změny svých původních vlastností. Ale kvůli své vysoké ceně se používá jen pro speciální práce. Jeho vlastností se využívá v celé řadě průmyslových oborů – pro výrobu žáruvzdorných cihel, žárobetonů, forem ve slévárnách atd. Lupek byl zkoušen kvůli možnému porovnání s ostatními vzorky. Naopak škvára je zde jako zástupce recyklovatelného kameniva s nestálými vlastnostmi, které se liší v závislosti na druhu spalovaného odpadu. Čedič a amfibolit jsou zástupci přírodních hutných kameniv s odolností proti vysokým teplotám.

4.3 Zkušební metody a postupy

4.3.1 Příprava vzorků – kamenivo

Jednotlivé zkoušky na sadě kameniva před a po teplotním zatížení byly provedeny vždy stejně.

Referenční vzorek

1. Homogenizace většího objemu kameniva
2. Odběr vzorku kameniva o objemu 20 litrů
3. Uložení do plastových nádob
4. Vysušení vzorku kameniva v laboratorní sušárně při teplotě 100 ± 5 °C na 24 hodin
5. Testování jednotlivých vlastností kameniva

Před teplotním zatěžováním

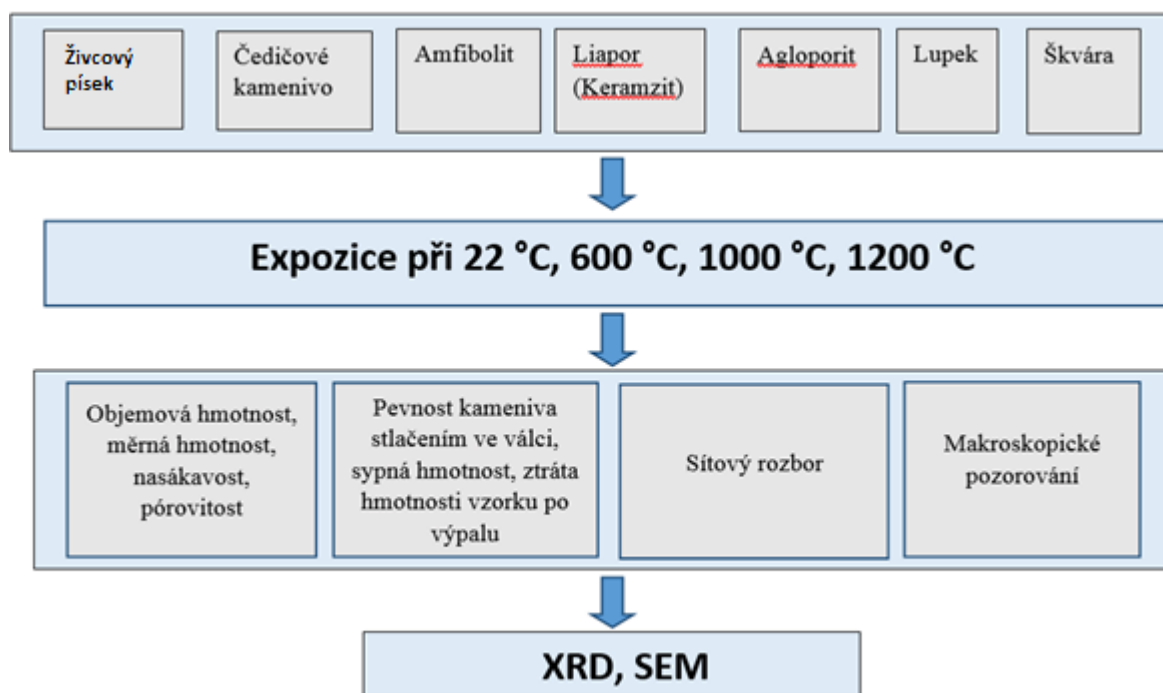
1. Odběr kameniva v množství asi 3 litry
2. Vysušení vzorku kameniva v laboratorní sušárně při teplotě 100 ± 5 °C na 24 hodin
3. Zvážení kameniva
4. Makroskopické pozorování

Po teplotním zatěžování a vychladnutí

1. Zvážení kameniva
2. Makroskopické pozorování
3. Provedení síťového rozboru
4. Testování jednotlivých vlastností kameniva

Po teplotním zatěžování a rychlém ochlazení

1. Makroskopické pozorování
2. Provedení síťového rozboru
3. Testování jednotlivých vlastností kameniva



Obrázek 7: Schéma postupu zkoušení kameniv

4.3.2 Zkoušení kameniva

4.3.2.1 Sledování změn pomocí pozorovací pece

Před započítím testů a analýz kameniv bylo nutné stanovit maximální teploty, kterým je každý typ kameniva schopen odolat. K tomuto účelu byla využita pozorovací pec, tj. zařízení schopné ohřevu na požadovanou teplotu (v tomto případě až 1400 °C). Před pozorovacím otvorem pece je umístěn digitální fotoaparát, který je i s pecí propojen s PC. Tímto je umožněn záznam snímků při konkrétní požadované teplotě. Nárůst byl zvolen 35 °C.min⁻¹ a následně probíhala izotermní výdrž. Chlazení probíhalo pozvolně v peci. Při zvyšování teploty a izotermní výdrži byly sledovány případné probíhající změny, tj. objemové (expanze či smrštění), vznik trhlin, tavení atd. Po vyjmutí vychlazených vzorků z pece bylo provedeno makroskopické pozorování zrn kameniva.

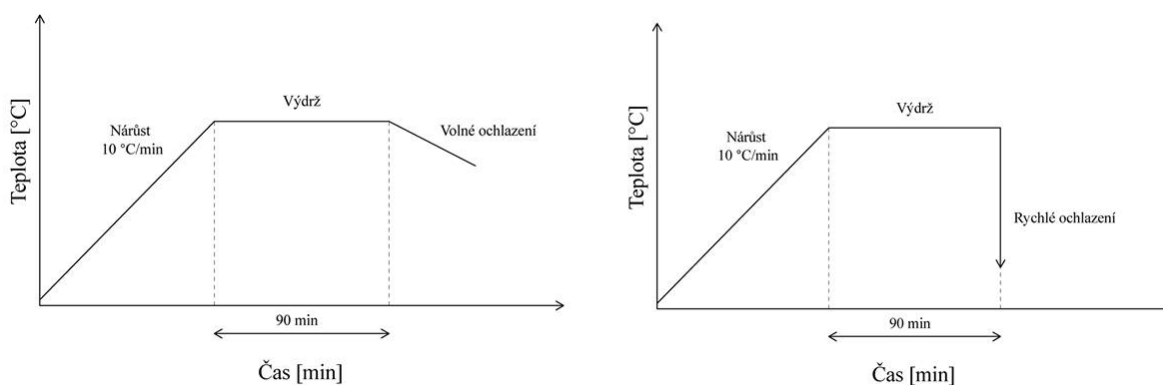
4.3.2.2 Teplotní expozice vzorků

Výpal kameniv probíhal v laboratorní peci na teplotu 600 °C, 1000 °C, 1200 °C. Po dosažení teploty byla nastavena 90 minutová izotermní výdrž. Poté vzorek kameniva postupně chladl na laboratorní teplotu.

Dále byl vytvořen další vzorek, který se vypaloval na teplotu 1000 °C, ale vzorek byl ochlazen rychle, ve vodní lázni o teplotě cca 18 °C.



Obrázek 8: Laboratorní pec pro teplotní zatížení vzorků



Obrázek 9: Teplotní zatěžování vzorku s volným ochlazováním a rychlým ochlazením



Obrázek 10: Příprava vzorku rychle ochlazeného

4.3.2.3 Pevnost stlačením ve válci

Dle normy ČSN EN 1097-2 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení.

Pevnost kameniva ve válci byla zjišťována na referenčních nezatížených vzorcích i na vzorcích teplotně zatížených.

Postup zkoušky

Do čisté ocelové nádoby se po rysku vloží dostatečné množství kameniva. Povrch kameniva se zarovná a přikryje horní částí nádoby. Poté se vyzkouší ve zkušebním zařízení pevnost kameniva pomocí stlačení v lise.



Obrázek 11: Provedení zkoušky pevnosti kameniva stlačením ve válci

4.3.2.4 Objemová hmotnost

Dle normy ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti.

Objemová hmotnost zrn a nasákavost byly zjišťovány na referenčních nezatížených vzorcích i na vzorcích teplotně zatížených. Spolu se zvyšujícím se teplotním zatížením by mělo dojít ke změně pórovitosti jednotlivých zrn kameniva nebo k jejich narušení. To by se mělo projevit na změně objemové hmotnosti a nasákavosti.

Postup zkoušky

- pro zrna kameniva propadlá zkušebním sítím 4 mm a zachycená na zkušebním síti 0,063 mm

Ze vzorku kameniva se odstraní drobné částice pomocí síta 0,063 mm a odstraní se částice větší než 4 mm. Poté se vzorek vloží do pyknometru a jemným převalováním a třepáním

se odstraní vzduchové bubliny. Pyknometr se postaví do vodní lázně po dobu $(24 \pm 0,5)$ h. Po skončení nasakování se s pyknometrem opět třepe a převaluje. Pyknometr se doplní vodou a zváží se. Vzorek se z pyknometru vyprázdní na tác a vystaví se slabému proudu horkého vzduchu, aby se odstranila povrchová vlhkost. Povrchově osušené kamenivo se zváží a poté se v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě 110 ± 5 °C vysuší do ustálené teploty.

Objemová hmotnost zrn

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} [\text{kg/m}^3]$$

nasákavost zrn

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} [\text{kg/m}^3]$$

M_1 - hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva [g]

M_2 - hmotnost pyknometru obsahující vzorek kameniva nasyceného vodou [g]

M_3 - hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou [g]

M_4 - hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážka [g]

4.3.2.5 Měrná hmotnost

Dle normy ČSN EN 1097 -7 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška.

Postup zkoušky

Suchý a čistý pyknometr se zváží a poté se do něj vsype jemně mletý vzorek a znovu se zváží. Přidá se kapalina, aby byl celý vzorek ponořen. Po odstranění vzduchu (dle normy) se pyknometr s navážkou a naplněný kapalinou opět zváží.

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}} [\text{kg/m}^3]$$

m_0 - hmotnost prázdného pyknometru se zátkou [g]

m_1 - hmotnost pyknometru se zkušební navážkou fileru [g]

m_2 - hmotnost pyknometru se zkušební navážkou fileru [g]

V - objem pyknometru [ml]

ρ_I - hustota kapaliny [Mg/m^3]

4.3.2.6 Sypná hmotnost

Dle normy ČSN EN 1097 - 3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva.

Postup zkoušky

Pomocí této zkoušky se zjistí hmotnost vysušeného kameniva v odměrné nádobě a vypočte se sypná hmotnost volně sypaného kameniva. Zváží se prázdná a suchá nádoba, která se pomocí lopatky přeplní kamenivem. Opatrně se odstraní přebytečné kamenivo a povrch se zarovná. Nádoba se zváží.

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} [\text{kg/m}^3]$$

m_2 - hmotnost nádoby se zkušební navážkou [kg]

m_1 - hmotnost prázdné nádoby [kg]

V - objem nádoby [l]

4.3.2.7 Makroskopické pozorování

Makroskopické pozorování bylo realizováno na referenčních nezatížených vzorcích i na vzorcích teplotně zatížených. Záměrem tohoto pozorování byla identifikace vzniku případných poruch jednotlivých zrn kameniva – rozpad, trhliny atd. Jednotlivá zrna by se měla rozpadat nebo by na nich měla vzniknout trhlina. Pozorování bylo zaznamenáno na fotografické snímky. Díky těmto snímkům je možné vyhodnotit barevné změny jednotlivých druhů kameniva. Barevná změna by mohla znamenat nevratné modifikační přeměny minerálů jednotlivých druhů kameniva.

4.3.2.8 Úbytek hmotnosti

Každý vzorek byl před výpalem zvážen a teprve poté umístěn do pece. Po dokončení výpalu se vzorek těsně po vyjmutí z pece opět zvážil a určila se ztráta hmotnosti, která nastala v důsledku teplotního zatížení. Ztráta hmotnosti by mohla mít souvislost s modifikační přeměnou minerálů a rozkladem jednotlivých fází.

4.3.2.9 Sítový rozbor

Vzorek dle normy ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor.

Podstata zkoušky

Kamenivo se roztřídí pomocí sady normovaných sít do jednotlivých zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Hmotnost částic zachycených na sítích se uvádí v procentech k počáteční hmotnosti vzorku.

Postup zkoušky

Připraví se zkušební navážka, která se silou promíchá v nádobě s dostatečným množstvím vody. Cílem promíchání je uvolnit a oddělit jemné částice. Vypraný a vysušený (105 ± 5 °C) materiál se vysype na sloupec sít uspořádaných od horního síta k dolnímu sítu podle zmenšující se velikosti otvorů. Se sloupcem sít se mechanicky třese. Jednotlivá síta se poté váží a zaznamenává se váha zachyceného materiálu na nich.

Vypočítá se zachycená hmotnost na každém sítu jako procento k původní suché hmotnosti. Dále se vypočítá procento propadů na každém sítu z původní suché navážky.

4.3.2.10 XRD - RTG difrakční analýza

Tato metoda využívá interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu.

Pomocí XRD difrakční analýzy je možné stanovit přítomnost krystalických fází ve vzorku. U každé sady kameniva (referenční i teplotně zatížena) bylo snahou identifikovat mineralogické složení jednotlivých vzorků. A objasnit tím mineralogické přeměny v různém teplotním zatížení.



Obrázek 12: Přístroj pro XRD difrakční analýzu

4.3.2.11 SEM - Rastrovací elektronový mikroskop

Rastrovací elektronový mikroskop MIRA3 se schottkyho autoemisní katodou je určený pro snímání vodivých i nevodivých preparátů ve vysokém rozlišení. Pro tuto diplomovou práci byl vzorek zvětšení 500x, 2000x, 5000x, 15000x.



Obrázek 13: Rastrovací elektronový mikroskop

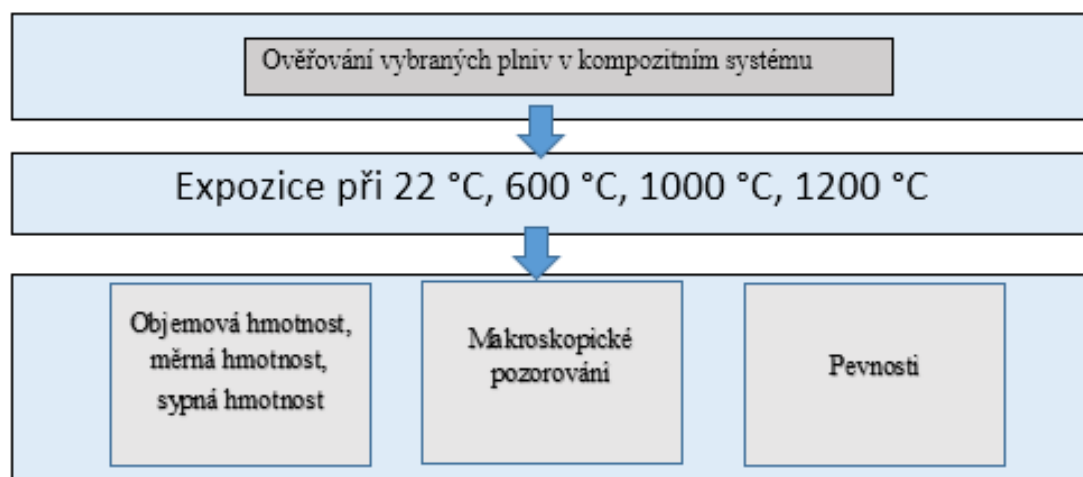
4.3.3 Testování malt

Ověření malt s vysokou odolností vůči vysokým teplotám probíhalo na dvou sériích vzorků, které byly složením podobné. Receptury se lišily jen použitím substituční složkou pojiva v podobě vysokopecní strusky nebo vysokoteplotního popílku. Vyrobená zkušební tělesa byla zatěžována podle dané teplotní křivky s izotermickou výdrží na různé teploty. Teplotní zatěžování bylo provedeno v laboratorní peci. Na tepelně zatížených vzorcích byly zjišťovány fyzikálně - mechanické vlastnosti.

Zkušební tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byla zatěžována na teploty 600 °C, 1000 °C, 1200 °C. Teplota se zvyšovala o 10 °C za minutu a vzorek byl zatěžován po dobu 90 minut. Chlazení probíhalo pozvolně. Na vzorcích byly před a po teplotním zatížení provedeny zkoušky: Stanovení rozměrových změn, objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku. Zkoušky se prováděly na vzorcích starých 28 dní.

4.3.4 Příprava vzorků – malta

Pomocí míchadla, simulující přípravu klasické sanační malty na stavbě po dobu cca 4 minut, byla namíchána malta. Ta se plnila do forem a hutnila. Po uplynutí 28 dnů se provedla expozice malt vysokými teplotami a poté se testovaly fyzikálně – mechanické parametry.



Obrázek 14: Schéma postupu zkoušení malt

4.3.4.1 Pevnost v tlaku

Dle normy ČSN EN 12 190 – Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt.

Postup zkoušky

Vložení vzorku mezi očištěné tlačné plochy a následné zatěžování vzorku.

$$F_c = F/A_c \text{ [MPa]}$$

F – maximální zatížení [N]

A_c – zkoušená plocha o velikosti 1600 mm²

Stanovení pevnosti v tlaku bylo provedeno na zlomcích trámů po stanovení pevnosti v tahu ohybem trámů 40 x 40 x 160 mm.

4.3.4.2 Pevnost v tahu za ohybu

Dle normy ČSN EN 12390 – 5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.

Postup zkoušky

Vzorek se vloží mezi očištěné tlačné plochy. Zkouška se provede rychlostí zatěžování 0,04 – 0,06 MPa/s. Výsledná hodnota pevnosti v tahu ohybem se zaokrouhlí na 0,1 MPa.

$$f_b = \frac{3.F.l}{2.b.h^2} \text{ [MPa]}$$

F – maximální zatížení [N]

l – 3d-vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

b – šířka zkušebního tělesa [mm]

h – výška zkušebního tělesa [mm]

Stanovení pevnosti v tahu ohybem bylo provedeno na zkušebních trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.



Obrázek 15: pevnost v tlaku za ohybu na zkušebním vzorku

4.3.4.3 Objemová hmotnost a změny rozměrů ztvrdlé matly

Objemová hmotnost byla stanovena dle normy ČSN EN 1015-10 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty.

Postup zkoušky

Objemová hmotnost ztvrdlé malty je stanovena na sadě zkušebních trámečků, které se zváží s přesností na 0,01 g. Dále se vzorky změří s přesností na 0,1 mm. Rozměry se určí z průměru tří hodnot z každého měřeného rozměru. Z hmotnosti a průměrných rozměrů se stanoví objemová hmotnost zaokrouhlená na 10 kg/m³.

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

m – hmotnost vysušeného tělesa [kg]

V – objem tělesa [m³]

Objemová hmotnost byla určena na vzorcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

4.4 Použité materiály

4.4.1 Pojivo

4.4.1.1 Cement ze závodu Mokrý (Českomoravský cement a.s.)

CEM I 42,5 R je portlandský cement. Portlandský slínek je jeho dominantní složkou a je zastoupen z 95 -100 %. Jsou využívány jeho vlastnosti – rychlý nárůst pevností, rychlý a vysoký vývin hydratačního tepla, vysoké počáteční pevnosti, stálost fyzikálních i chemických vlastností. [3]

Tabulka 10: Chemické složení cementu [3]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky
CaO	65	[% hm.]
SiO ₂	20	[% hm.]
Fe ₂ O ₃	3	[% hm.]
Al ₂ O ₃	4	[% hm.]
MgO	1	[% hm.]
SO ₃	2,9	[% hm.]
Cl ⁻	0,057	[% hm.]
K ₂ O	0,75	[% hm.]
Na ₂ O	0,17	[% hm.]

Tabulka 11: Vlastnosti cementu [3]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky
Měrný povrch	377	[m ² /kg]
Měrná hmotnost	3110	[kg/m ³]
Objemová stálost	1,0	[mm]
Pevnost v tlaku – 28 dní	61	[N/mm ²]
Pevnost v tahu za ohybu – 28 dní	9	[N/mm ²]
Ztráta žíháním	3,0	[% hm.]
Normální konzistence	28,3	[%]

4.4.2 Kamenivo (plnivo)

4.4.2.1 Živcový písek

Kamenivo o velikosti frakce 0 – 4 mm je přírodní těžený nepraný živcový písek.

Tabulka 12: Vlastnosti živcového písku [4]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky
Objemová hmotnost	2560	[kg/m ³]
Nasákavost	1,2	[% hm.]
Alkalicko křemičitá reakce	0,035	[Δl %]
Obsah chloridů	<0,005	[% hm.]
Obsah celkové síry	0,01	[% hm.]
Obsah přírodních nuklidů	0,46	[% hm.]

4.4.2.2 Čedič

Kamenivo je tvořeno přírodní čedičovou horninou. Čedič – bazalt z oblasti okolo obce Bílčice se dodává jako drcené kamenivo.

Tabulka 13: Vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice[5][6]

Vlastnosti	Frakce 0 – 4 mm	Jednotky
Obsah jemných částic	7,5	[% hm.]
Obsah celkové síry	0,048	[% hm.]
Obsah chloridových solí	0,0004	[% hm.]
Nasákavost	0,9	[% hm.]
Objemová hmotnost kameniva	2945	[kg/m ³]
Tvar zrn – tvarový index > 3	-	[% hm.]
Sypná hmotnost setřeseného kameniva]	1985	[kg/m ³]
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	1626	[kg/m ³]
Mezerovitost volně sypaného kameniva	44,8	[% hm.]
Mezerovitost setřeseného kameniva	32,6	[% hm.]

Tabulka 14: Petrografické složení čedičového kameniva z lokality Bílčice[5][6]

Petrografické složení	Nepravidelné omezené hnědavé pyroxeny lištovité, polysyntetické zdvojitě plagioklasy rudní minerály (magnetit, ilmenit) Jílové minerály Oxihydroxidy Fe
------------------------------	---

Tabulka 15: Silikátová analýza z lomu Bílčice[6]

Složení	hm. [%]	Složení	hm [%]
SiO ₂	41,3	K ₂ O	0,5
TiO ₂	2,5	Na ₂ O	1,7
Al ₂ O ₃	12,7	S	0,0
Fe ₂ O ₃	7,5	CO ₂	0,0
FeO	5,0	P ₂ O ₅	1,2
MnO	0,2	H ₂ O	2,1
CaO	11,2	H ₂ O	3,0
MgO	10,6		

4.4.2.3 Amfibolit

Amfibolit je zelenošedá jemnozrná hornina. Metamorfnní podmínky vzniku amfibolitů odpovídají amfibolitové facii, tj. středním až vyšším tlakům (3 – 10 kbar) a teplotám 500 - 700 °C. [8]

Amfibolit má nízkou nasákavost (0,1 – 0,4 %) a vysokou pevnost v tlaku (170 – 280 MPa) a proto je hojně využíván ve stavebnictví.

4.4.2.4 Kamenivo Liapor

Kamenivo Liapor je uměle vyráběné a pochází od výrobce Lias Vintřov, LSM, k. s. Vyrábí se z třetihorních cypřišových jílu a břidlic, ze kterých se utvoří granule. Granule se při teplotě 1 100 až 1200 °C vypalují v rotační peci. Při výrobě nejsou používány žádné umělé pórotvorné přísady. [7]

Tabulka 16: Vlastnosti lehkého kameniva Liapor [7]

Vlastnosti	Frakce 1 – 4/500	Jednotky
Sypná hmotnost	500	[%]
Tolerance sypné hmotnosti	± 15	[%]
Objemové hmotnost	925	[kg/m ³]
Tolerance objemové hmotnosti zrna	± 15	[%]
Nasákavost w ₅	2	[% hm., max]
Nasákavost w ₃₀	4	[% hm., max]
Nasákavost w ₆₀	5	[% hm., max]
Nasákavost w ₁₂₀	6	[% hm., max]
Odolnost proti drcení	3,0	[MPa, min]
Odolnost vůči zmrazování a rozmrazování	2	[% ztráty hm., min]
Chloridy	< 0,02	[% hm.]
Sírany rozpustné v kyselině	< 0,8	[% hm.]
Celková síra	< 1,0	[% hm.]
Součinitel tepelné vodivosti	0,11	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Třída hořlavosti	A1 (DIN 4102)	-
Procentuální podíl drcených zrn	< 5,0	[% hm.]
Jemné částice	< 1,0	[<0,063]

Tabulka 17: Chemické složení kameniva Liapor[7]

Složení	Hm. [%]
SiO ₂	55 ± 5
Al ₂ O ₃	24 ± 5
Fe ₂ O ₃	14 ± 5
CaO	5 ± 5
Stopové prvky	2 ± 2

4.4.2.5 Popílkový agloporit

Tento produkt pochází z vysokoteplotního popílku z elektrárny Ledvice.

Popílkový agloporit je uměle vyráběné pórovité kamenivo, které je vyráběno na aglomeračních roštích slinováním ve výpalu. Slinovací proces na aglomeračních roštích probíhá při teplotě 1100 až 1250 °C. Jedná se o pórovité kamenivo získané sbalkováním vysokoteplotního popílku.

Díky malému obsahu SiO₂ je kamenivo vhodné do správkových malt, které budou vystaveny tepelnému zatížení. Nebude zde docházet k modifikační přeměně křemene a s tím

spojené objemové změně. Další předností agloporitu je například nízká pořizovací cena a zpracování druhotných surovin z energetického průmyslu.

Tabulka 18: Mineralogické složení popílkového agloporitu

Složení	hm [%]
Mullit	39,3
Amorfní fáze	39,0
Krystalické SiO ₂	7

4.4.2.6 Škvára

Škvára vzniká spalováním komunálního odpadu ve spalovně SAKO. Frakce 1 – 4 mm vzniká na talířovém granulátoru.

Tabulka 19: Chemické složení škváry

Složení	hm. [%]	Složení	hm. [%]
CaO	18,9	Na₂O	3,2
MgO	1,9	TiO₂	1,29
SiO₂	45,8	SO₃	4,4
Al₂O₃	9,53	Cl	1,4
Fe₂O₃	7,57	K₂O	1,94
P₂O₅	1,53	MnO	0,132
Al	4,88	Ca	13,5
Fe	5,3	K	1,61
Mg	1,12	Na	3,8
Ti	0,77	Mn	0,103
Sírany (SO₄)	1,53	Chloridy	0,48

4.4.2.7 Lupek

Lupek je hornina, která vznikla sedimentací jílovce. Jeho hlavní složku tvoří jílový minerál kaolinit. K sedimentaci a ke zpevnění kaolinitu došlo v prvohorách a druhohorách.

Oproti jílu je pevný a využívá se k výrobě ohnivzdorných a žáruvzdorných produktů. Jeho žáruvzdornost je dána vysokým obsahem Al₂O₃ a nízkým obsahem tavicích příměsí. Pro materiál je dále typické jeho teplotní stabilita a koeficient teplotní roztažnosti. Výpalem a následným drcením a tříděním se získává keramické ostřívo, specifické svými žáruvzdornými i zrnitostními parametry. Teplota výpalu je cca 1150 °C.

Tabulka 20: Chemické složení lupku

Složení	hm. [%]
Al_2O_3	38,50
Fe_2O_3	1,25
TiO_2	1,5
SiO_2	55,8
MgO	0,05

4.4.3 Příměsi

Příměsi jsou jemnozrnné práškové materiály anorganického původu. Do směsí se přidávají za účelem zlepšení vlastností malt. Nejpoužívanějšími příměsemi do malt jsou vysokopeční struska, popílek a mikrosilika.

4.4.3.1 Vysokoteplotní popílek

Popílek pochází z uhelné elektrárny Ledvice. Vzniká spalováním černého uhlí pomocí vysokoteplotního spalování. Popílek se zachycuje na elektrostatických filtrech, cyklonech a jiných typech filtrů. Popílek tvoří křemičité kuličky o velmi malém průměru (0,001 – 0,1 mm) s velkým měrným povrchem (200-800 μm), které mohou být plné nebo duté, průhledné nebo neprůhledné, nažloutlé nebo šedé. Popílek je pucolánově aktivní a dokáže reagovat s vápnem a vodou. Používá se jako částečná náhrada cementu nebo jako příměs do cementového kompozitu, kde má zlepšit určité vlastnosti kompozitu.

Tabulka 21: Chemické složení popílku

Složení	hm. [%]	Složení	hm [%]
SiO_2	52,4	CaO	4,0
Al_2O_3	24,2	K_2O	2,8
Fe_2O_3	6,4	MgO	2,8
FeO	0,3	MnO	0,1
TiO_2	1,0	Na_2O	0,3
Cr_2O_3	<0,1	C	4,5
P_2O_5	0,4	S	0,8

Tabulka 22: mineralogické složení popílku

Mineralogické složení	β křemen
	Mullit
	zbytky původního paliva

4.4.3.2 Struska

Struska pochází ze společnosti KOTOUČ ŠTRAMBERK spol. s r. o.

Jemně mletá vzniká semletím vysokopecní granulované strusky. Struska je latentně hydraulické pojivo ve formě prášku. Struska je využívána do betonových směsí pro zvýšení konečných pevností a zvýšení jejich odolnosti proti agresivnímu prostředí. K její aktivaci dochází například pomocí portlandského cementu. Vysokopecní struska, jako náhrada části cementu, dokáže zlepšit tepelnou odolnost celého cementového kompozitu.

4.4.3.3 Vinnapas 5043 N

Jedná se o kopolymer vinylacetátu a etylenu ve formě bílého prášku. Vinnapas slouží ke zlepšení soudržnosti správkové malty s podkladním materiálem.

4.4.4 Rozptýlená výztuž

4.4.4.1 Polypropylenová vlákna

Použita byla polypropylenová vlákna Fibrin 315. Polypropylenová vlákna jsou tvořena propylenem (C_3H_6). Polymerací propylenových molekul vznikne termoplastický polymer polypropylen, který se řadí do skupiny vláken polymerních. Polypropylen má oproti jiným propylenům vyšší pevnost, tvrdost, vyšší teplotu tání, vyšší odolnost vůči oděru a chemikáliím. Pevnost v tahu polypropylenu je v rozmezí 22 – 32 MPa, teplota tavení se pohybuje okolo 160 – 170 °C a bod měknutí se nachází okolo 150 °C.

Polypropylenová vlákna se vyrábí o délce cca 5 – 15 mm a jejich průměr je cca 10 – 20 μm . 1 kg PP vláken obsahuje asi 300 miliónů jednotlivých vláken. Díky tomuto množství je cementový kompozit vyztužen velkým počtem vláken v malých vzdálenostech. Vláknem nezvyšují výslednou pevnost, ale snižují nebezpečí vzniku smršťovacích trhlin ve fázích tuhnutí a tvrdnutí.

Dále polypropylenová vlákna zlepšují odolnost vůči vysokým teplotám a požáru. Jednotlivá vlákna vyhoří a díky tomu vznikne v betonu pórovitá struktura a nedojde k explozivnímu odprýsknutí betonu.



Obrázek 16: Polypropylenová vlákna [9]

Tabulka 23: Vlastnosti vláken

Materiál	Polypropylen
Hustota [kg/m ³]	910
Délka vlákna [mm]	12
Průměr vlákna [μm]	16
Bod tání [°C]	160
Doporučené dávkování [g/m ³]	1000

4.5 Výsledky experimentální části

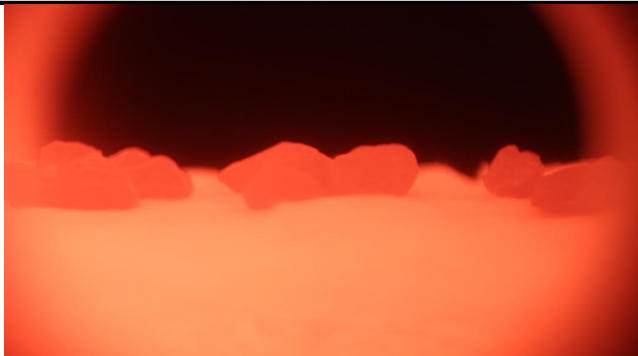
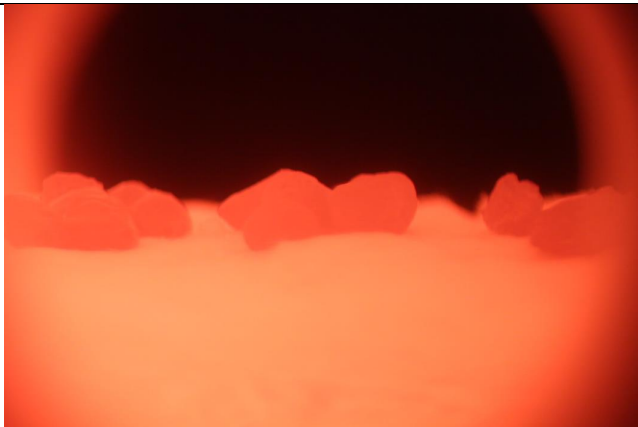
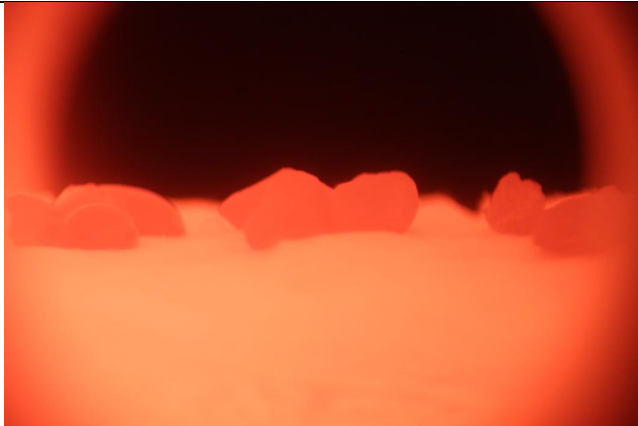
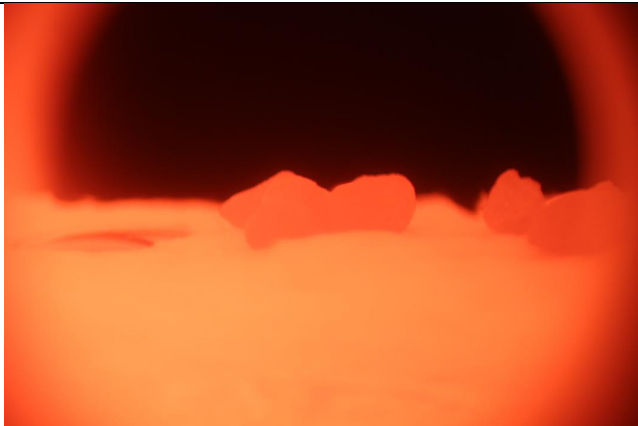
V této části jsou formou tabulek a grafů zpracovány výsledky vzorků zkoušených kameniv.

4.5.1 Výsledky testů kameniva

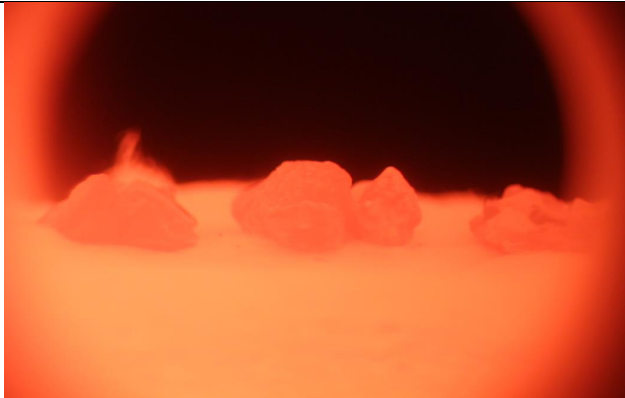
4.5.1.1 Tepelná expozice v pozorovací peci

Níže v tabulkách (viz 24, 25) jsou uvedeny vybrané snímky pořízené digitálním fotoaparátem z pozorovací pece. Na snímcích jsou patrné některé změny zrn kameniv probíhající při růstu teploty. Všechny vizuálně pozorovatelné změny jsou popsány právě v uvedených tabulkách.

Tabulka 24: Teplotní zatížení kameniva v pozorovací peci - Čedič, liapor, agloporit.

Vlevo vzorek čediče, uprostřed vzorek liaporu, vpravo vzorek agloporitu	
	Teplota 1178 °C. U čediče dochází k prvním tvarovým změnám. U liaporu a agloporitu nejsou žádné viditelné změny.
	Při teplotě 1195 °C dochází k natavování čediče a dochází k viditelné tvarové změně. U vzorku liaporu a agloporitu stále nejsou viditelné žádné změny.
	Při teplotě 1224 °C dochází k roztavení vzorku čediče
	Teplota 1266 °C. První známky změn probíhajících ve vzorcích liaporu a agloporitu. Zrno liaporu se začíná smršťovat. Zrno agloporitu začíná výrazně expandovat a zvětšovat svůj objem.

Tabulka 25: Zatížení kameniva vysokou teplotou v pozorovací peci. Amfibolit, kamenivo Žabčice, lupek.

Vlevo vzorek amfibolitu, uprostřed vzorek živcový písek, vpravo vzorek lupku	
	Teplota 1138 °C. U živcového písku dochází k objemovým změnám – expanze.
	Teplota 1219 °C. Dochází k natavování vzorku amfibolitu. Živcový písek dále expanduje.
	Teplota 1243 °C. Tavení amfibolitu. Živcový písek stále výrazně expanduje. Lupěk je při této teplotě bez viditelných změn.
	Při teplotě 1396 °C dochází stále k expanzi živcového písku. Při této teplotě se začíná tvarově měnit i vzorek lupku.

S ohledem na zjištěné skutečnosti byla následující tepelná expozice kameniv realizována pouze do maximální teploty 1200 °C.

V případě škváry byly předpokládány výrazně odlišné parametry, proto byla testována odděleně (snímky zde uvedeny nejsou). Potvrdil se předpoklad a k tavení docházelo již při teplotě 1000 °C. Škvára má různorodé složení a obsahuje například zbytky kovových částí a skla. Různorodost složení se nutně musí projevit na chování za vyšších teplot.

4.5.1.2 Makroskopické pozorování po tepelné expozici v muflové peci

Hodnocení vzhledu bylo provedeno vizuálně po vyjmutí vychlazených kameniv z pece. Popis k jednotlivým kamenivům při konkrétních teplotách je uveden v následující tabulce (viz 26). Barevná změna je pak zaznamenána na fotografiích níže.

Tabulka 26: Výsledky makroskopického pozorování

Vzorek	Teplota	Makroskopické pozorování	
		Barva	Struktura povrchu
Živcový písek	22 °C	Šedohnědá	-
	600 °C	Růžovobílá	Bez dalších změn
	1000 °C	Rezavá	Bez dalších změn
	1000 °C rychlé chlazení	Červenožlutá	Odprýsknutí ostrých hran (popraskání zrna)
	1200 °C	Mírně narezlá	Spečení jednotlivých zrn
Čedič Bílčice	22 °C	Šedá	-
	600 °C	Šedohnědá	Bez dalších změn
	1000 °C	Hnědočervená	Bez dalších změn
	1000 °C rychlé chlazení	Hnědočervená	Odprýsknutí ostrých hran (popraskání zrna)
	1200 °C	Černohnědá	Spečení jednotlivých zrn
Amfibolit	22 °C	Šedá	-
	600 °C	Šedohnědá	Bez dalších změn
	1000 °C	Hnědočervená	Bez dalších změn
	1000 °C rychlé chlazení	Hnědá	Odprýsknutí ostrých hran (popraskání zrna)

	1200 °C	Červenohnědá	Bez dalších změn
Liapor	22 °C	Tmavě hnědá	-
	600 °C	Šedohnědá	Bez dalších změn
	1000 °C	Červenohnědá	Bez dalších změn
	1000 °C rychlé chlazení	Světle hnědá	Bez dalších změn
	1200 °C	Hnědočervená	Bez dalších změn
Agloporit	22 °C	Hnědá a černá zrna	-
	600 °C	Hnědá a tmavě hnědá zrna	Bez dalších změn
	1000 °C	Rezavě zlatá	Bez dalších změn
	1000 °C rychlé chlazení	Světle hnědá	Bez dalších změn
	1200 °C	Tmavě hnědá	Spečení jednotlivých zrn
Škvára	22 °C	Šedivá	Obsahuje sklo, kov
	600 °C	Šedohnědá	Obsahuje sklo, kov
	1000 °C	Spečená kompaktní hmota (sklovitého charakteru)	Obsahuje křemen, zbytky skla Vznik pórovité, sklovité černé taveniny
	1000 °C rychlé chlazení	-	-
	1200 °C	-	-
Lupek	22 °C	Různobarevné	-
	600 °C	Různobarevné	Bez dalších změn
	1000 °C	Různobarevné	Bez dalších změn
	1000 °C rychlé chlazení	Různobarevné	Bez dalších změn
	1200 °C	Různobarevné - světlejší odstín	Bez dalších změn



Obrázek 17: Vzorky živcového písku – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.



Obrázek 18: Porovnání referenčního (22 °C) vzorku živcového písku a zatíženého vzorku na 1000 °C a na 1000 °C rychle ochlazeného.



Obrázek 19: Vzorky čediče – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.



Obrázek 20: Porovnání referenčního (22 °C) vzorku čediče a zatíženého vzorku na 1000 °C a na 1000 °C rychle ochlazeného.



Obrázek 21: Vzorky amfibolit – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.



Obrázek 22: Porovnání referenčního (22 °C) vzorku amfibolitu a zatíženého vzorku na 1000 °C.



Obrázek 23: Vzorky popílkový agloporit – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.



Obrázek 24: Vzorek nataveného popílkového agloporitu při teplotě 1200 °C

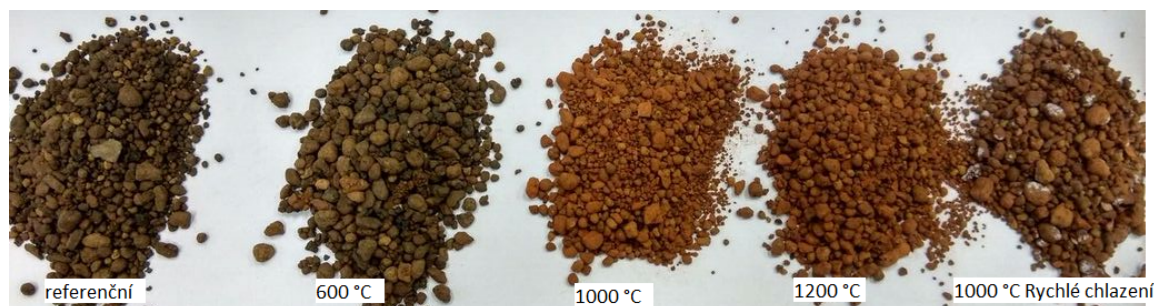
Na Obrázek 24 je vidět, že při teplotě 1200 °C došlo k natavení popílkového agloporitu. Vzorek si i přes částečné natavení zachoval původní tvar zrn.



Obrázek 25: Vzorky Lupek – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.



Obrázek 26: Vzorky Škvára – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C

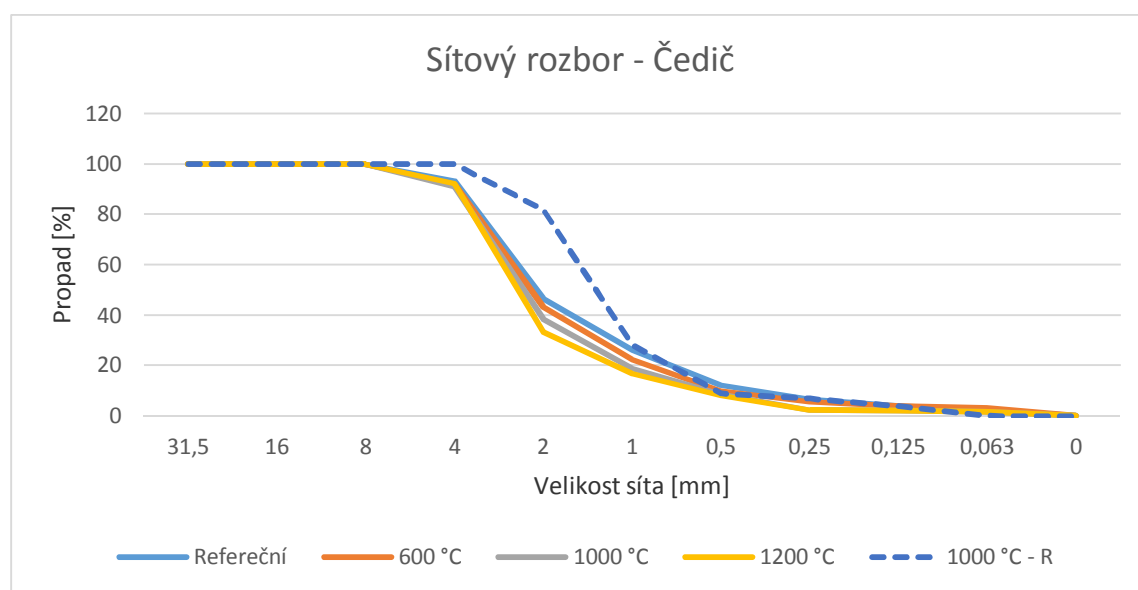


Obrázek 27: Vzorky Liapor – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.

4.5.1.3 Sítový rozbor

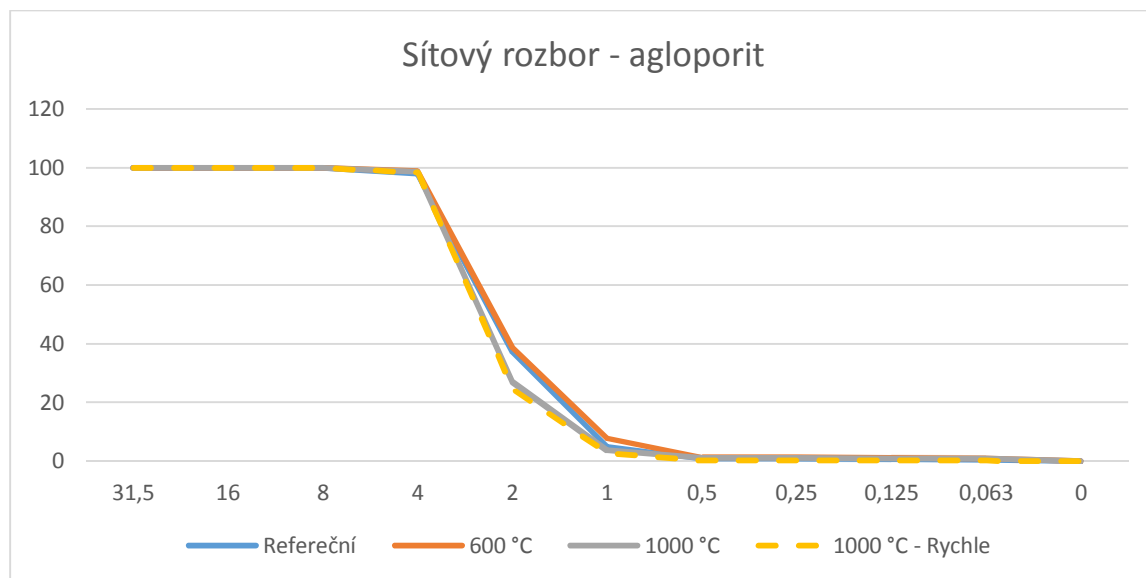
Průběh křivek zrnitosti stanovených pomocí sítového rozboru jsou v následujících grafech zobrazeny vždy pro každé kamenivo zvlášť, přičemž v jednom grafu jsou porovnány zrnitosti všech expozičních teplot. Z důvodu použití frakce kameniva 0 – 4 mm jsou zde uváděna použitá normová síta pouze od velikosti 31,5 mm do 0,063 mm.

Sítový rozbor má ukázat, zda a v jaké míře dochází k případnému rozpadu jednotlivých zrn kameniva a tím i distribuce velikosti částic.



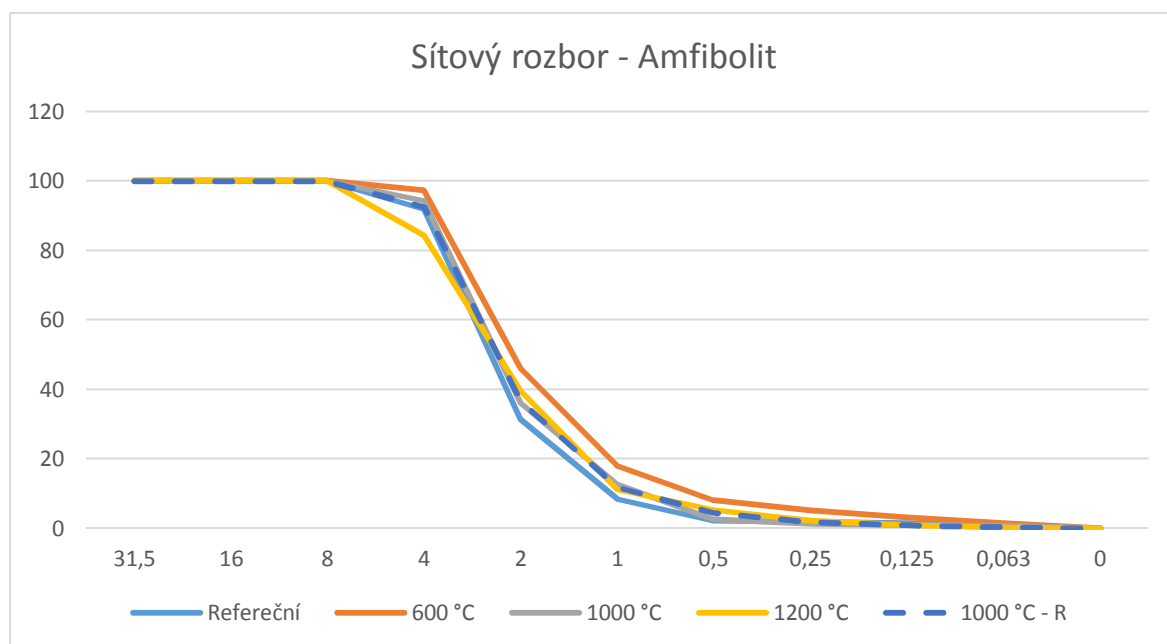
Obrázek 28: Sítový rozbor – Čedič (expoziční teploty 22 až 1200 °C)

Čedič je kamenivo s dominantním zastoupením frakce 2-4 mm v množství 60 % a dále 1-2 mm v množství 20 %. Obsah jemné frakce, tj. pod 1 mm je vyšší - cca 20 %. Změna nastala u křivky vyznačující rychle chlazení. Zde je frakce 2 – 4 mm zastoupena v množství 20 % a 1 – 2 mm v množství 50 %. Jemná frakce pod 1 mm je 30 %.

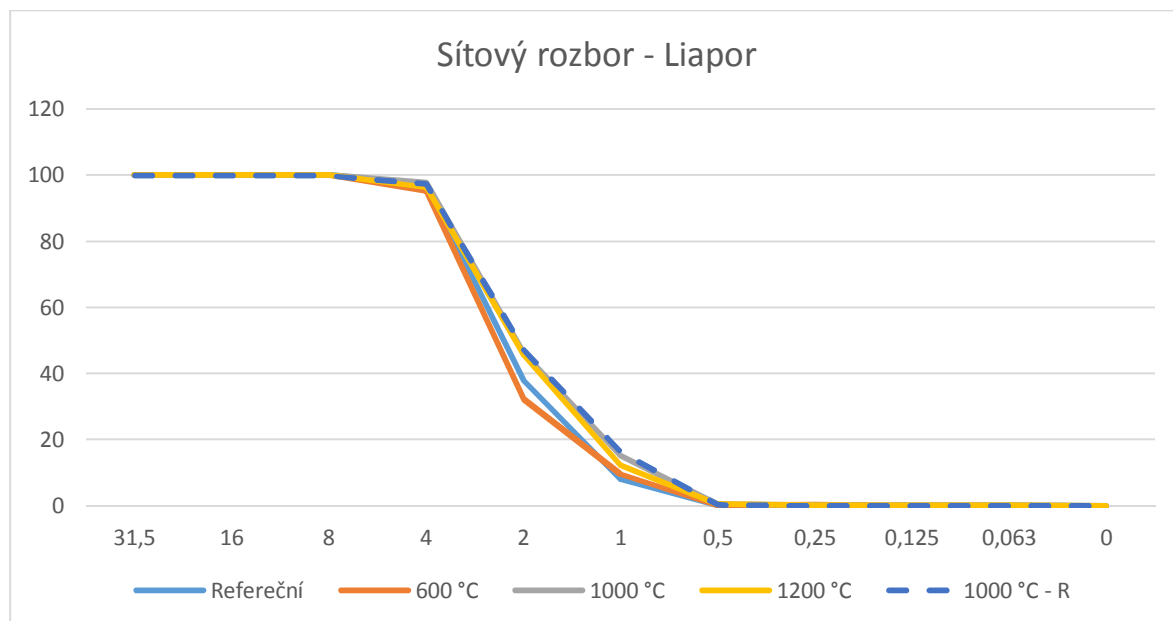


Obrázek 29: Sítový rozbor – Popílkový agloporit (expozice 22 až 1000 °C)

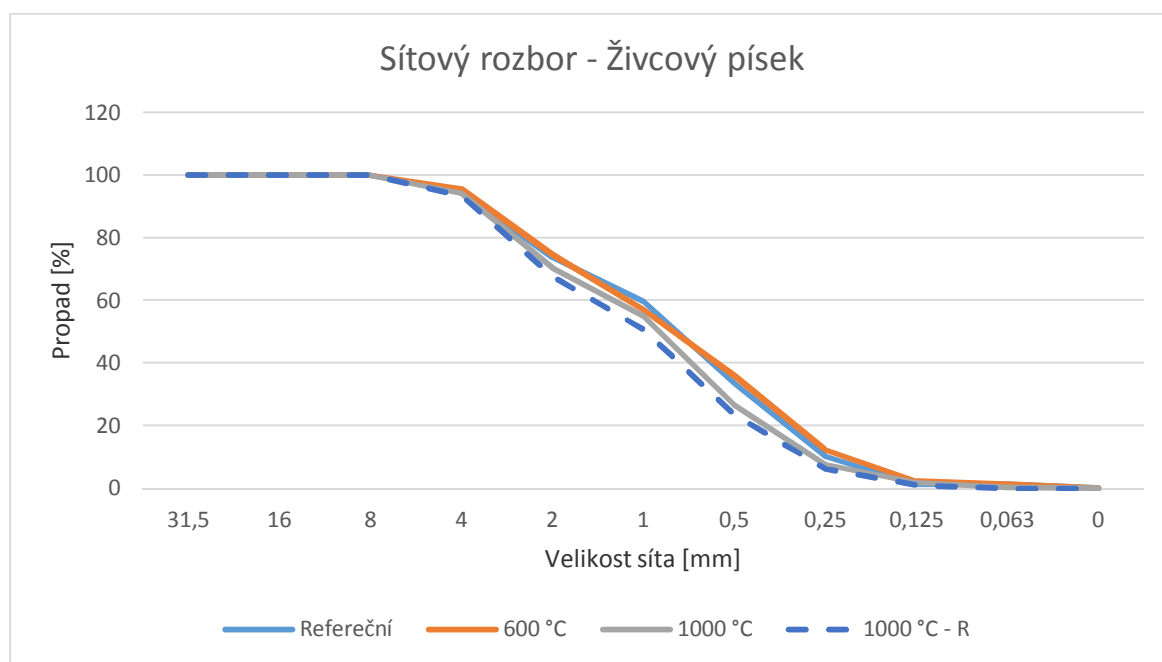
Lépe pozorovatelné změny (Obr. č. 29) v zrnitosti proběhly v oblasti velikosti zrn 1 – 2 mm, konkrétně snížení podílu frakce do 2 mm z cca 40 % na 30 %.



Obrázek 30: Sítový rozbor – Amfibolit (expozice 22 až 1200 °C)



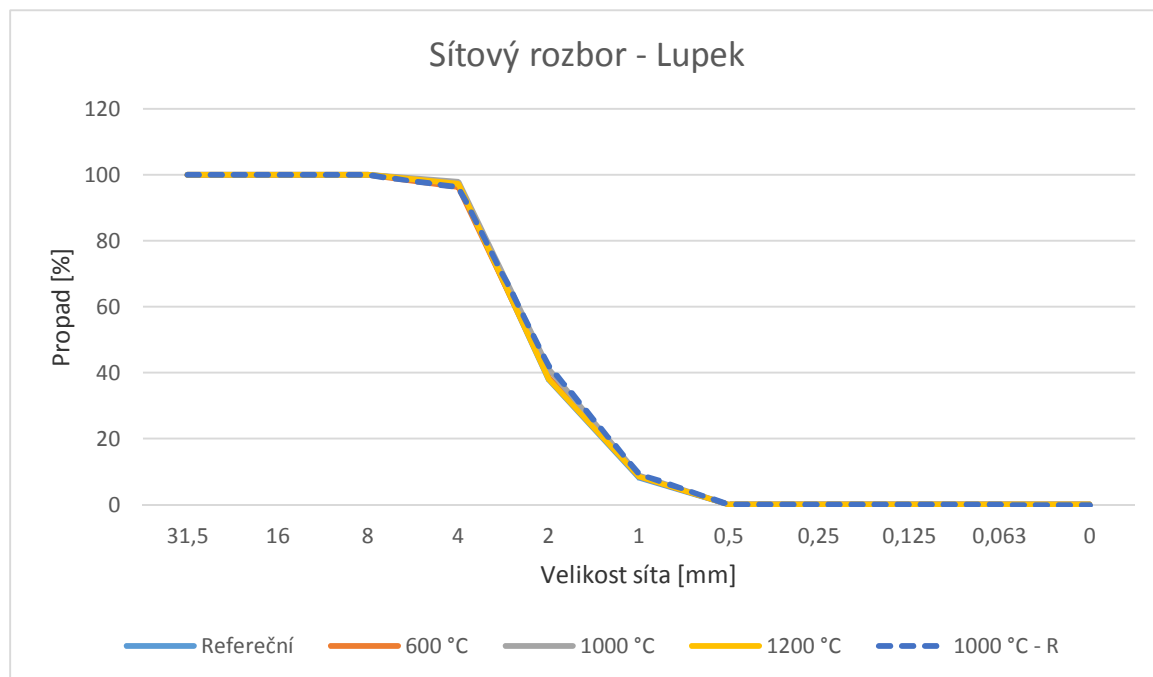
Obrázek 31: Sítový rozbor – Liapor (expozice 22 až 1200 °C)



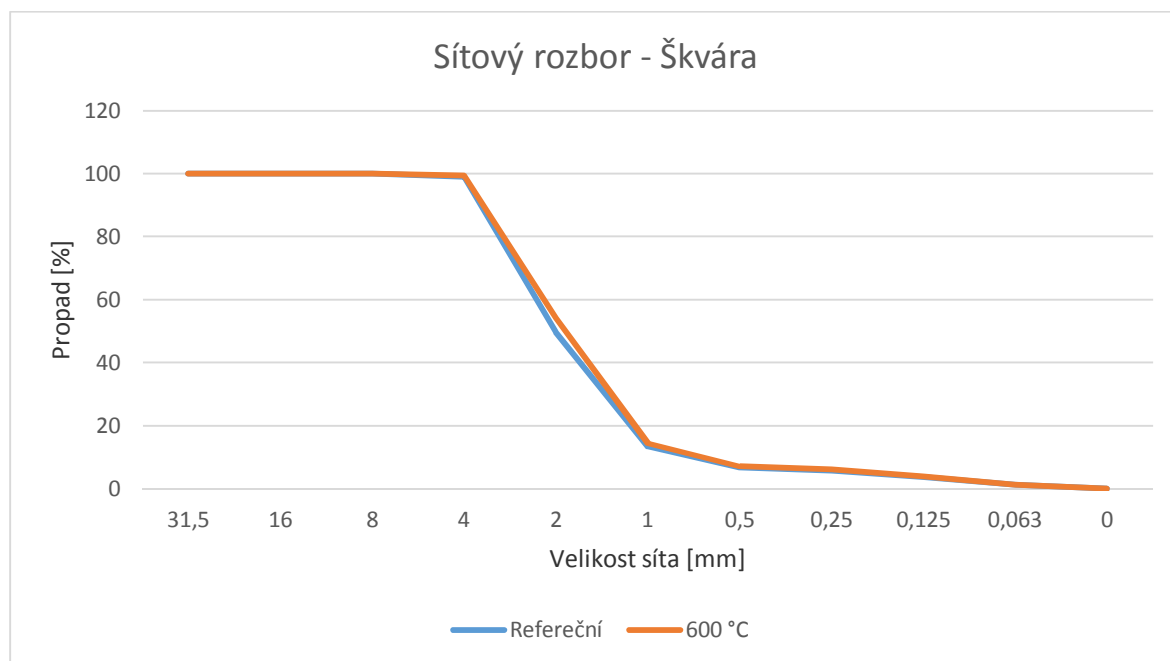
Obrázek 32: Sítový rozbor – Živcový písek (expozice 22 až 1000 °C)

Živcový písek má v porovnání s ostatními typy kameniv poměrně odlišnou skladbu zrnitosti. Je patrný spíše plynulý průběh křivky, kde jemná frakce, tj. pod 1 mm zaujímá cca 60 %. Vlivem rychlého chlazení docházelo k úbytku jemné frakce, tj. snížení propadu na cca 50 %, což vypovídá, že pravděpodobně nedocházelo k destrukci zrn na menší, ale naopak

k počátku spékání. Toto potvrzuje také křivka zrnitosti charakterizující kamenivo po teplotní expozici při 1000 °C.



Obrázek 33: Sítový rozbor – Lupek (expozice 22 až 1200 °C)



Obrázek 34: Sítový rozbor – Škvára (expozice 22 až 600 °C)

U síťového rozboru nedocházelo k příliš výrazným změnám. Nejméně změn se dle očekávání odehrává u vzorku lupku, kde změny prakticky nenastaly. Za povšimnutí stojí agloporit, který je zástupcem alternativní suroviny. Z grafu je patrné, že pravděpodobně téměř nedochází ke změnám tvaru zrn vlivem působení vysoké teploty a tedy se nemění ani jeho zrnitost. Jeho rozptyl křivek v grafu je mnohem menší než například u hutného kameniva (čedič, amfibolit).

Jediná změna nastala u čediče při šokovém chlazení, kde díky rychlému snížení teploty došlo k popraskání a rozpadu zrn. Rozptyly křivek zrnitosti vypovídají o tom, že lépe lze pro teplotně odolné malty hodnotit pórovité kamenivo. Pro komplexní hodnocení je však třeba přihlídnout také k výsledkům ostatních (následujících) zkoušek.

4.5.1.4 **Objemová hmotnost zrn, nasákavost, měrná hmotnost, pórovitost**

Objemová hmotnost byla zjišťována na referenčních vzorcích kameniva (bez tepelného zatížení) a na vzorcích kameniv, které byly zatíženy jednotlivými teplotami. Spolu s objemovou hmotností byla zjištěna nasákavost a dále pórovitost.

Poté se vzorek kameniva rozdrtil a přesil přes normové síto velikosti 0,063 mm. Na takto připraveném vzorku byla měřena měrná hmotnost v pyknometrech.

Cílem těchto zkoušek bylo zjištění, jak se změní uvedené vlastnosti po jejich zatížení vysokou teplotou.

Tabulka 27: Výsledky objemové hmotnosti, nasákavosti kameniv

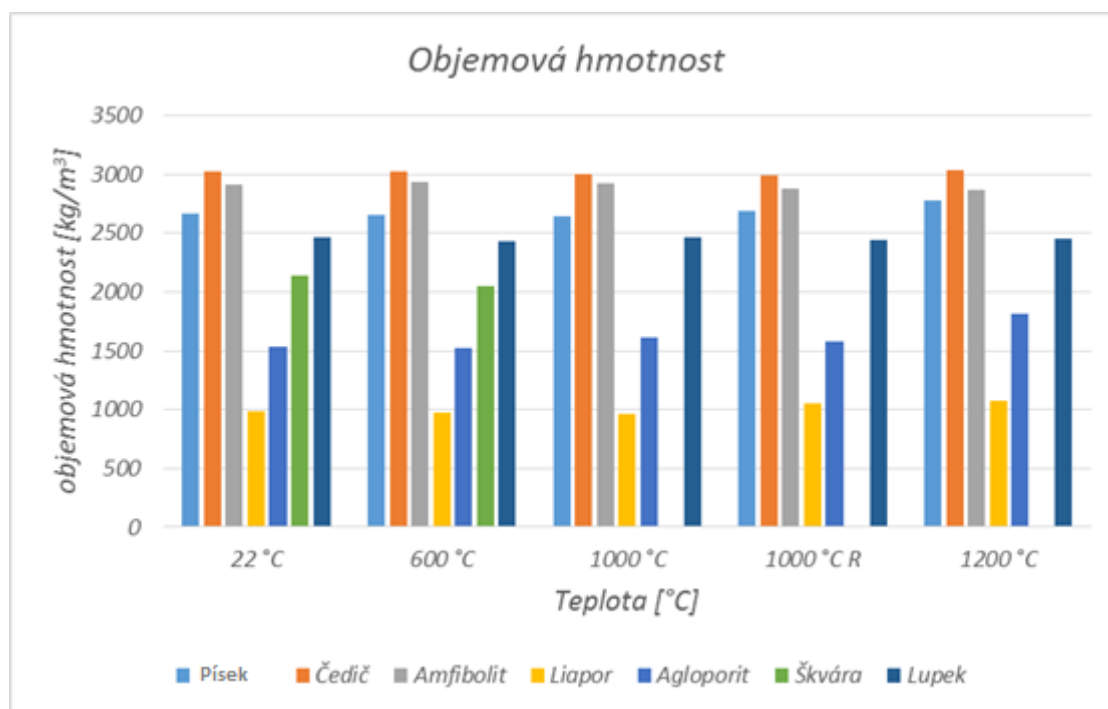
vzorek	Teplota	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Změna objemové hmotnosti [%]	Nasákavost [%]	Změna nasákavosti [%]
Živcový písek	22 °C	2670	-	1,3	-
	600 °C	2650	-0,7	1,3	0,0
	1000 °C	2640	-1,1	1,2	-7,7
	1000 °C rychlé chlazení	2690	0,7	1,3	0,0
	1200 °C	2780	4,1	0,8	-38,5
Čedič	22 °C	3030	-	1,1	-
	600 °C	3030	0,0	1,1	0,0
	1000 °C	3000	-1,0	1,1	0,0
	1000 °C rychlé chlazení	2990	-1,3	1,2	9,1
	1200 °C	3040	0,3	1	-9,1
Amfibolit	22 °C	2910	-	1,3	-
	600 °C	2930	-0,7	1,3	0,0
	1000 °C	2920	0,3	1,2	-7,7
	1000 °C rychlé chlazení	2880	-1,0	1,2	-7,7
	1200 °C	2870	-1,4	1,2	-7,7
Liapor	22 °C	980	-	20,1	-
	600 °C	970	1,0	20,3	-1,0
	1000 °C	960	-2,0	19,4	-3,5
	1000 °C rychlé chlazení	1050	7,1	19,6	-2,5
	1200 °C	1070	9,2	16,2	-19,4
Agloporit	22 °C	1540	-	15,9	-
	600 °C	1520	1,3	16,2	-1,9
	1000 °C	1610	4,5	16,3	2,5

	1000 °C rychlé chlazení	1580	2,6	16,1	1,3
	1200 °C	1820	18,2	10,7	-32,7
Škvára	22 °C	2140	-	6,4	-
	600 °C	2050	4,2	5,9	7,8
	1000 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1000 °C rychlé chlazení	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1200 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
Lupek	22 °C	2460	-	4,0	-
	600 °C	2430	1,2	3,9	2,5
	1000 °C	2460	0,0	4,0	0,0
	1000 °C rychlé chlazení	2440	-0,8	3,8	-5,0
	1200 °C	2450	-0,4	3,9	-2,5

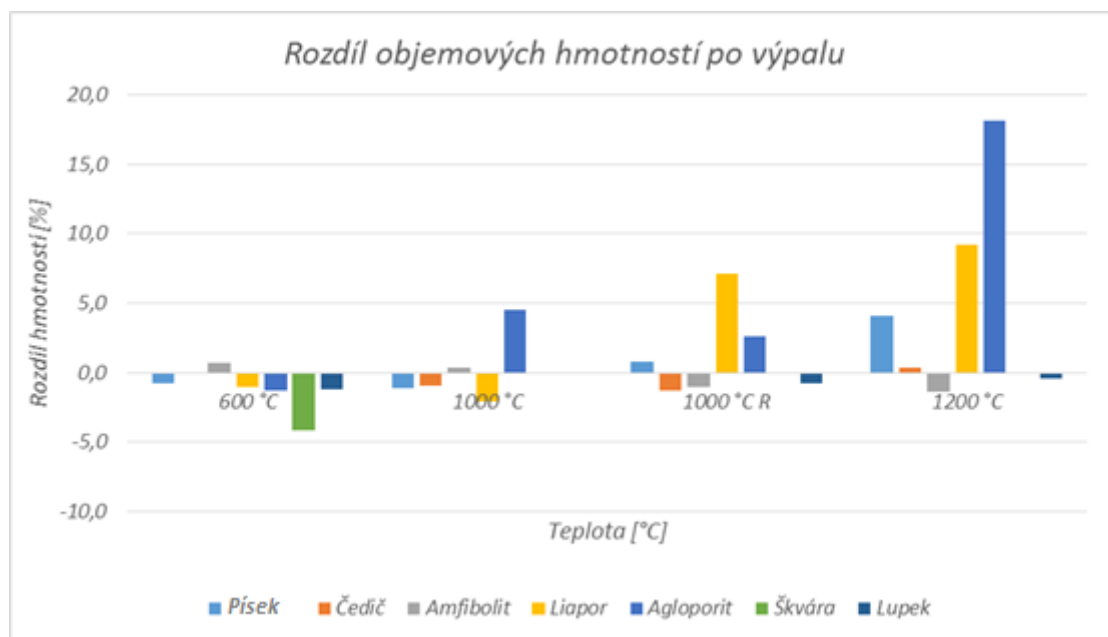
Tabulka 28: Výsledky měrné hmotnosti, pórovitosti kameniv

vzorek	Teplota	Měrná hmotnost [kg/m ³]	Změna měrné hmotnosti [%]	Pórovitost [%]	Změna pórovitosti [%]
Živcový písek	22 °C	2960	-	9,80	-
	600 °C	2950	0,3	10,17	-3,8
	1000 °C	2910	-1,7	9,28	-5,3
	1000 °C rychlé chlazení	2890	-2,4	6,92	-29,4
	1200 °C	3020	2,0	7,95	-18,9
Čedič	22 °C	3170	-	4,42	-
	600 °C	3190	-0,6	5,02	-13,6
	1000 °C	3120	-1,6	3,85	-12,9
	1000 °C rychlé chlazení	3150	-0,6	5,08	15,0

	1200 °C	3210	1,3	5,30	19,9
Amfibolit	22 °C	3060	-	4,90	-
	600 °C	3070	-0,3	4,56	7,0
	1000 °C	3080	0,7	5,19	6,0
	1000 °C rychlé chlazení	3040	-0,7	5,26	7,4
	1200 °C	2990	-2,3	4,01	-18,1
Liapor	22 °C	2240	-	56,25	-
	600 °C	2210	1,3	56,11	0,3
	1000 °C	2230	-0,4	56,95	1,2
	1000 °C rychlé chlazení	2190	-2,2	52,05	-7,5
	1200 °C	2320	3,6	53,88	-4,2
Agloporit	22 °C	2390	-	35,56	-
	600 °C	2370	0,8	35,86	-0,8
	1000 °C	2410	0,8	33,20	-6,7
	1000 °C rychlé chlazení	2340	-2,1	32,48	-8,7
	1200 °C	2470	3,3	26,32	-26,0
Škvára	22 °C	2710	-	21,03	-
	600 °C	2690	0,7	23,79	-13,1
	1000 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1000 °C rychlé chlazení	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1200 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
Lupek	22 °C	2950	-	16,61	-
	600 °C	2940	0,3	17,35	-4,4
	1000 °C	2930	-0,7	16,04	-3,4
	1000 °C rychlé chlazení	2940	-0,3	17,01	2,4
	1200 °C	2960	0,3	17,23	3,7



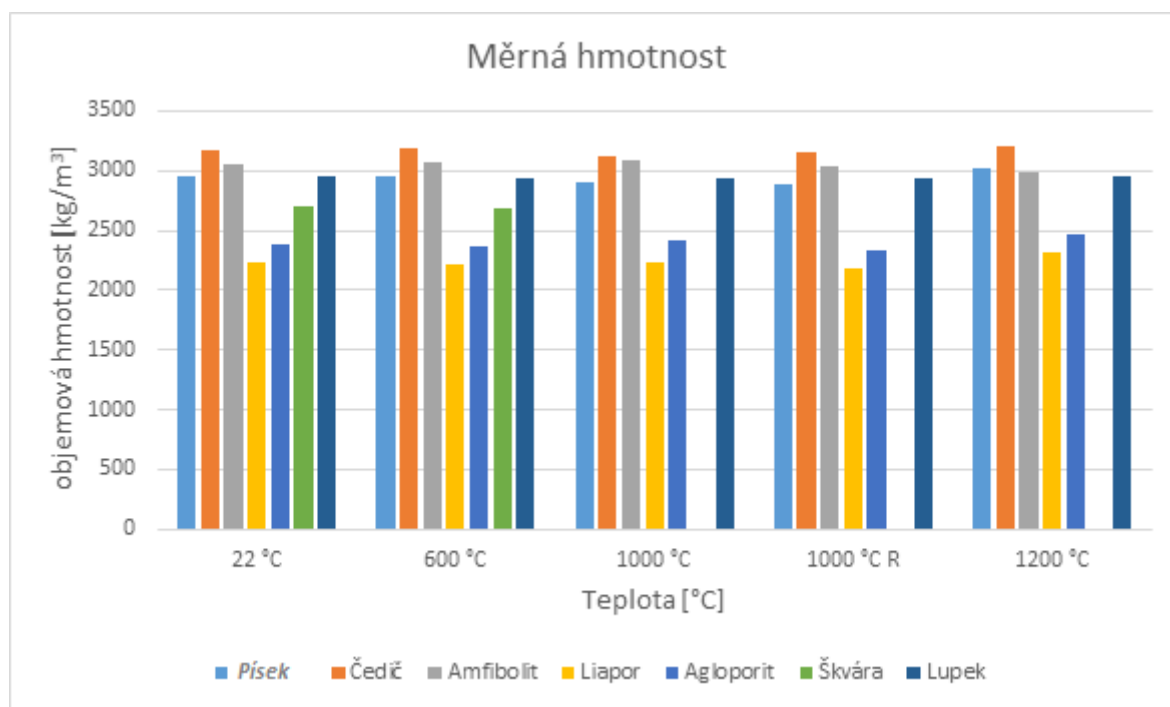
Obrázek 35: Objemová hmotnost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)



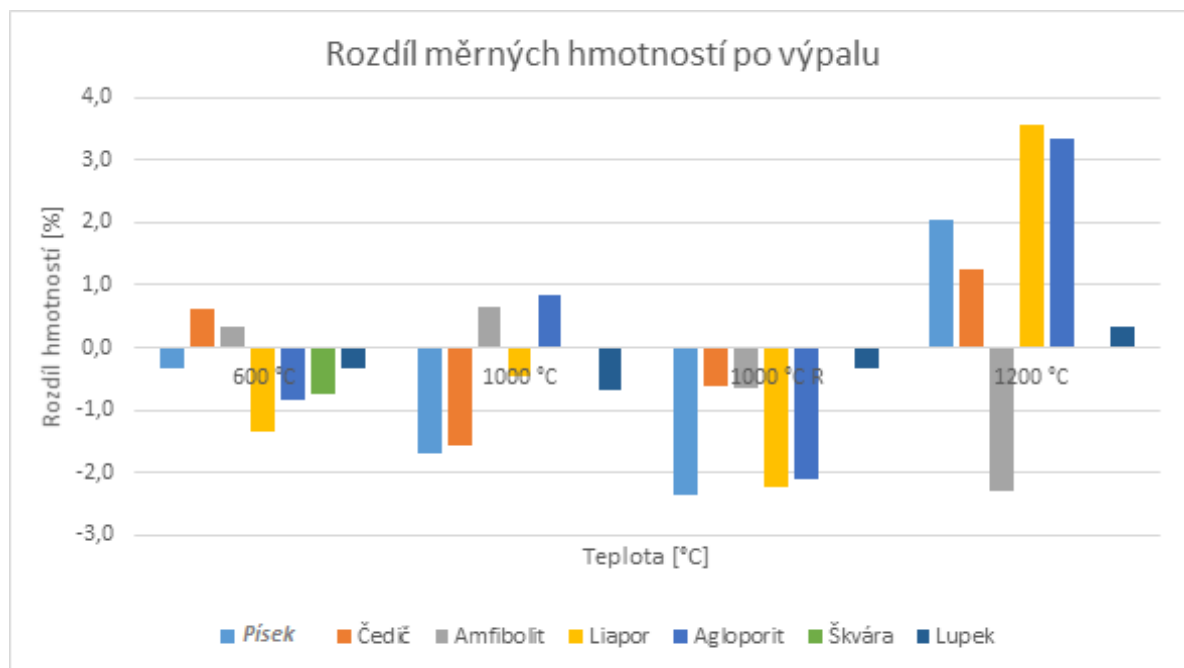
Obrázek 36: Změna objemové hmotnosti kameniva po teplotní expozici

Největší objemovou hmotnost měla dle očekávání hutná kameniva (amfibolit, čedič, živcový písek) a nejnižší pórovité kamenivo liapor. Při teplotě 600 °C měla největší změny objemové hmotnosti škvára, kde docházelo k natavení struktury. Nejvýraznější změny probíhaly při nejvyšší dosahované teploty (1200 °C) u vzorků pórovitých kameniv. Agloporit

zvýšil svojí objemovou hmotnost o 18,2 % a liapor o 9,2 %. U liaporu nastaly také rozdíly hmotnosti při různém způsobu chlazení. Při pozvolném chlazení se objemová hmotnost snižuje a naopak u šokově zchlazeného vzorku byl zaznamenán nárůst hmotnosti až o 7,1 %. U přírodního kameniva nenastávají prakticky žádné významné změny, kromě teploty 1200 °C. Při této teplotě živcový písek zvyšuje svojí objemovou hmotnost. Nejodolnějším kamenivem je dle předpokladu lupek, který vykazuje téměř zanedbatelné změny.

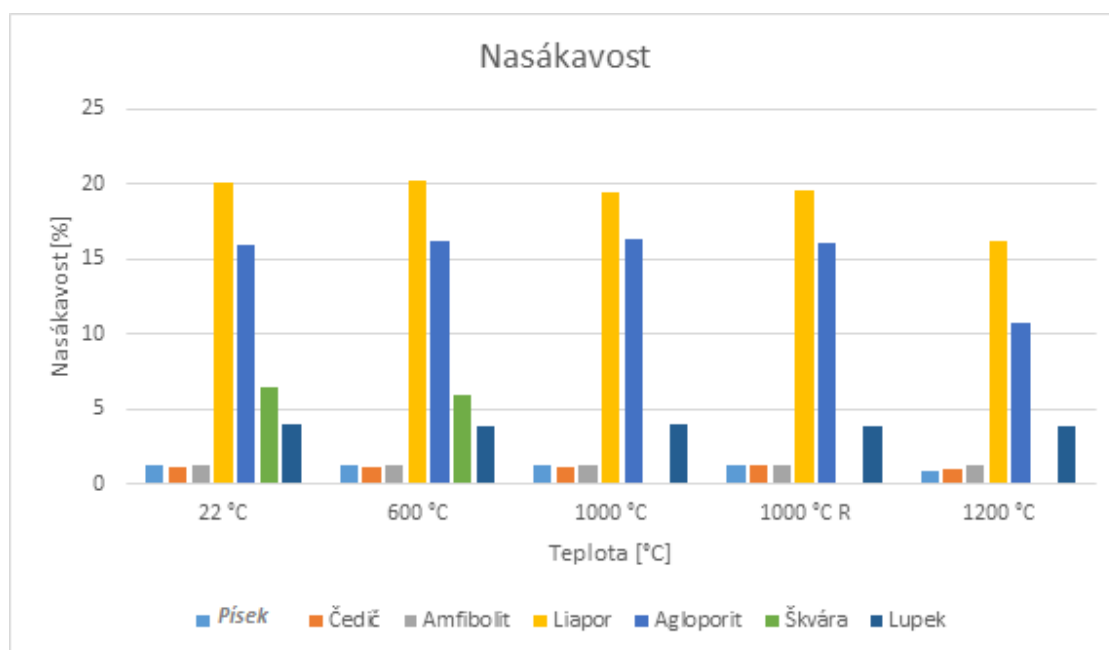


Obrázek 37: Měrná hmotnost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)

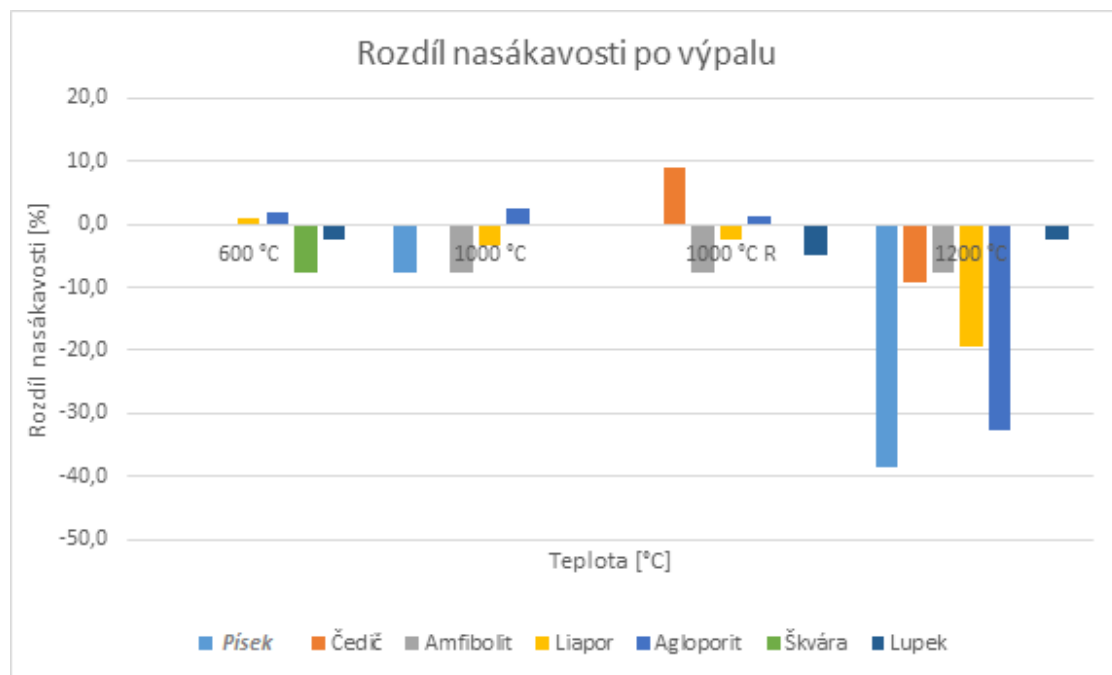


Obrázek 38: Změny měrných hmotností kameniva po teplotní expozici

Měrná hmotnost kolísala v rozmezí +3,5 a -2,5 %, docházelo k rozdílným změnám. Vliv rychlého chlazení jednoznačně potvrdil mírný pokles měrné hmotnosti. Naopak expozice při teplotě 1200 °C se projevila na nárůstu měrné hmotnosti především u liaporu a agloporitu. Výjimkou byl pouze amfibolit, u něhož došlo k poklesu cca 2,3 %. Měrná hmotnost se nejvíce zvýšila u vzorků pórovitého kameniva (liapor, agloporit) při teplotě 1200 °C.

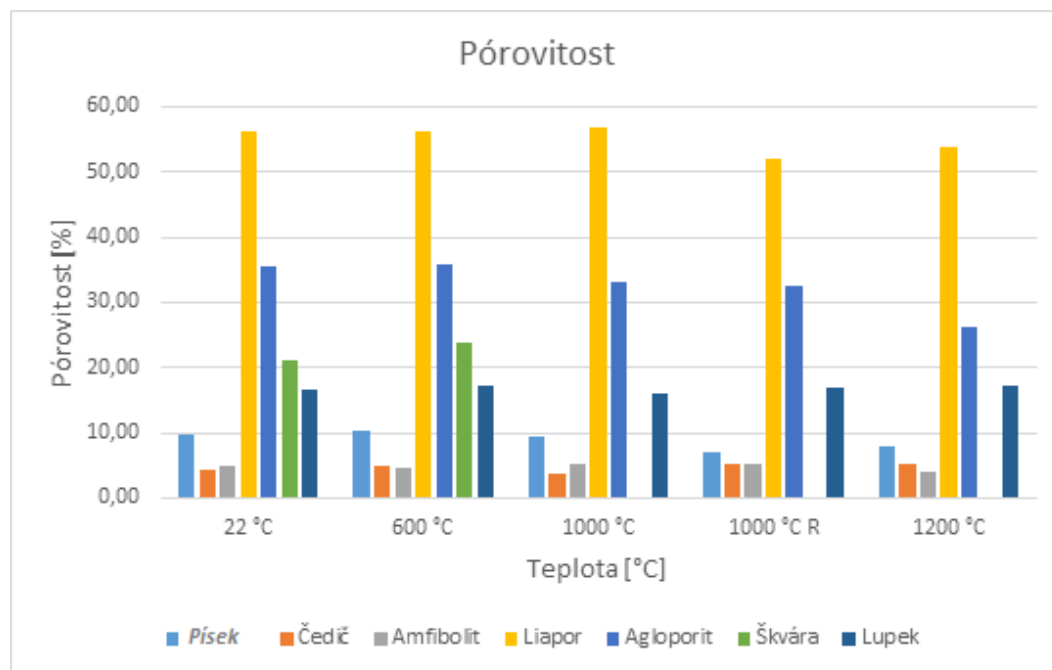


Obrázek 39: Nasákavost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)

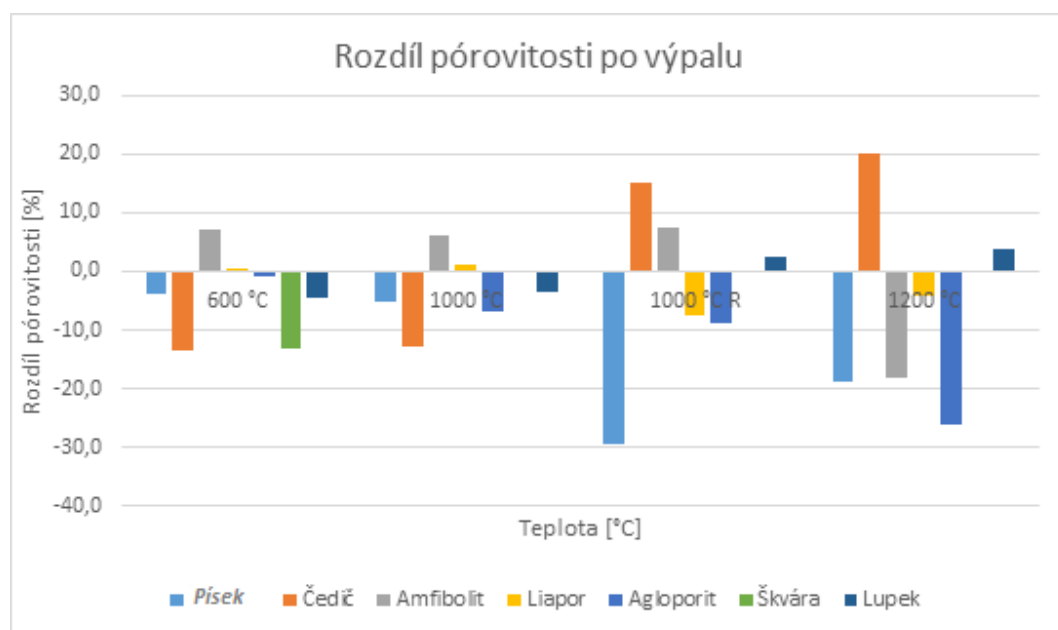


Obrázek 40: Rozdíl nasákavosti kameniva po teplotní expozici

Patrný rozdíl ve změně nasákavosti je zřetelný až při teplotě 1200 °C, kdy došlo pravděpodobně k uzavření pórů, čímž se nasákavost výrazně snížila. Nejvíce je tato skutečnost patrná v případě živcového písku, agloporitu a liaporu. U škváry došlo po expozici při 600 °C k mírnému snížení nasákavosti. To mohlo způsobit začínající natavení některých složek, čímž se buď celkově snížila pórovitost, a-nebo došlo k uzavření pórovitého systému. Vzhledem k tomu, že pórovitost klesla, tak s největší pravděpodobností došlo k narušení pórovité struktury. Rychlé chlazení se na nasákavosti výrazněji neprojevovalo.



Obrázek 41: Pórovitost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)



Obrázek 42: Rozdíl pórovitosti po výpalu

Expozicí 600 a 1000 °C docházelo spíše k poklesu pórovitosti, kromě amfibolitu, který svojí pórovitost lehce navýšil. U čediče s rychlým ochlazením docházelo k opačnému jevu a pórovitost se u něho zvýšila. Rychlé chlazení z 1000 °C se výrazněji projevilo snížením pórovitosti v případě kameniva Žabčice. Naopak vystavením kameniv 1200 °C docházelo převážně k poklesu pórovitosti. Výjimkou byl opět čedič, který svoji pórovitost zvýšil o 19,9 %.

Patrnější změna byla zaznamenána u agloporit, který při působení 1000 °C snížil pórovitost o 8,7 %. Při teplotě 1200 °C nastala změna o 26 %.

Amfibolit vykazoval zvyšování pórovitosti do teploty 1000 °C. Při teplotě 1200 °C se pórovitost významně snížila o 18,1 %.

Pro navazující výzkum je potřeba provést rtuťovou vysokotlakou porozimetrii, která určí přesněji distribuci a velikost pórů. Dále pak potřeba stanovit uzavřenou a otevřenou pórovitost a jejich vzájemné změny při působení zvyšující se teploty.

4.5.1.5 Pevnost kameniva stlačením ve válci, sypaná hmotnost, hmotnost vzorku

Odzkoušeno bylo celkem sedm druhů kameniv. Vzorky byly teplotně zatěžovány na různé teplotní stupně a poté testovány. Cílem bylo zjistit, jak bude ovlivněna pevnost kameniva stlačením ve válci, sypaná hmotnost a změna hmotnosti při vystavení vzorků danému teplotnímu zatížení.

Při zkoušce stlačitelnosti ve válci se nejedná o klasickou pevnost, ale veličinu související s pevností kameniva, jeho zrnitostí, tvarem zrn, případně i mezerovitostí.

Tabulka 29: Výsledky pevností kameniva stlačením ve válci

Vzorek	Teplota [°C]	Pevnost stlačením ve válci		Hmotnost [g]		
		Pevnost [MPa]	Změna [%]	Před výpalem	Po výpalu	Rozdíl [%]
Živcový písek	22 °C	22,1	-	-	-	-
	600 °C	21,9	0,9	1000	1000	0
	1000 °C	25,8	16,7	1000	991	0,9
	1000 °C rychlé chlazení	24,0	8,6	1000	992	0,9
	1200 °C	Netestováno	Netestováno	1676	1601	4,5
Čedič	22 °C	14,7	-	-	-	-
	600 °C	15,2	-3,4	1000	1000	0
	1000 °C	15,9	8,2	1000	994	0,6
	1000 °C rychlé chlazení	12,0	-18,4	1000	994	0,6
	1200 °C	13,2	-10,2	1000	937	6,3
Amfibolit	22 °C	12,6	-	-	-	-
	600 °C	12,1	4,0	1000	1000	0
	1000 °C	11,4	-9,5	1000	993	0,7
	1000 °C rychlé chlazení	11,0	-12,7	1000	992	0,7
	1200 °C	13,2	4,8	1000	954	4,6

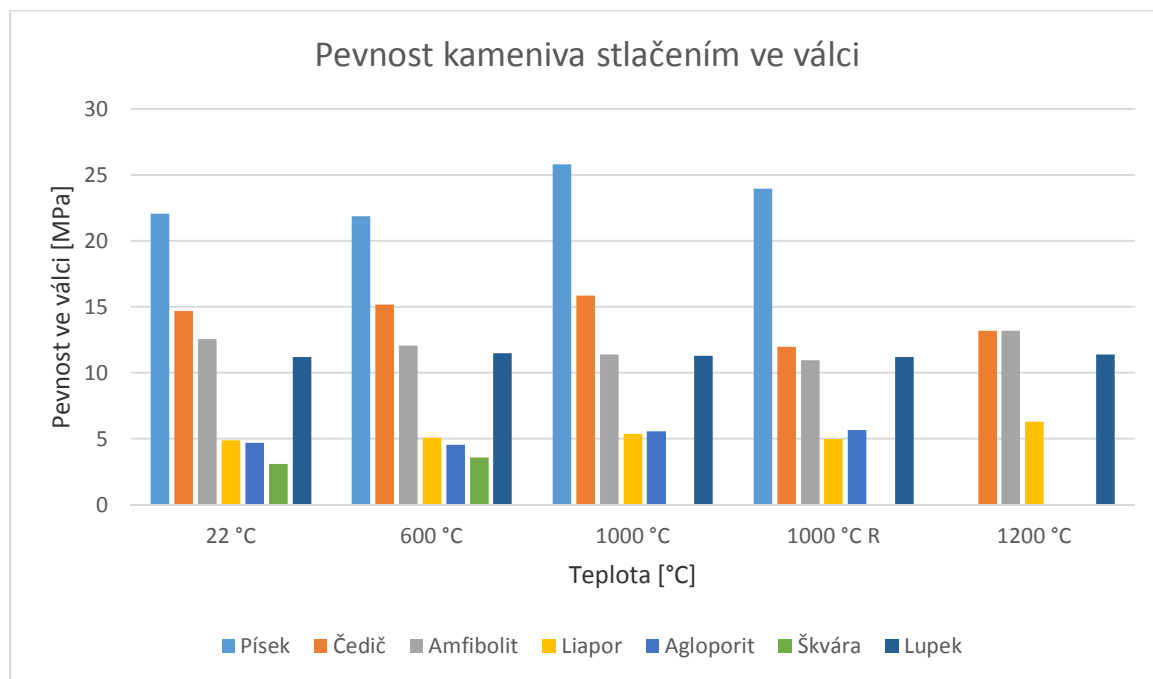
Liapor	22 °C	4,9	-	-	-	-
	600 °C	5,1	-4,1	500	500	0
	1000 °C	5,4	10,2	500	496	0,8
	1000 °C rychlé chlazení	5,0	2,0	500	496	0,8
	1200 °C	6,3	28,6	500	487	2,6
Agloporit	22 °C	4,7	-	-	-	-
	600 °C	4,6	2,1	600	600	0
	1000 °C	5,6	19,1	600	593	0,9
	1000 °C rychlé chlazení	5,7	21,3	600	595	0,9
	1200 °C	Netestováno	-	600	558	6,8
Škvára	22 °C	3,1	-	-	-	-
	600 °C	3,6	-16,1	700	696	0,5
	1000 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1000 °C rychlé chlazení	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1200 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
Lupek	22 °C	11,2	-	-	-	-
	600 °C	11,5	-2,7	800	800	0
	1000 °C	11,3	0,9	800	800	0
	1000 °C rychlé chlazení	11,2	0,0	800	800	0
	1200 °C	11,4	1,8	800	800	0

Tabulka 30: Výsledky mezerovitosti, sypné hmotnosti kameniv

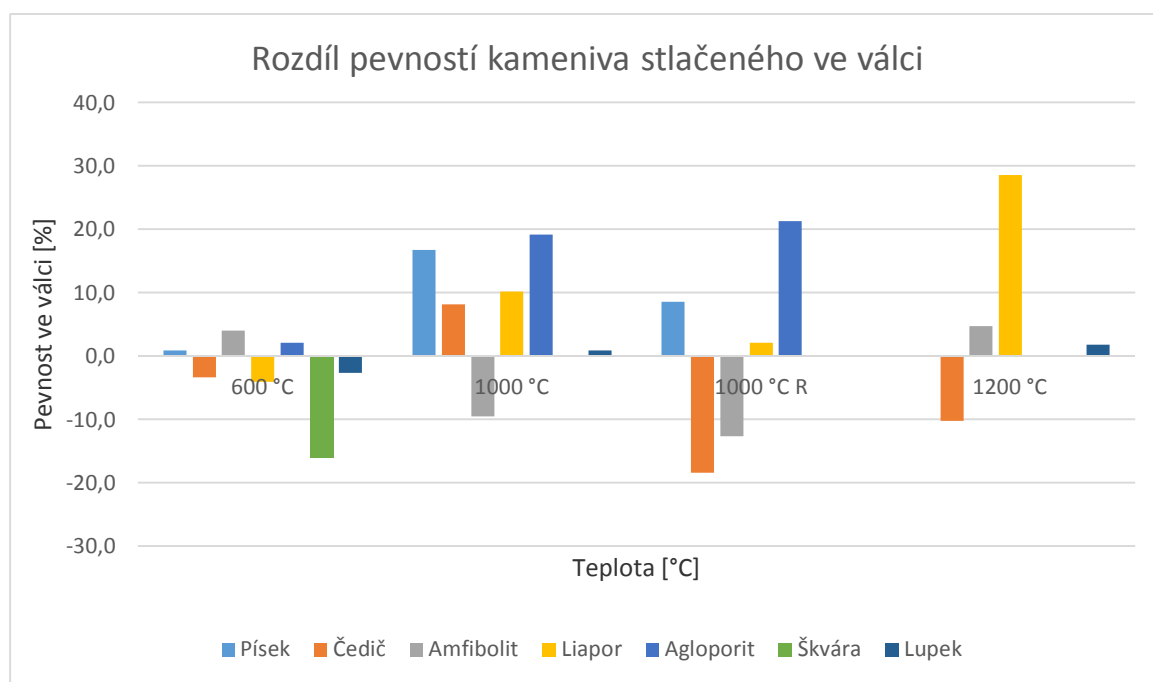
vzorek	Teplota	Mezerovitost [%]	Změna mezerovitosti [%]	Sypná hmotnost [kg/m ³]	Změna sypné hmotnosti [%]
Živcový písek	22 °C	46,8	-	1420	-
	600 °C	47,9	-2,4	1380	2,8
	1000 °C	45,1	-3,7	1450	2,1
	1000 °C rychlé chlazení	46,8	0,1	1430	0,7
	1200 °C	Netestováno	Netestováno	Netestováno	Netestováno
Čedič	22 °C	49,5	-	1530	-
	600 °C	47,5	4,0	1590	-3,9
	1000 °C	47,3	-4,4	1580	3,3
	1000 °C rychlé chlazení	49,8	0,7	1500	-2,0
	1200 °C	51,6	4,3	1470	-3,9
Amfibolit	22 °C	47,4	-	1530	-
	600 °C	47,8	-0,8	1530	0,0
	1000 °C	49,3	4,0	1480	-3,3

	1000 °C rychlé chlazení	48,6	2,5	1480	-3,3
	1200 °C	49,1	3,6	1460	-4,6
Liapor	22 °C	44,9	-	540	-
	600 °C	43,3	3,6	550	-1,9
	1000 °C	42,7	-4,9	550	1,9
	1000 °C rychlé chlazení	46,7	3,9	560	3,7
	1200 °C	48,6	8,2	550	1,9
Agloporit	22 °C	62,3	-	580	-
	600 °C	63,2	-1,3	560	3,4
	1000 °C	64,0	2,6	580	0,0
	1000 °C rychlé chlazení	62,0	-0,5	600	3,4
	1200 °C	Netestováno	Netestováno	Netestováno	Netestováno
Škvára	22 °C	58,4	-	890	-
	600 °C	56,1	4,0	900	-1,1
	1000 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1000 °C rychlé chlazení	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
	1200 °C	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno	Nestanoveno
Lupek	22 °C	61,0	-	960	-
	600 °C	60,9	0,1	950	1,0
	1000 °C	60,6	-0,7	970	1,0
	1000 °C rychlé chlazení	59,8	-1,9	980	2,1
	1200 °C	60,8	-0,3	960	0,0

Pozn: U kameniv, která nebyla testována, došlo ke spečení zrn. U kameniva, která nebyla stanovená, došlo k tavení.



Obrázek 43: Pevnost testovaného kameniva stlačením ve válci (expozice 22 až 1200 °C)



Obrázek 44: Rozdíl pevností testovaného kameniva stlačeného ve válci

V grafu (viz Obr. 43,44) jsou uvedeny pevnosti a rozdíly pevností kameniv stlačením ve válci. Nejvyšší pevnosti dosahoval při všech teplotách živcový písek. To je pravděpodobně způsobeno plynulou křivkou zrnitosti a vysokou sypanou hmotností a poměrně nízkou mezerovitostí. To způsobí, že vzduchové mezery jsou vyplněny zrny kameniva a pro jejich

stlačení je nutné použít vyšší zatěžovací sílu. Vysoké pevnosti napomáhá také nízká pórovitost. Nejvyšší pevnost tohoto vzorku byla dosažena při teplotním zatížení na 1000 °C, kdy dosahovala 25,8 MPa a tím proti referenčnímu vzorku dosáhla zvýšení pevností o 16,7 %. Kamenivo Žabčice vykazuje nižší hodnoty pevností při šokovém ochlazení než u pozvolného chlazení. Při rychlém ochlazení pravděpodobně dochází k popraskání zrn a následné ztrátě pevností.

U amfibolitu dochází při působení vysoké teploty ke snižování pevností. Při rychlém ochlazení se tyto hodnoty snižují až o 12,7 %. Při teplotě 1200 °C se pevnost naopak zvyšuje o 4,8 %. To je způsobeno výrazným snížením pórovitosti a tím snížením obsahu vzduchu ve vzorku. Zvýšení pevnosti způsobuje také změna zrnitosti (vyšší podíl jemných částic) a tím i mezerovitosti.

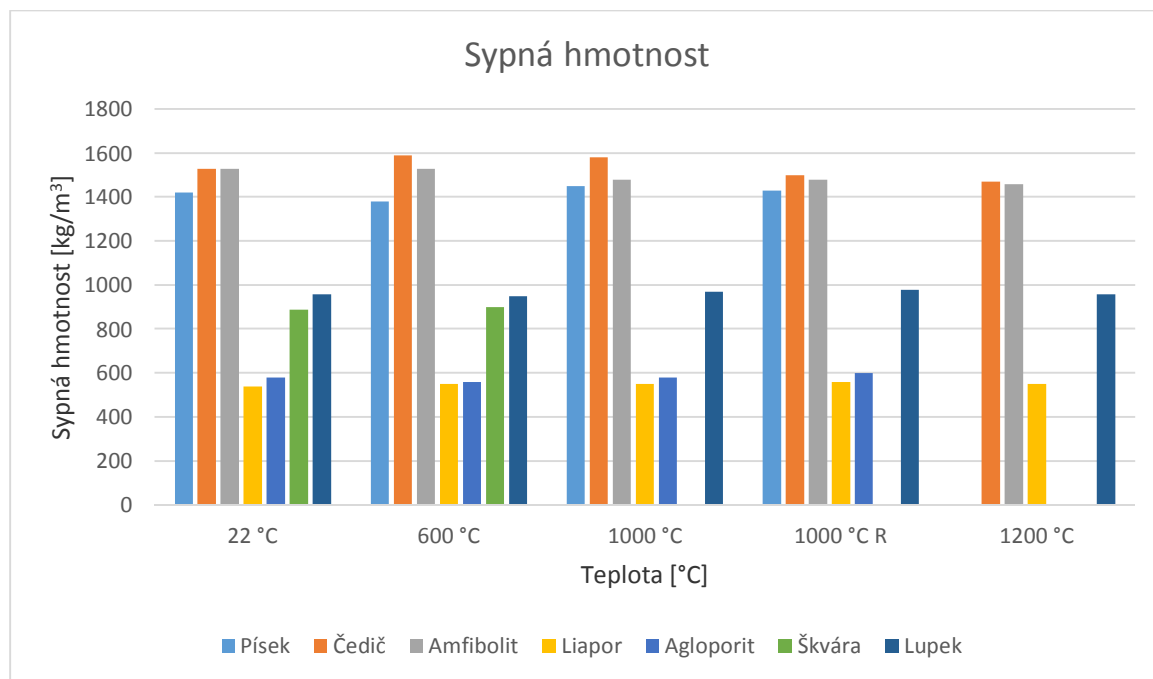
Čedič svoji pevnost zvyšuje při teplotě 600 a 1000 °C. Změna nastává při rychlém ochlazení, kdy nastala velká ztráta pevností až o 18,4 %. Tato ztráta je opět zapříčiněna s největší pravděpodobností praskáním zrn v důsledku rychlé změny teploty.

S rostoucí teplotou rostly i pevnosti u kameniva liapor. Největší nárůst je patrný u 1200 °C (28,6 %) což je způsobeno natavením kameniva. Tato skutečnost souvisí s rostoucí objemovou i měrnou hmotností a snižováním pórovitosti. Nejnižší nárůst je zaznamenán u rychlého chlazení (2,0 %).

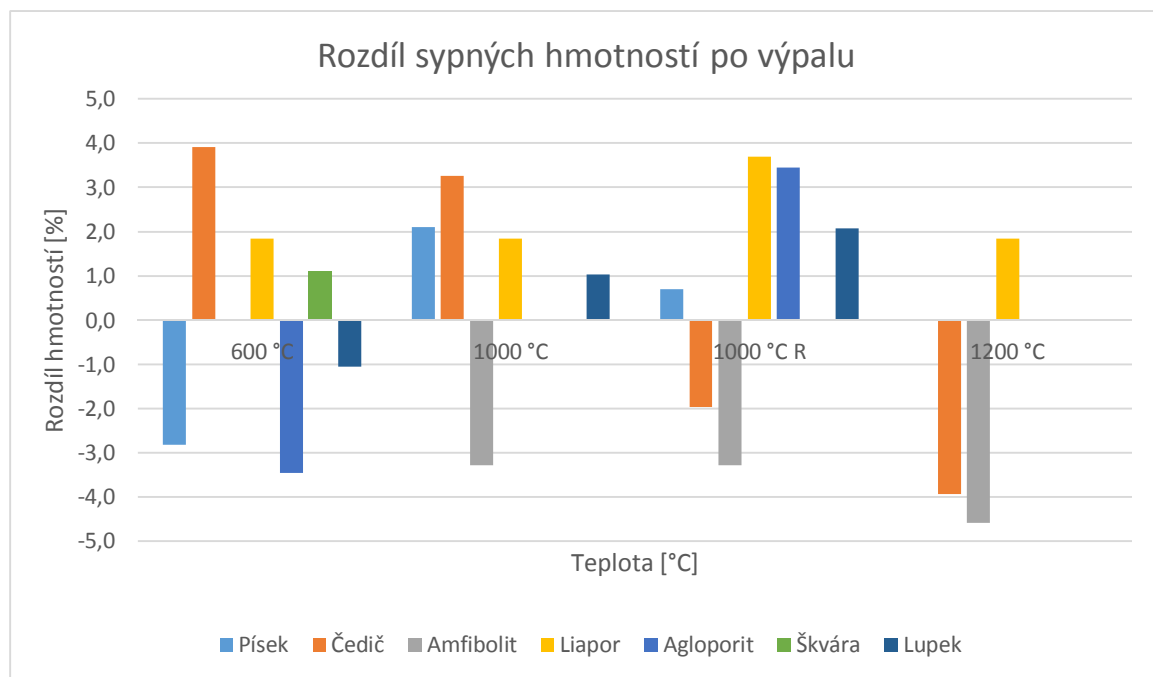
Agloporit do 600 °C snížil svoji pevnost o 2,1 %. Při teplotě 1000 °C se naopak jeho pevnost zvýšila o 19,1 %. Ani rychlé ochlazení nemělo vliv na růst hodnot a agloporit svoji pevnost zvýšil o 21,3 %. Hodnoty při 1200 °C nebylo možné stanovit, protože došlo ke spečení.

Škvára byla nejméně odolným zástupcem kameniv a změna pevností byla stanovena pouze u teploty 600 °C. Pravděpodobně zde docházelo k počátku tavení, a proto se pevnost zvýšila (16,1 %).

Lupek se projevil dle očekávání jako nejodolnější kamenivo. Teplota na jeho pevnost stlačením ve válci neměla prakticky žádný vliv.

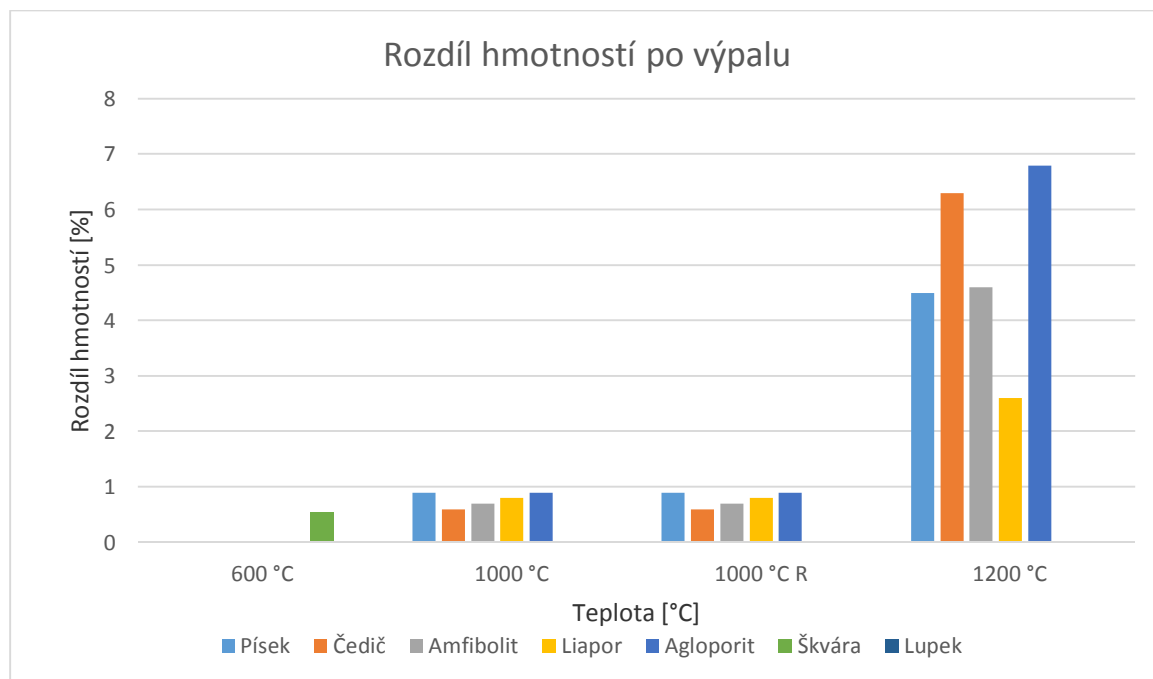


Obrázek 45: Sypná hmotnost testovaných kameniv (expozice 22 až 1200 °C)



Obrázek 46: Rozdíl sypných hmotností testovaných kameniv po výpalu

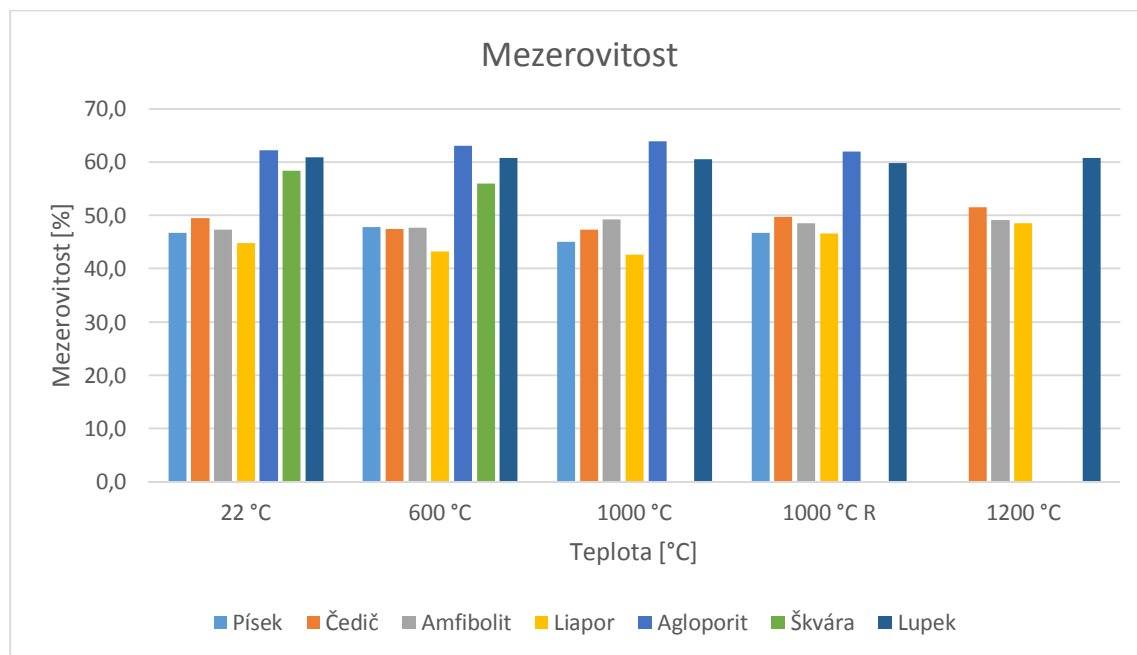
Nejvyšší sypné hmotnosti dosahovala přírodní hutná kameniva (čedič, amfibolit) U amfibolitu se sypná hmotnost snižovala s působením vyšších teplot.



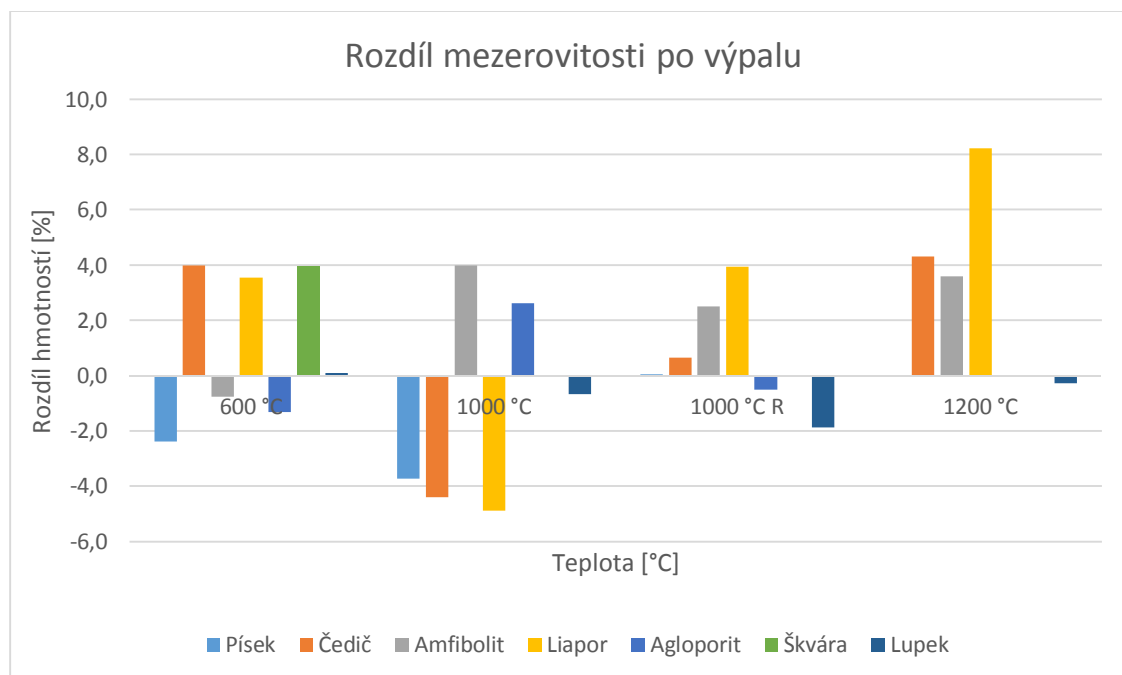
Obrázek 47: Rozdíl hmotností testovaných kameniv po výpalu

Nejvyšší rozdíly v hmotnostech nastaly u teplot 1200 °C. Největší rozdíl byl zaznamenán u agloporitu, který při 600 °C nezaznamenal žádný hmotnostní úbytek, při 1000 °C činil úbytek 0,9 % a při 1200 °C se zvýšil až na 6,8 %.

Nejodolnějším zástupcem je opět lupek, u kterého nejsou žádné změny. Rozdíly mezi pozvolným a rychlým chlazením nejsou patrné. Hmotnostní stálost prokázal také liapor, který při působení 1200 °C změnil svojí váhu o 2,6 %.



Obrázek 48: Mezerovitost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)

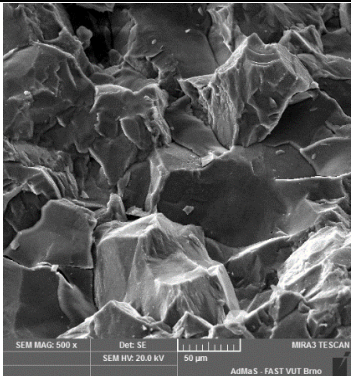
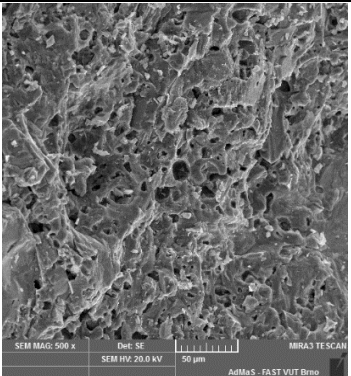
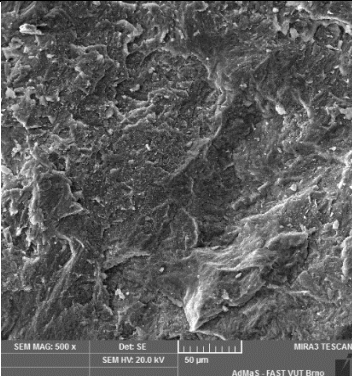
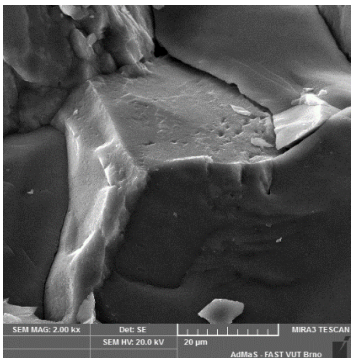
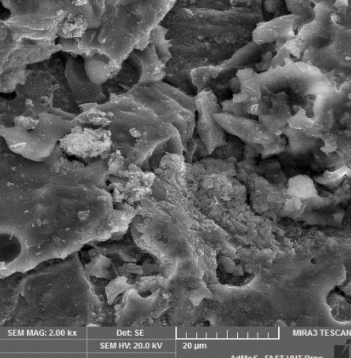
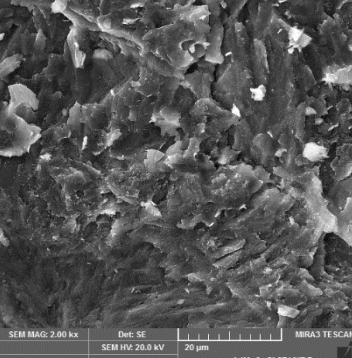
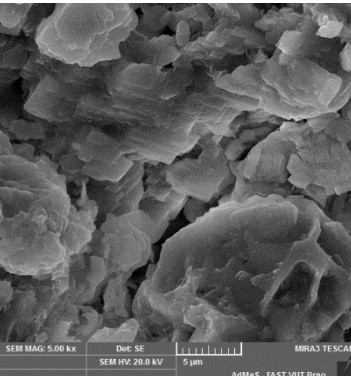
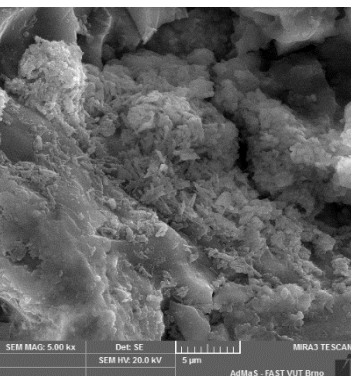
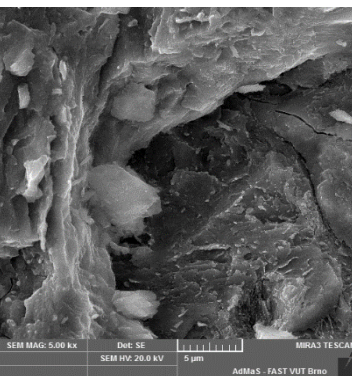
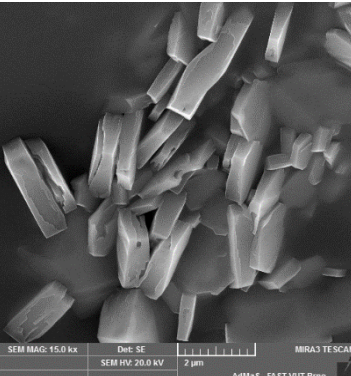
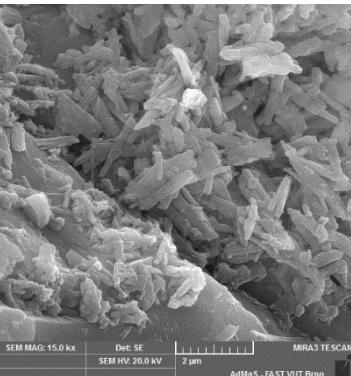
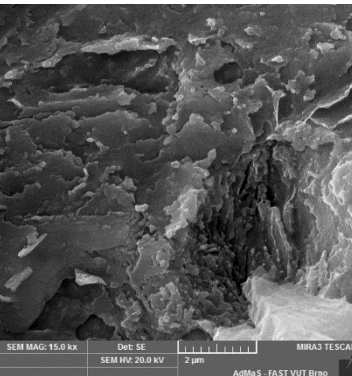


Obrázek 49: Změna mezerovitosti testovaných kameniv po výpalu

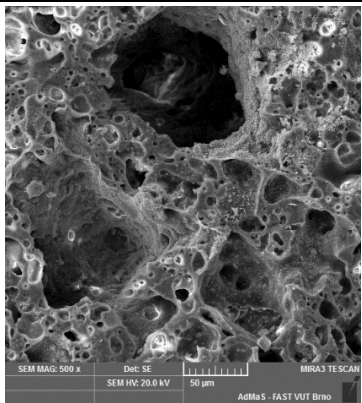
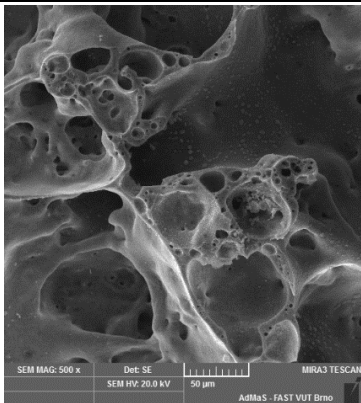
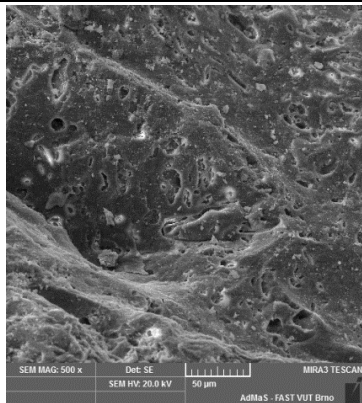
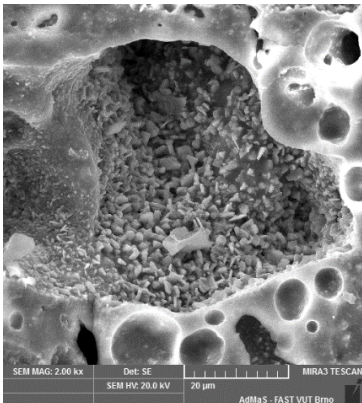
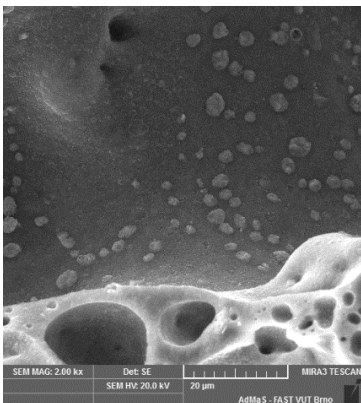
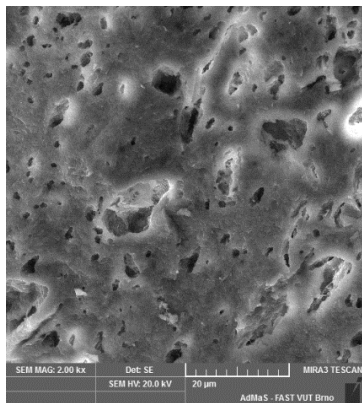
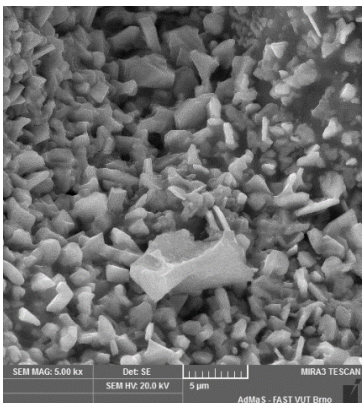
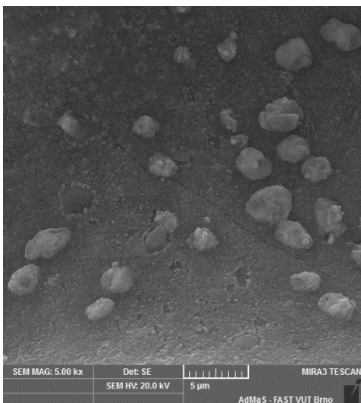
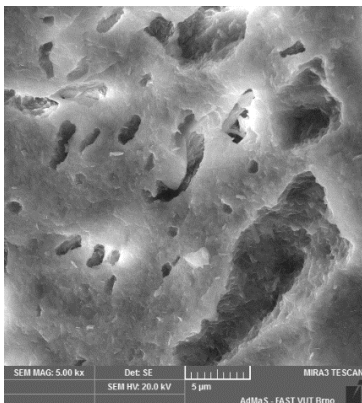
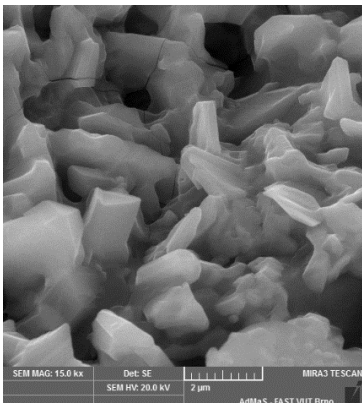
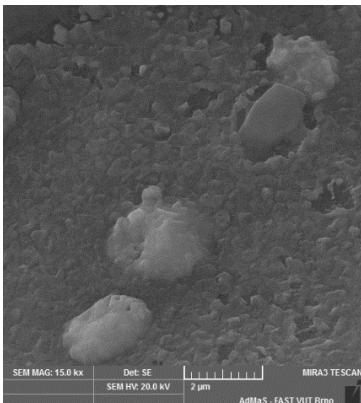
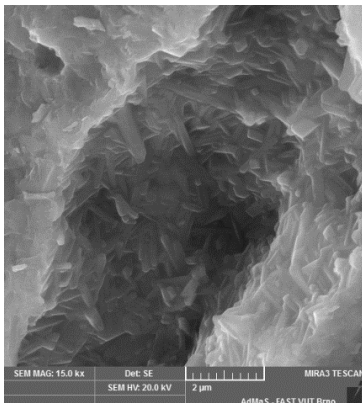
4.5.1.6 Vyhodnocení SEM

Pro metodu SEM nebyla použita plocha povrchu vzorku, ale na rozlomený vzorek, na kterém se zkoumala vnitřní struktura zrna. Na snímcích je například vidět pórovitá struktura vzorků, vzniklá tavenina, trhliny a lomové plochy.

Tabulka 31: Vybrané snímky pořízené pomocí SEM – Kameniva exponovaná při 1200 °C

	Živcový písek	Čedič	Amfibolit
500 x zvětšeno			
2000 x zvětšeno			
5000 x zvětšeno			
15000 x zvětšeno			

Tabulka 32: Vybrané snímky pořízené pomocí SEM – Kameniva exponovaná při 1200 °C

	Agloporit	Liapor	Lupek
500 x zvětšeno			
2000 x zvětšeno			
5000 x zvětšeno			
15000 x zvětšeno			

Na snímku s živcovým pískem, který je 500x zvětšen, je vidět jeho lomová plocha. Pórovitá struktura je vidět na snímku s čedičem, který je 500x zvětšen. Pórovitou strukturu má také liapor a agloporti (snímek 500x zvětšeno). Na snímku u agloporitu se vyskytují zrna nataveného popílku (500x zvětšeno).

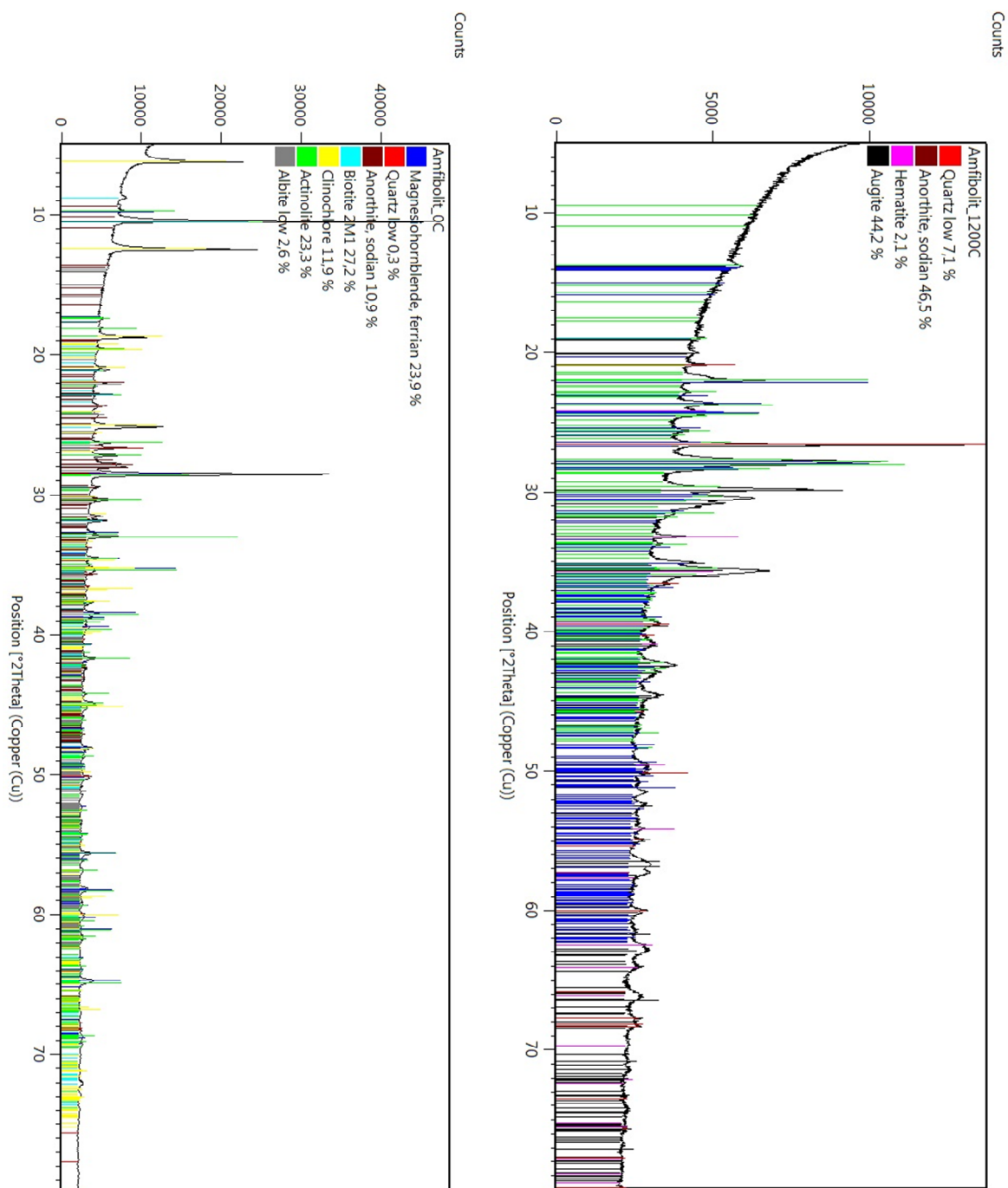
4.5.1.7 Vyhodnocení RTG

Reprezentativní detailní hodnocení mineralogie je uvedeno v případě amfibolitu a čediče, kde jsou podrobně popsány fázové změny při zatížení vysokou teplotou.

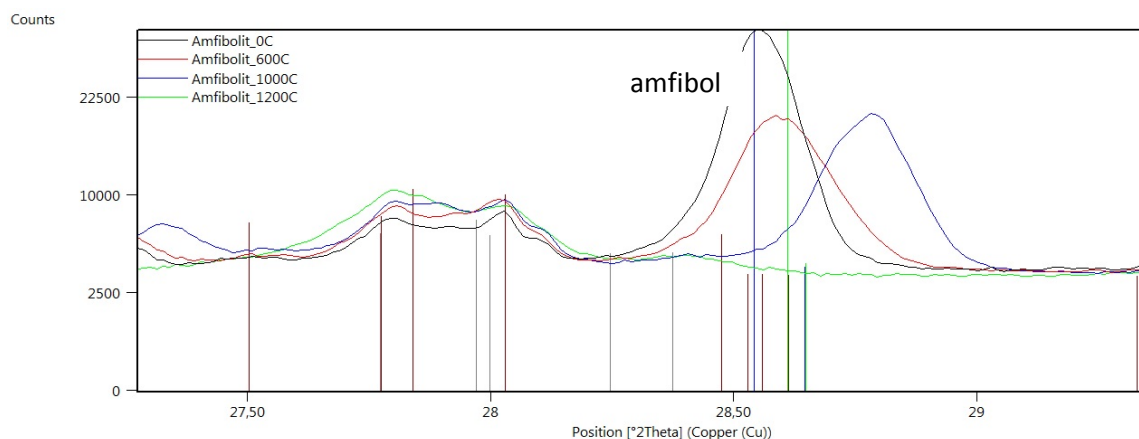
Amfibolit

Záznam u referenčního vzorku byl pořízen s parametrem shody (RWP) 5,130 %. U vzorku zatíženého na 1200 °C byla hodnota parametru shody (RWP) 4,611 %. Pozice záznamu byla ověřena pomocí difrakční polohy křemene.

Na záznamech je uvedeno zastoupení jednotlivých minerálů. U vzorků zatížených vysokou teplotou (1200 °C), kde vzniká tavenina, je konstatován pouze krystalický podíl. Nebyl kvantifikován přesný podíl amorfni fáze, která je ale pouze odhadována na 40 %.

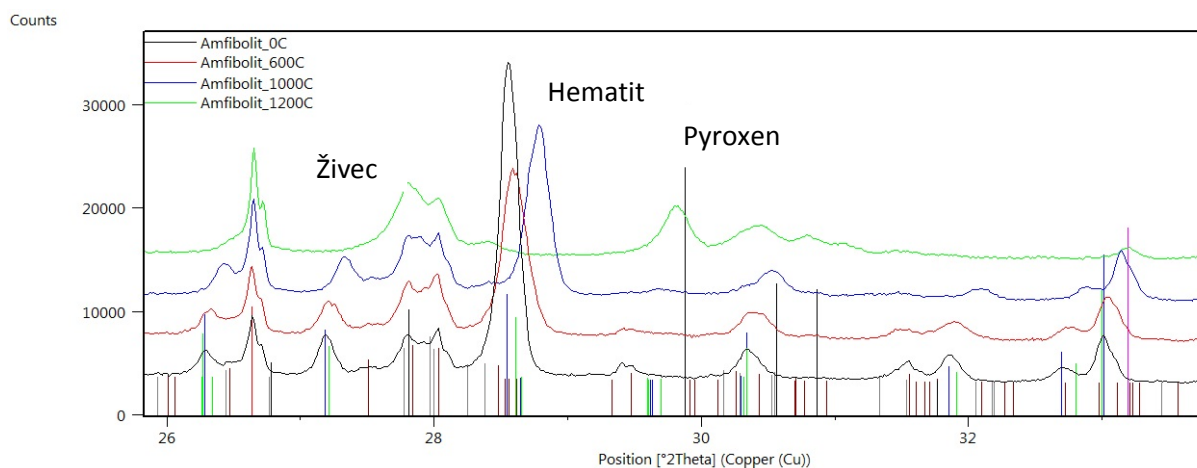


Obrázek 50: Amphibolit zatížený na 22 °C, 1200 °C

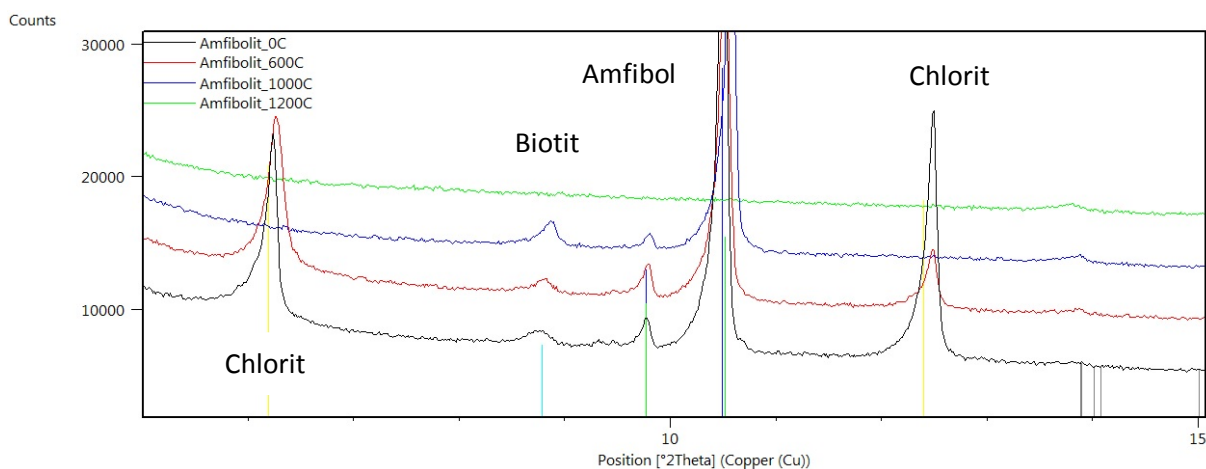


Obrázek 51: Amfibolit – dehydroxylace (rozklad) amfibolu

Na obrázku č. 51 je vidět posun difrakčních linií amfibolu, posun mezi referenčním vzorkem a vzorkem zatíženého na 600 °C. Posun píku je způsoben dehydroxylací amfibolu.



Obrázek 52: Amfibolit – rozklad živce, hematitu a vznik pyroxenu



Obrázek 53: Amfibolit – rozpad chloritu, biotitu, amfibolu

Na obrázku č. 53 je opět vidět posun píku, způsoben dehydroxylací. Biotit se při 1000 °C začíná rozpadat a při 1200 °C úplně zmizí.

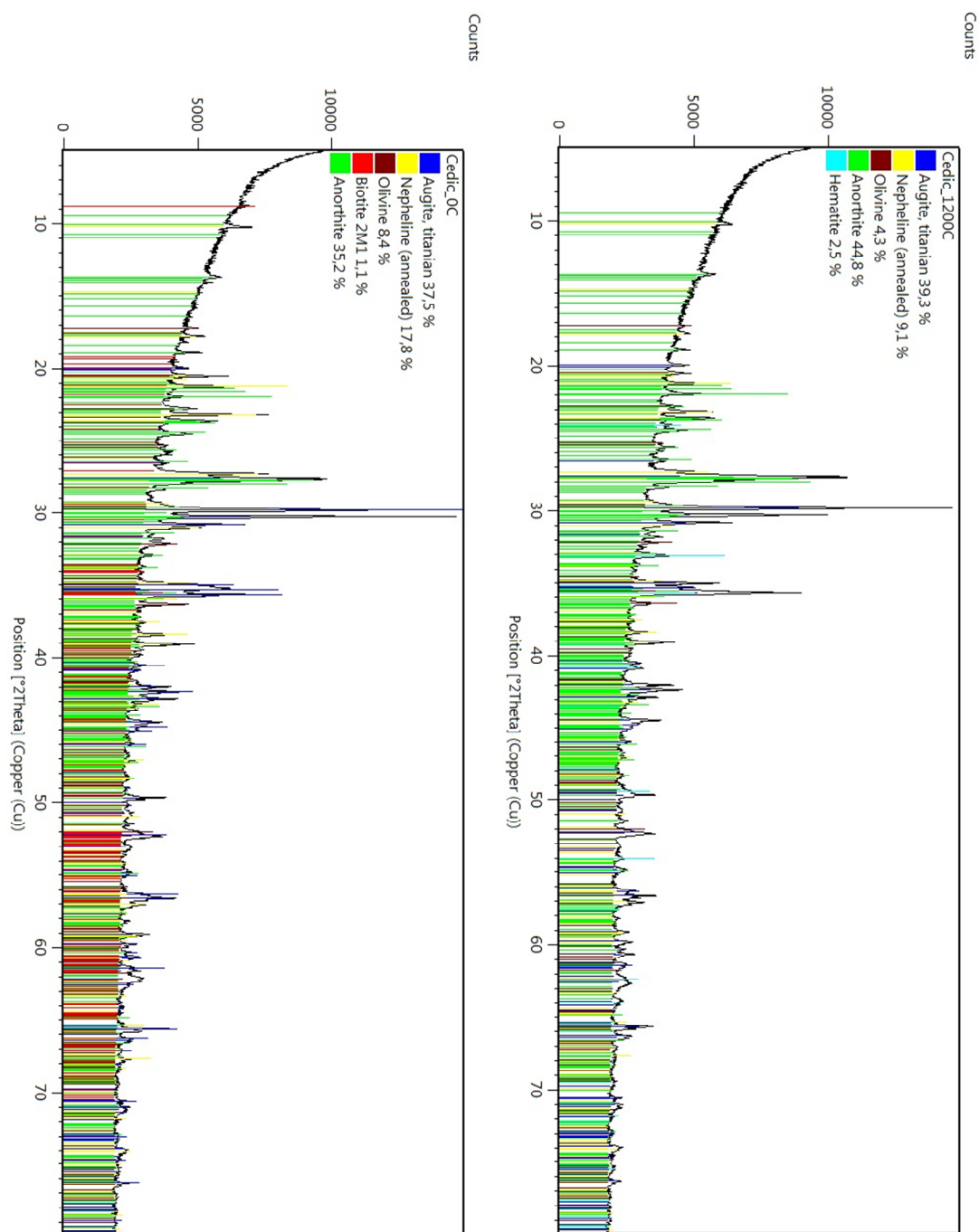
Vzorek, zatížen teplotou 1000 °C s rychlým ochlazením, nevykazoval žádné změny.

Čedič

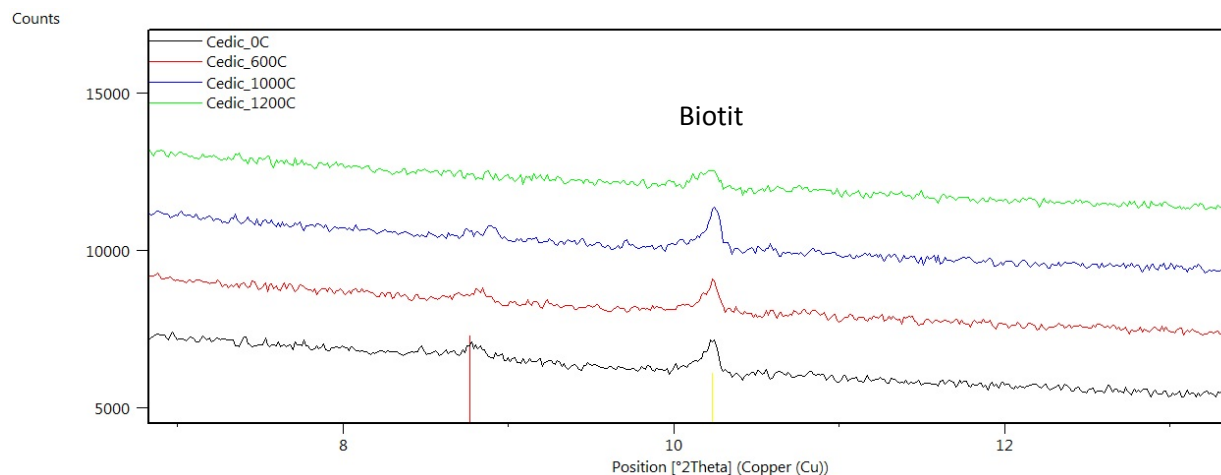
Záznam u referenčního vzorku byl pořízen s parametrem shody (RWP) 6,294 %. U vzorku zatíženého na 1200 °C byl parametr shody (RWP) 6,176.

Na záznamech je uvedeno zastoupení jednotlivých minerálů. U vzorků zatížených vysokou teplotou (1200 °C), kde vzniká tavenina, je konstatován pouze krystalický podíl. Nebyl kvantifikován přesný podíl amorfni fáze, která je ale odhadována na 50 %.

Zastoupení jednotlivých prvků může být mírně zkresleno množstvím amorfni fáze, u které nebylo zjištěno její přesné množství.

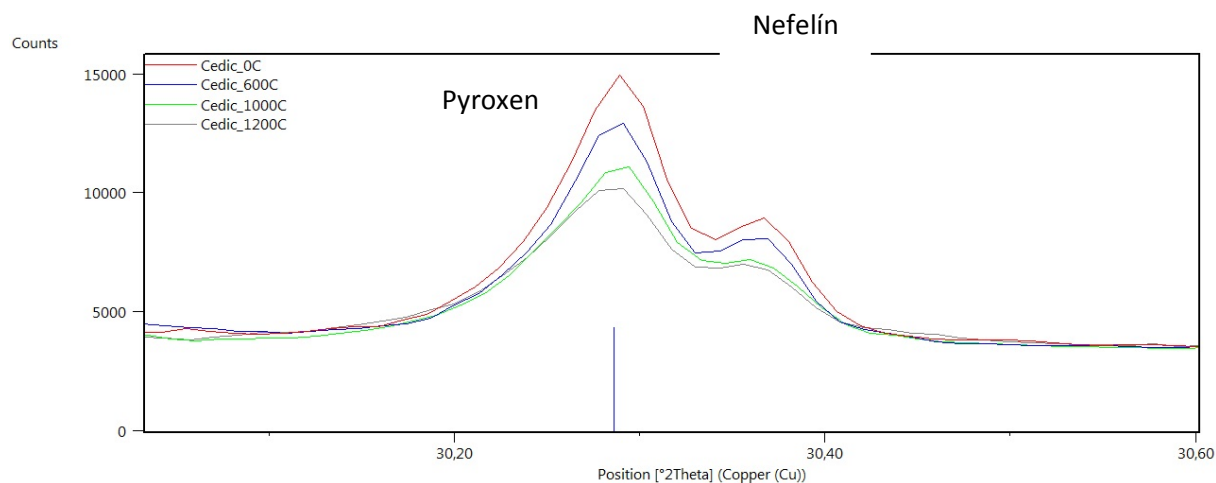


Obrázek 54: Čedič zatížený na 22 °C, 1200 °C



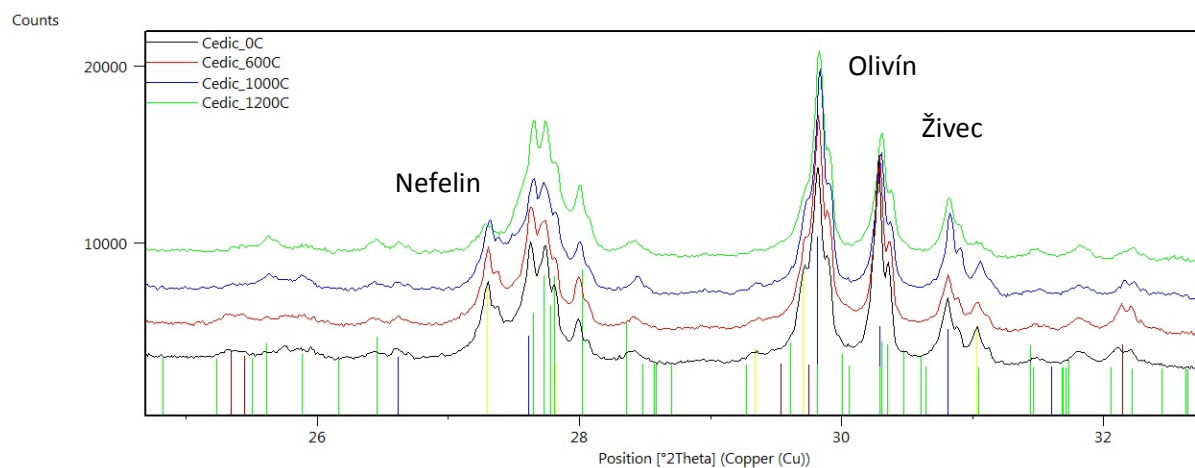
Obrázek 55: Porovnání čediče – referenční, 600 °C, 1000 °C, 1200 °C

Na obrázku č. 55 je možné pozorovat postupné mizení biotitu (hnědá barva), které může začínat u teplot mírně nad 600 °C. U teploty 1000 °C se tento trend zintenzivnil a při teplotě 1200 °C dochází k jeho úplnému zmizení. Dále se dá ze záznamu zjistit, že je zde pravděpodobně přítomen i nefelin (žlutá barva), u kterého se snižuje intenzita při zatížení teplotou na 1200 °C.

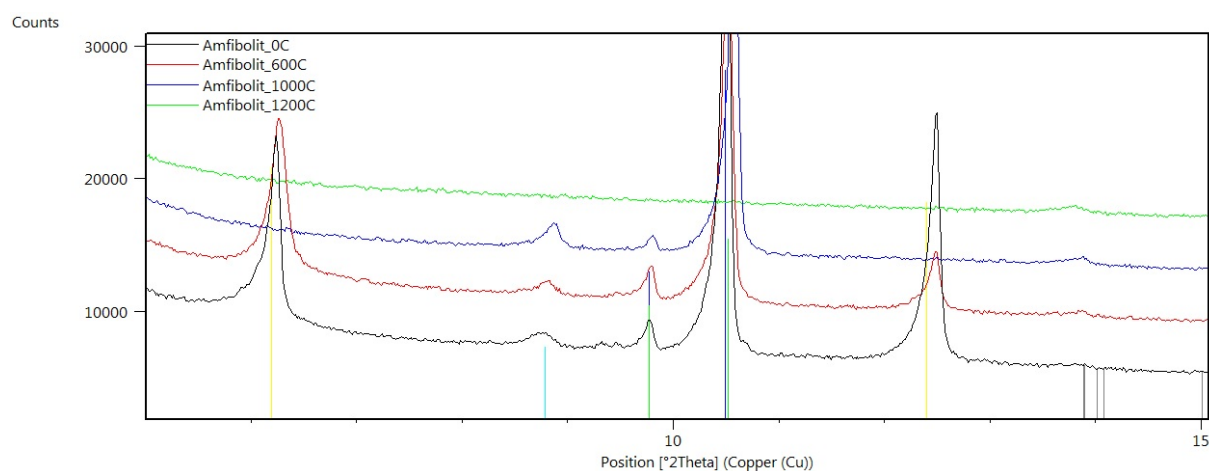


Obrázek 56: Čedič – úbytek pyroxenu

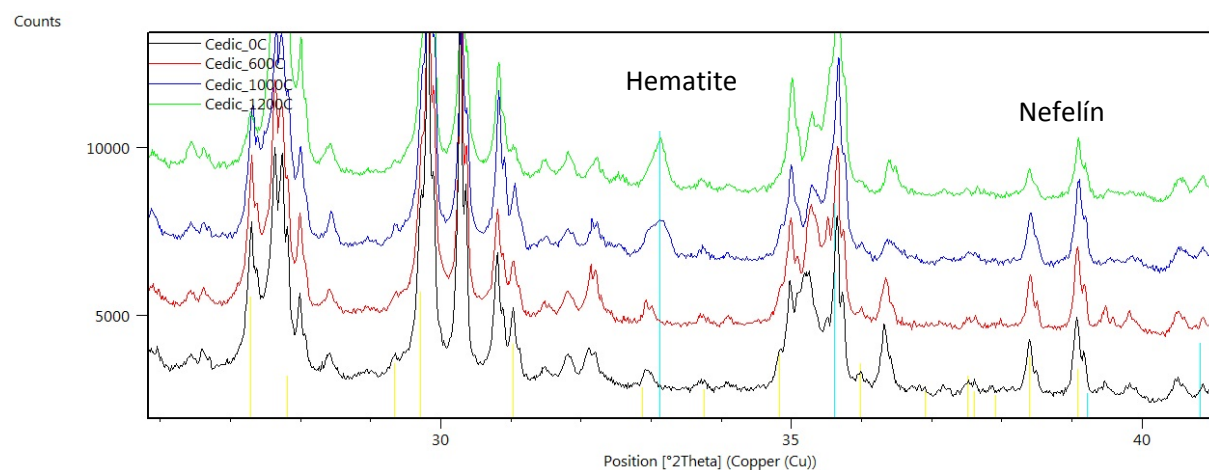
Na obrázku č. 56 je zaznamenáno při teplotě 1200 °C zvýšení množství živců (sodno-vápenatých). Dále zde dochází k pravděpodobnému tavení a následnému snižování množství olivínu.



Obrázek 57: Čedič – úbytek nefelínu, olivínu, vzrůst množství živců

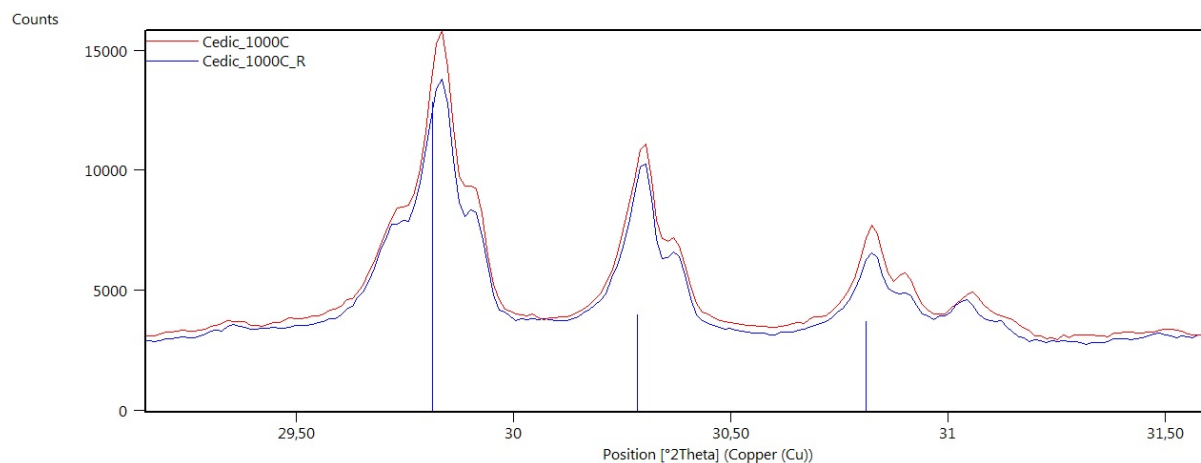


Obrázek 58: Čedič – rozklad chloridu, biotitu, amfibolu



Obrázek 59: Čedič – úbytek nefelínu, vznik hematitu

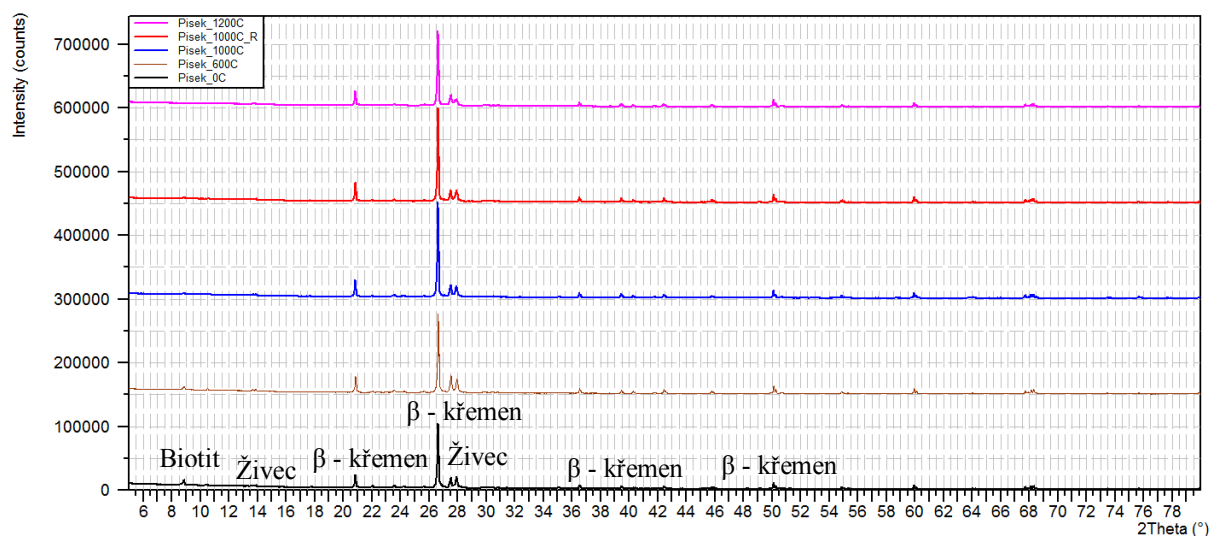
Na obrázku č. 59 je vidět, že se při teplotě 600 °C postupně rozpadá nefelín a při teplotě 1000 °C se již nevyskytuje. Při teplotě 1000 °C vzniká díky oxidaci hematit.



Obrázek 60: Čedič – porovnání postupného chlazení a vzorků s rychlým ochlazením

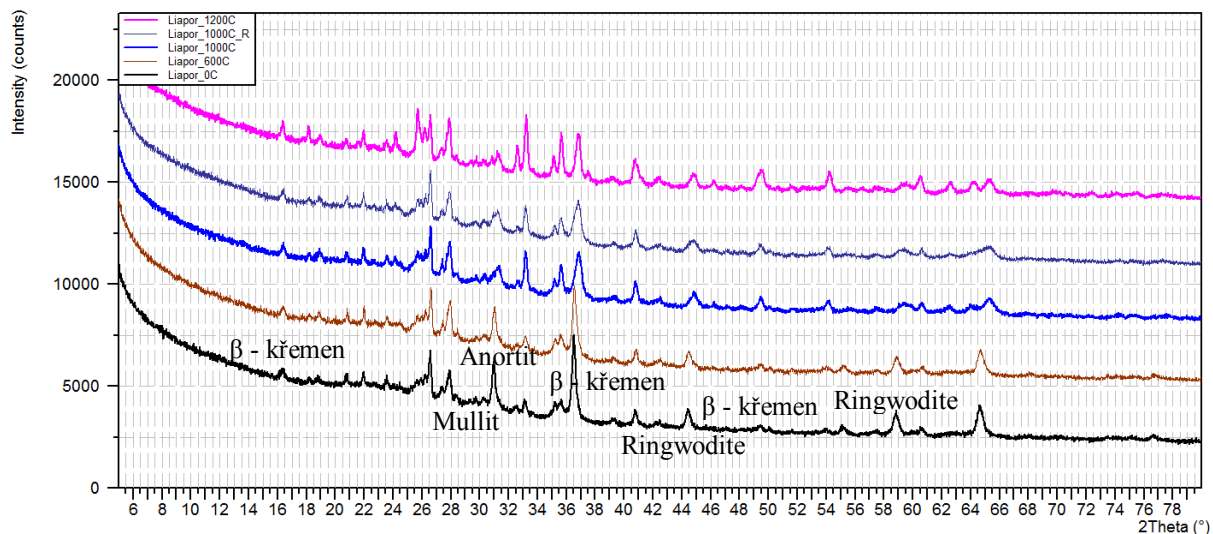
U rychlého ochlazení z 1000 °C na laboratorní teplotu se změnilo jen množství pyroxenů, které se snížilo.

Živcový písk



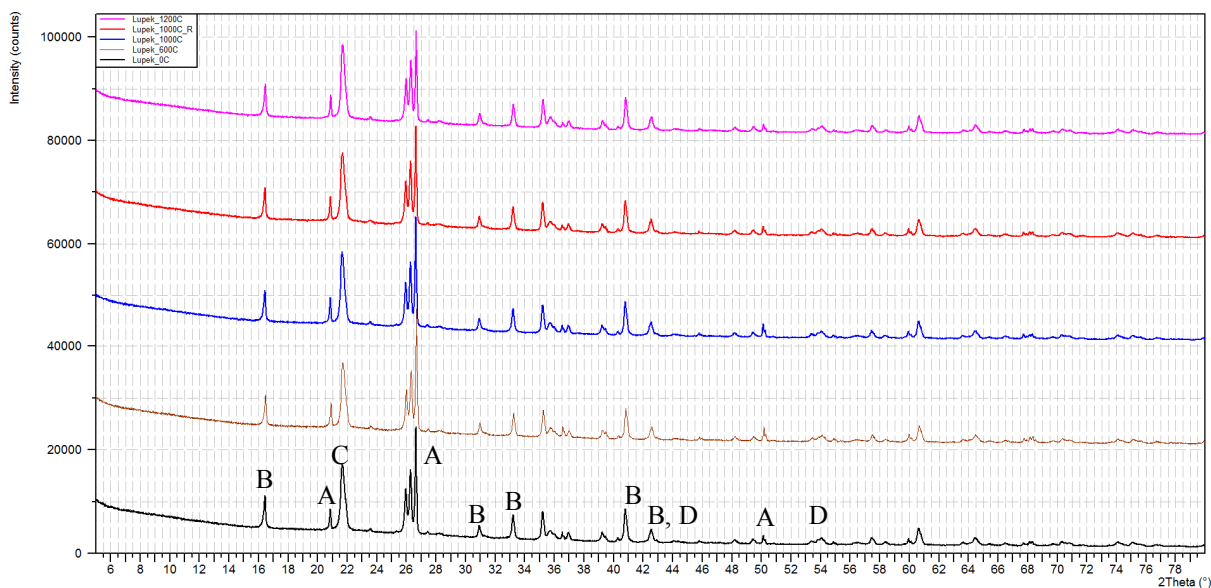
Obrázek 61: Živcový písk - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Při teplotě 1000°C dochází k úplnému rozpadu biotitu a snižuje se množství živců. U β – křemene dochází k nárůstu intenzity.

Liapor

Obrázek 62: Liapor - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Vzorek liapor je stabilní do teploty 1000 °C. Při teplotě 1200 °C vykazuje ztrátu intenzity β – křemene. Dále je zde pozorován rozpad ringwoditu a anortitu. Mullit vykazuje nárůst intenzity. U pozvolného a rychlého chlazení nejsou pozorovány žádné změny.

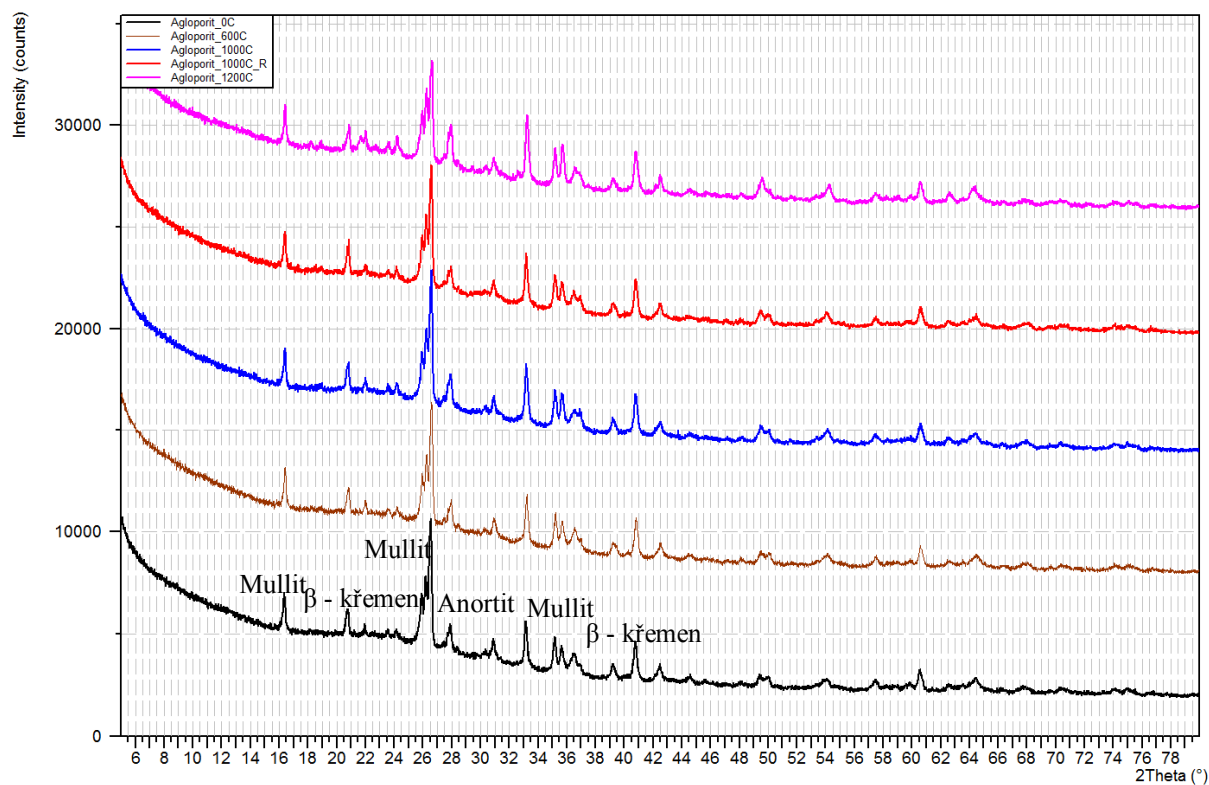
Lupek

Obrázek 63: Lupek - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

A= β – křemen, B= Mullit, C= Triamit, D= Cristobalit

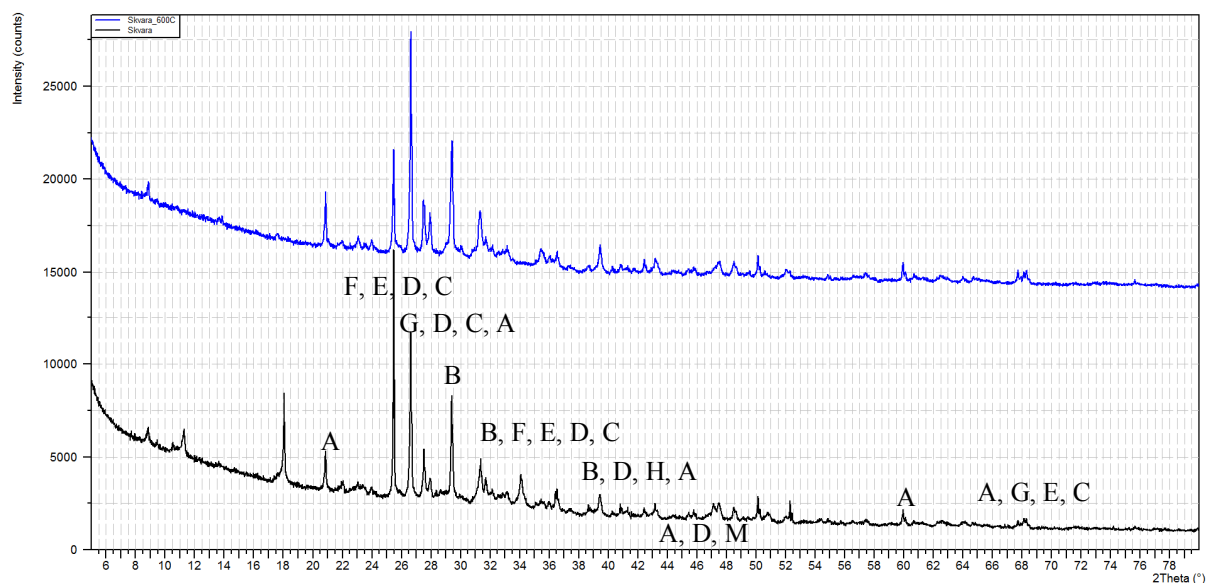
Lupek je velice stabilní vzorek a nevykazuje při teplotním zatěžování žádnou pozorovatelnou změnu.

Agloporit



Obrázek 64: Agloporit - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Agloporit je stabilní plnivo. Ke změnám dochází až při teplotě 1200 °C, kdy dochází ke změnám intenzit.

Škvára

Obrázek 65: Záznam vzorku škvára zatíženého teplotou 600 °C

A= β – křemen, B= calcite, C= muscovite, D= albite, E= Cristobalite, F= Anhydrite, G= Jamundete, H= Hematite

Škvára se při vystavení vysoké teplotě ve všech testech projevila jako velice nestabilní plnivo. I zde jsou pozorovány změny. Dochází k rozpadu jednotlivých minerálů a zároveň ke vzniku nových.

4.5.2 Testování navržených kompozitů

Níže jsou interpretovány výsledky navržených receptur polymercementových malt. Receptury byly navrženy s ohledem na vysokou odolnost vůči vysokým teplotám. Tyto vlastnosti měly být splněny hlavně díky použitému kamenivu, které má zvýšenou odolnost vůči vysokým teplotám. Dále byla zvolena směsná matrice, polymerní modifikátor a rozptýlená výztuž na makromolekulární bázi.

Tabulka 33: Složení směsi

Receptura		
Složka [kg/m ³]	Struska	Popílek
Cement	365	366
Popílek	-	202
Struska	219	-
Silika	31	30
Vinnapas	19	18
Čedič 0 – 2 mm	846	846
Liapor 2 – 4 mm	241	241
Vlákná – Fibrin 315	1,0	1,0
voda	182	146
Vodní součinitel	0,5	0,4

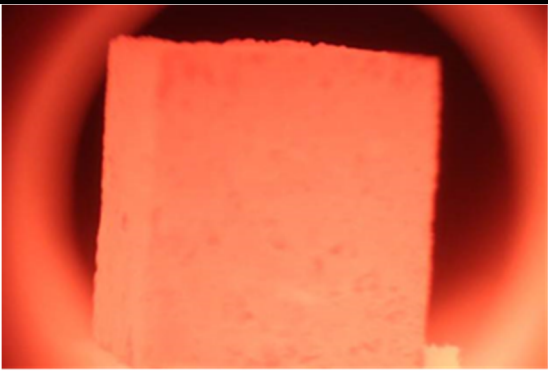
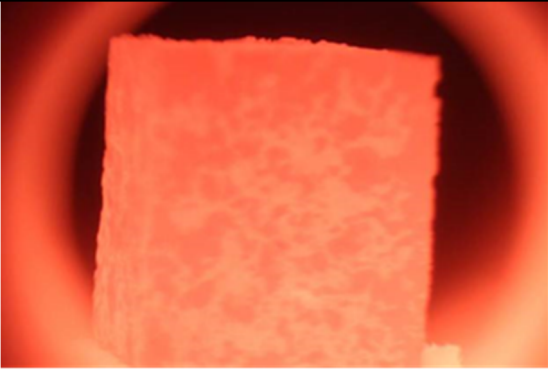
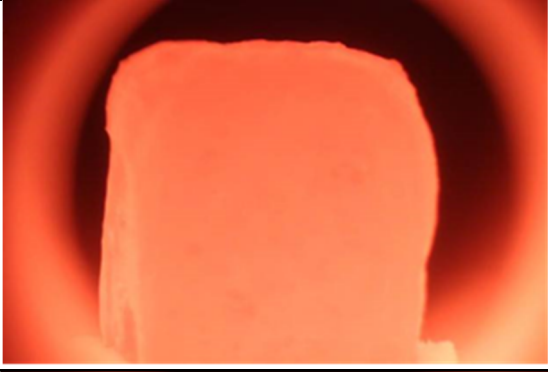
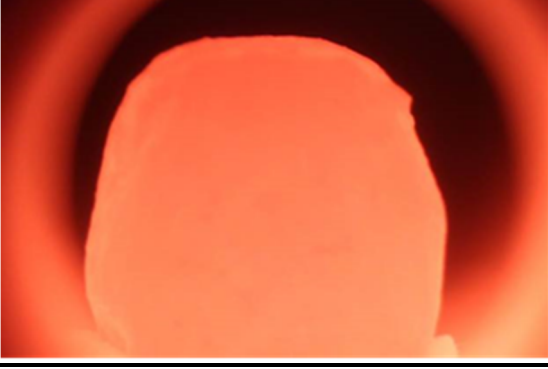
Byly pozorovány změny fyzikálně-mechanických vlastností tepelně zatěžovaných vzorků. Stejně jako kamenivo byly i tyto vzorky zkoušeny na vzorcích nezatížených teplotou (referenční) a zatěžovaných teplotou – 600 °C, 1000 °C, 1200 °C. Nárůst teplot 10 °C/min. a izotermická výdrž 90 minut. Zkoušení probíhalo na vzorcích tvaru hranolu o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Kamenivo Liapor bylo před použitím ve směsi na 24 hodin ponořeno ve vodě.

4.5.2.1 Zatížení vzorku v pozorovací peci

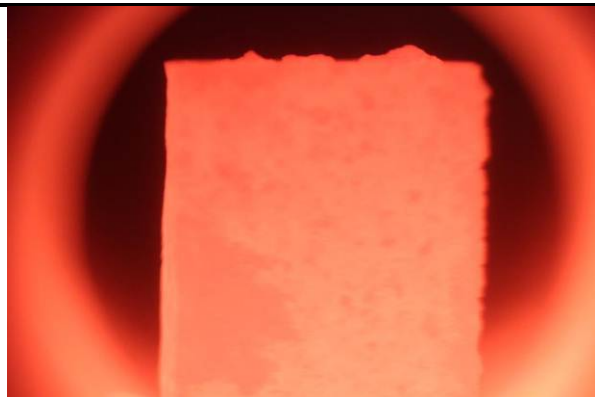
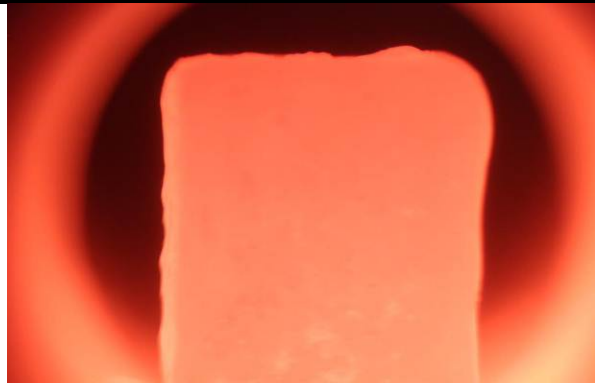
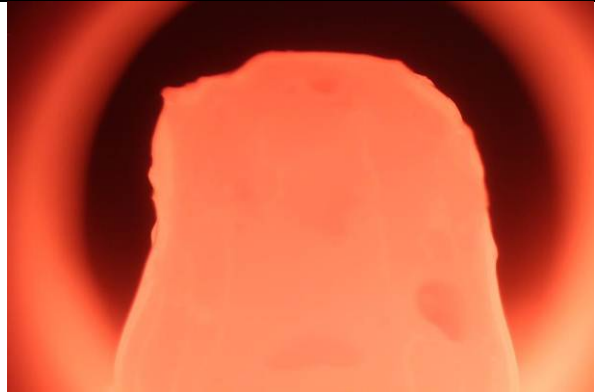
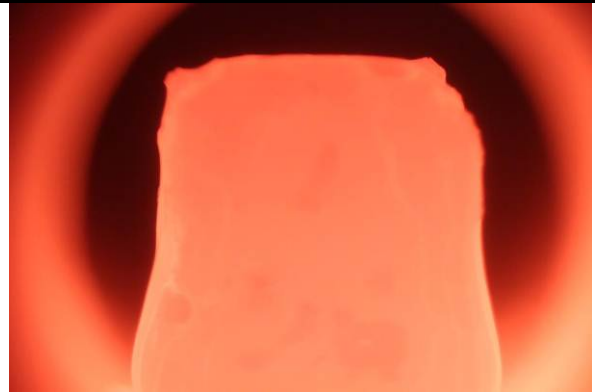
Pro teplotní expozici v pozorovací peci byly zhotoveny vzorky tvaru krychle o hraně 20 mm. Byly pozorovány tvarové změny při strmém nárůstu teplot.

Při teplotách cca 1200 °C docházelo v obou směsích k natavování jednotlivých složek v kompozitu. Při teplotě cca 1240 °C se vzorky začaly tavit výrazněji.

Tabulka 34: Zatížení vzorků vysokou teplotou v pozorovací peci – směs se struskou

	Teplota 1157 °C. Při této teplotě docházelo k prvním viditelným změnám tvaru vzorku.
	Teplota 1205 °C. Dochází ke změně struktury a natavování povrchu
	Teplota 1242 °C. Vzorek se začíná tavit a výrazně mění svůj tvar
	Teplota 1251 °C. Nastává úplná destrukce vzorku.

Tabulka 35: Zatížení vzorků vysokou teplotou v pozorovací peci – směs s popílkem

	Teplota 1166 °C. Při této teplotě docházelo k prvním viditelným změnám tvaru vzorku.
	Teplota 1218 °C
	Teplota 1233 °C
	Teplota 1241 °C

4.5.2.2 Vizuální posouzení vzorků

Tabulka 36: Zhodnocení vzorku malt

Teplota	Receptura	Porušení povrchu	Barva	Porušení na lomové ploše trámečku
600 °C	Struska	Bez viditelného poškození	Šedá	Bez viditelného poškození
	Popílek	Bez viditelného poškození	Šedá	Bez viditelného poškození
1000 °C	Struska	Bez trhlin a dalšího poškození	Střední část – hnědá Obvod trámečku- šedá	Bez viditelného poškození
	Popílek	Bez trhlin a dalšího poškození	Střední část – hnědá Obvod trámečku- šedá	Bez viditelného poškození
1200 °C	Struska	Viditelné trhliny Odprýsknutí cementového tmele na okrajích trámečku Odprýsknutí cementového tmele v místě čediče Patrná změna čediče s počátkem tavení	Hnědá	Hnědá
	Popílek	Viditelné trhliny Odprýsknutí cementového tmele na okrajích trámečku Odprýsknutí cementového tmele v místě čediče Patrná změna čediče s počátkem tavení	Zelenohnědé skvrny Světle hnědá barva cementového tmele	Trhliny v místě dotyku cementového tmele a čedičového kameniva



Obrázek 66: Znázornění trhlin na vzorku ze směsi se struskou – 1200°C



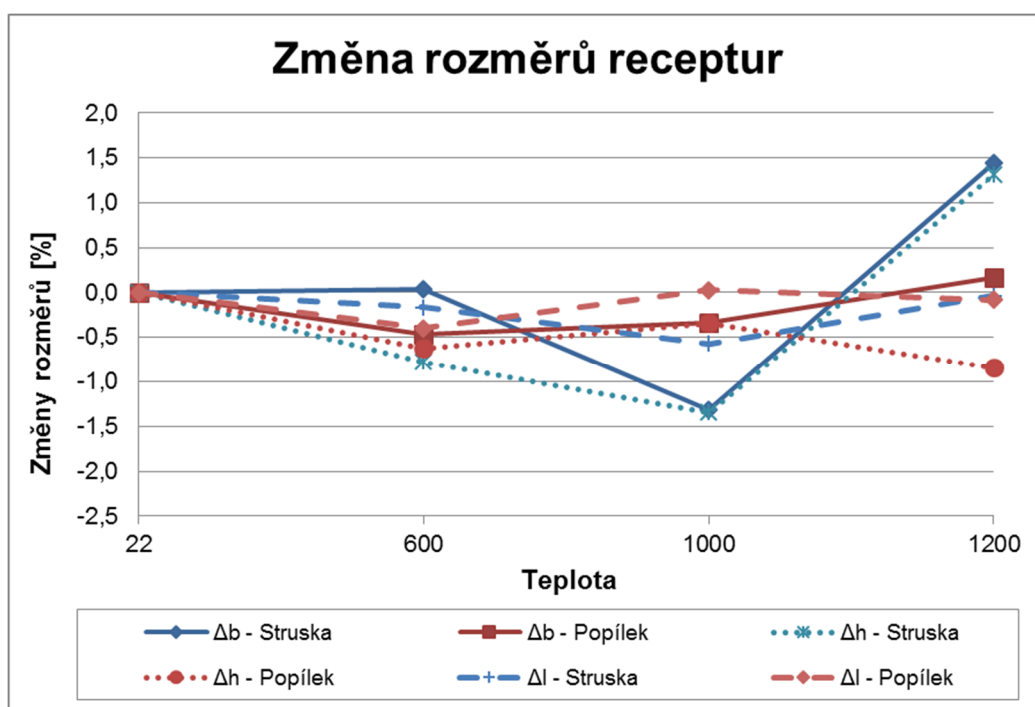
Obrázek 67: Znázornění trhlin na vzorku ze směsi s popílkem – 1200°C

4.5.2.3 Fyzikálně – mechanické parametry malt

V tabulce 37 jsou uvedeny výsledky testování fyzikálně – mechanických parametrů. V grafech níže jsou tyto výsledky vyhodnoceny a porovnány s jednotlivými teplotami.

Tabulka 37: Výsledky testování fyzikálně – mechanických parametrů

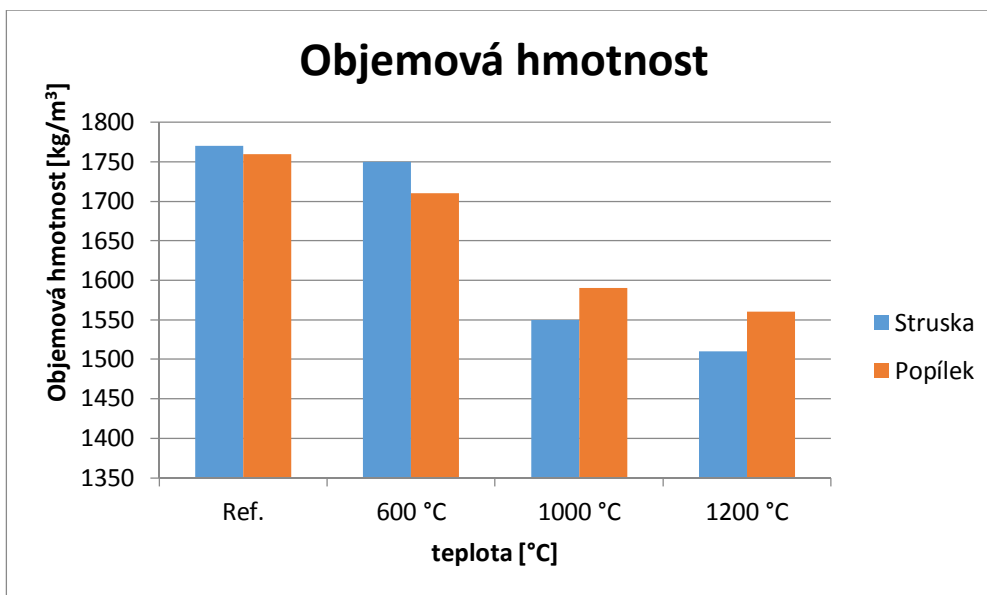
Teplota	Receptura	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Změna objemová hmotnost [%]	Změna pevnosti v tlaku [%]	Změna pevnosti v tahu za ohybu [%]
Ref.	Struska	1770	43,5	9,7	-	-	-
	Popílek	1760	41,3	10,2	-	-	-
600 °C	Struska	1750	37,6	7,5	-1,12	-13,6	-22,7
	Popílek	1710	37,0	8,6	-8,52	-10,4	-15,7
1000 °C	Struska	1550	11,1	3,2	-12,42	-74,5	-67,0
	Popílek	1590	12,2	3,7	-9,65	-70,5	-63,7
1200 °C	Struska	1510	16,2	5,4	-14,68	-62,8	-44,3
	Popílek	1560	16,7	4,9	-11,36	-59,6	-52,0



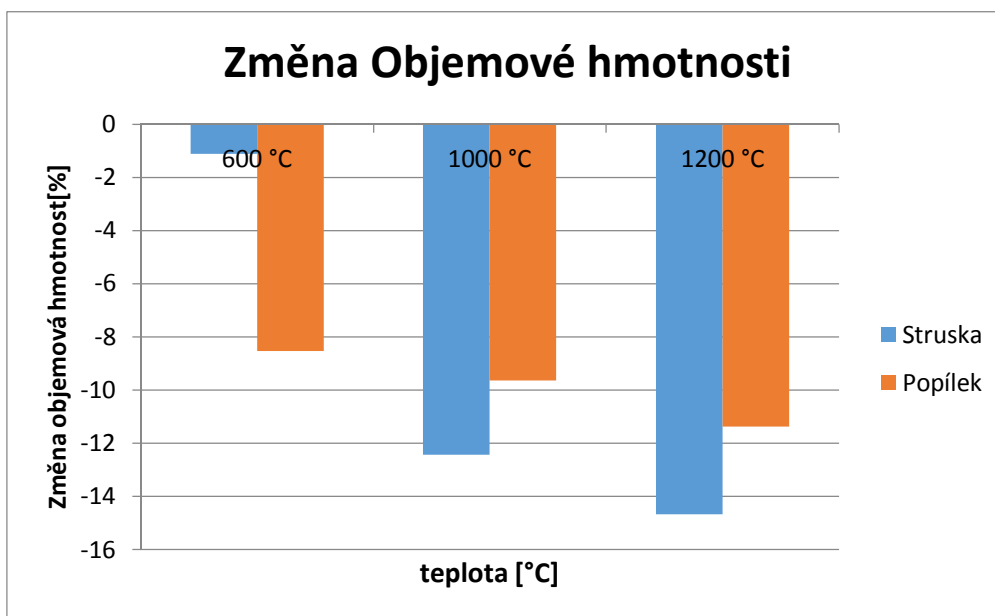
Obrázek 68: Změny rozměrů receptur

V grafu (viz Obr. 68) jsou zobrazeny rozměrové změny směsí. K nejmenším rozměrovým změnám dochází v případě použití popílku, který směs rozměrově stabilizoval. Největší změny nastávají při použití strusky, hlavně v případě délky a výšky. Zajímavá je skutečnost u receptury obsahující strusku kdy se výrazně mění její výška a délka při teplotě

1000 °C. Při tomto stupni tepelného zatížení vzorek vykazuje smrštění. Naopak při teplotě 1200 °C vzorek začíná expandovat (cca 1,5 %).



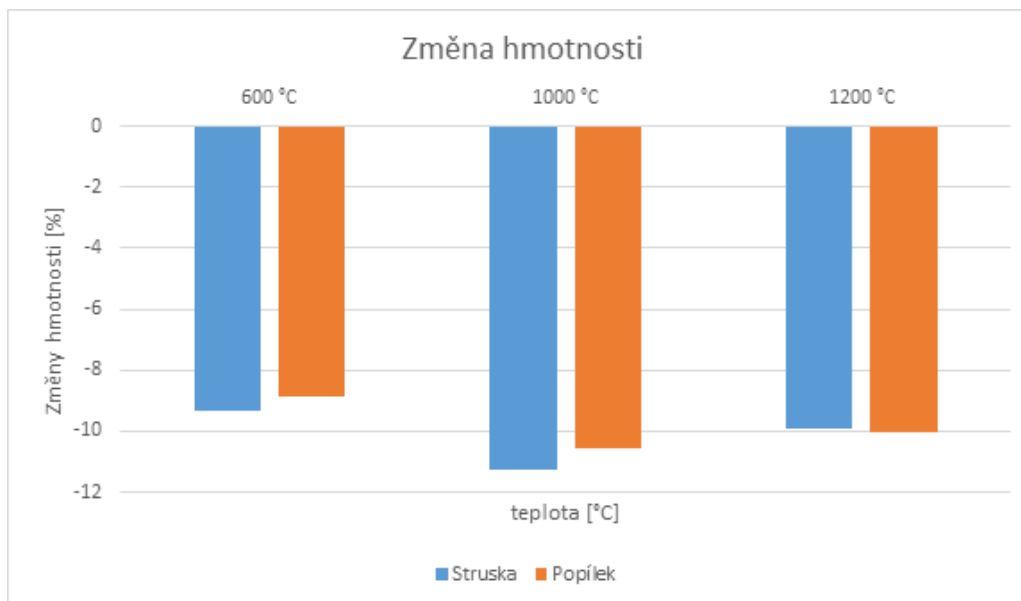
Obrázek 69: Objemová hmotnost



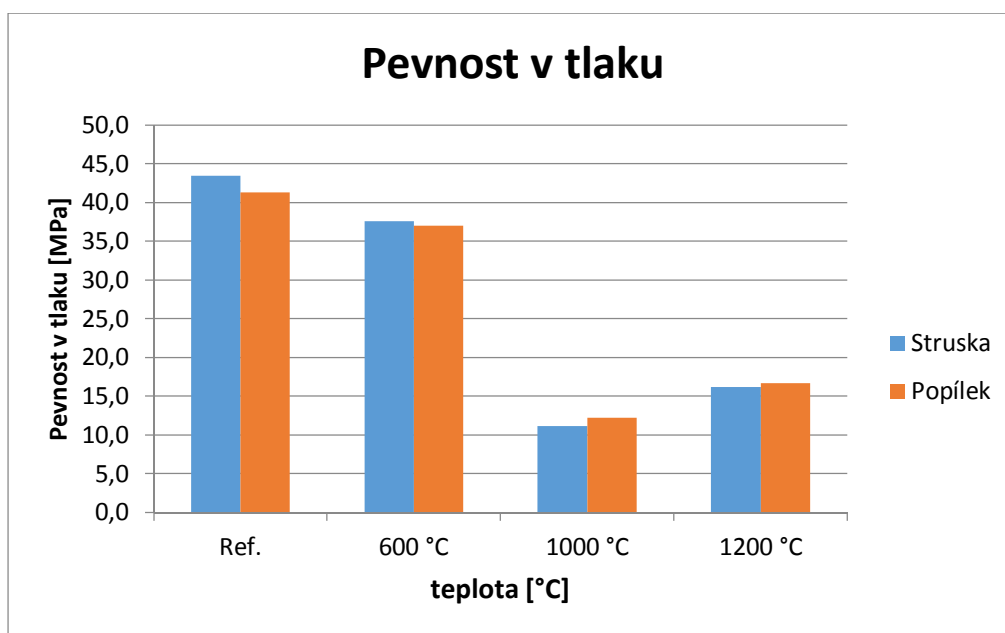
Obrázek 70: Změna objemové hmotnosti

V grafu (viz Obr. 69,70) jsou znázorněny jednotlivé objemové změny a také jejich změny v závislosti na teplotě. Vyšší objemovou hmotnost vzorku nezatíženého teplotou vykazují směsi s použitím strusky. Při teplotě 600 °C obsah strusky způsobil menší změny objemové hmotnosti (1,12 %) než obsah popílku (8,52 %). Naopak při působení teploty

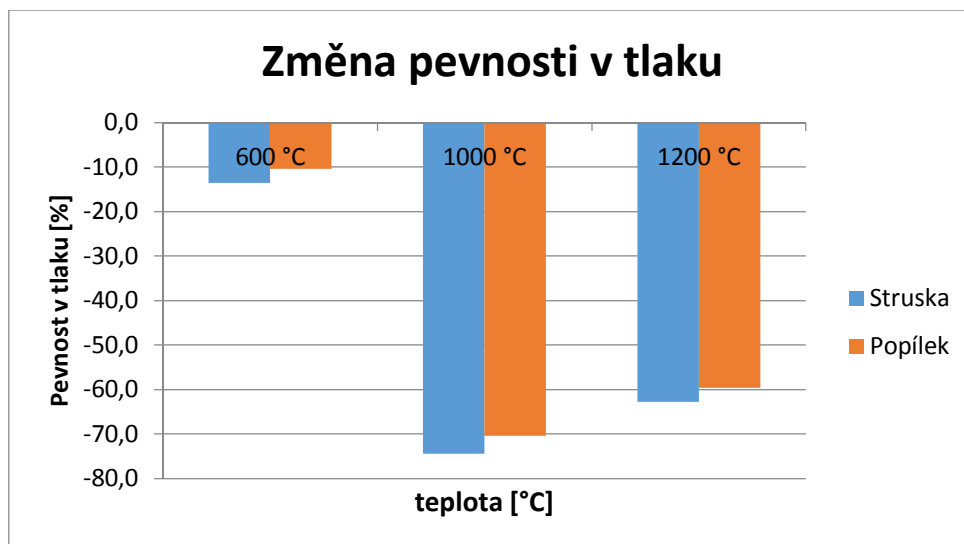
1000 °C a 1200 °C vykazuje směs se struskou větší ztrátu objemové hmotnosti než popílek. K největší změně objemové hmotnosti dochází při teplotě 1200 °C.



Obrázek 71: Změny hmotnosti malt

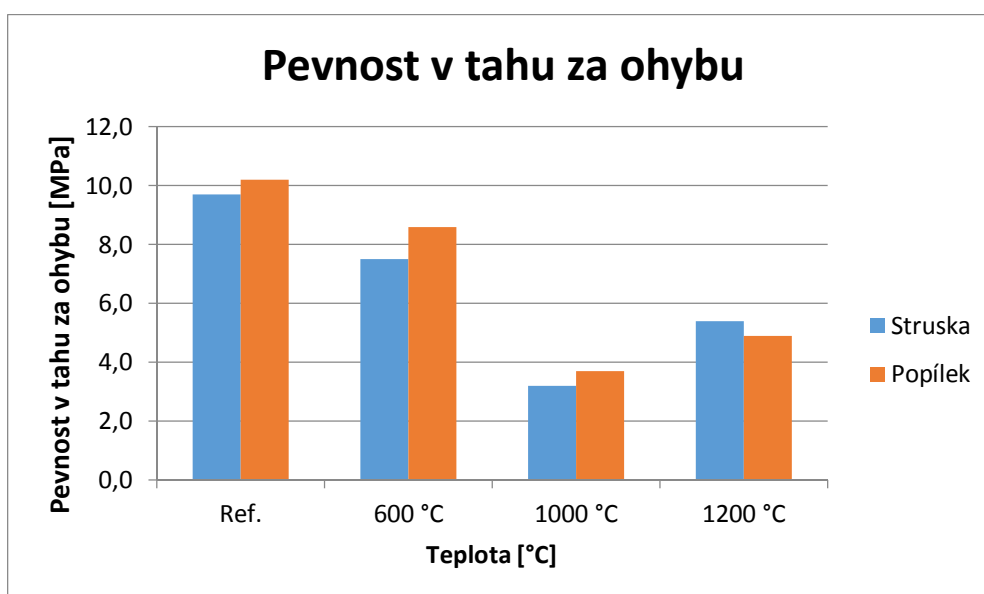


Obrázek 72: Pevnost v tlaku malt

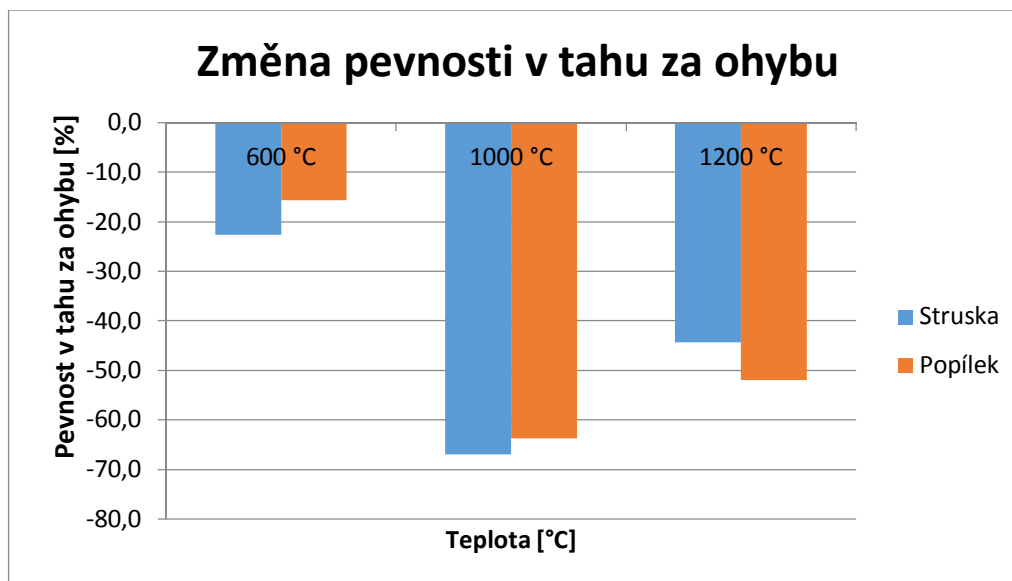


Obrázek 73: Změna pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku dosahuje u referenčního vzorku strusky 43,5 MPa a u popílku 41,3 MPa. V grafech (viz Obr. 72, 73) jsou znázorněny výstupy pevností a průběhy poklesů pevností po teplotním zatížení. Receptury obsahují hutné kamenivo čedič a pórovité kamenivo liapor. Hutné kamenivo má obecně vyšší tepelnou vodivost oproti pórovitému kamenivu a tím mohou při nárůstu teplot nastat rychlé objemové změny ve struktuře malty. Tato skutečnost může být příčinou velkého poklesu pevností při teplotním zatížení na 1000 °C. Ztráta pevností u všech vzorků je také způsobena rozkladem hydratačních produktů. Přes výraznější pokles lze hodnotit dosažené pevnosti kladně, kdy reziduální pevnost v tlaku dosahuje v případě použití popílku cca 30 %. Při teplotě 1200 °C dochází ke snižování ztráty pevností. To může být zapříčiněno částečným natavováním vzorků.



Obrázek 74: Pevnost v tahu za ohybu



Obrázek 75: Změna pevnosti v tahu za ohybu

Pevnosti v tahu za ohybu je zaznamenána v grafu (viz Obr. 74,75) Hodnoty u směsi se struskou dosahovaly 9,7 MPa a směsi s popílkem 10,2 MPa. Při teplotě 1000 °C dosahují malty nejvyšší ztráty pevností v ohybu. U směsi se struskou činí ztráta 67,0 % a u směsi s popílkem 63,0 %. U teploty 1200 °C dochází k natavování vzorků a ztráta pevnosti v tahu za ohybu se snižuje. Ztráta pevnosti u směsi se struskou je 44,3 % a u směsi s popílkem 52,0 %. Pevnost v tahu za ohybu se chová podobně jako pevnost v tlaku tj, při teplotě 1000 °C dochází ke ztrátám pevností a při 1200 °C se pevnosti zvyšují.

4.6 Diskuse výsledků

Jedním z cílů experimentální části bylo ověřit vlastnosti potenciálně vhodných kameniv do tepelně odolných kompozitů na základě souboru několika zkoušek. Testy byly provedeny na vybraných vzorcích bez zatížení a po zatížení vzorků teplotou na 600 °C, 1000 °C a 1200 °C. Ochlazení vzorků probíhalo dvěma způsoby – samovolné chlazení v peci, rychlé ochlazení (pouze u expoziční teploty 1000 °C).

Sítový rozbor měl ukázat, jaký vliv má vysoká teplota na rozpad jednotlivých zrn kameniva a tím i změnu zrnitosti kameniva. V této zkoušce vyšel nejlépe lupek, kterému se zrnitost prakticky nezměnila. Největší rozdíly byly zaznamenány u čediče rychle ochlazeného,

u kterého nastal rozpad zrn. Dobré výsledky vykazoval také agloporit, který je zástupcem alternativní suroviny. Jeho průběh zrnitosti byl stabilní při všech sledovaných teplotách.

Zkouška objemové hmotnosti prokázala stabilitu všech kameniv do teploty 600 °C, kromě škváry. Největší změny u agloporitu a liaporu nastaly při teplotě 1200 °C, kde docházelo k natavování zrn. Změny objemové hmotnosti se projeví na pórovitosti a nasákavosti. Kvůli natavení kameniv se uzavřely jednotlivé póry, čímž se pórovitost a nasákavost výrazně snížily. Kromě lupku se objemová hmotnost téměř nezměnila u čediče a amfibolitu. Vliv vysokých teplot se projevil i u měrné hmotnosti. Všechna kameniva, zkoušená při teplotě 1200 °C, vykazovala vyšší měrnou hmotnost. Měrná hmotnost se při této teplotě snížila pouze u amfibolitu na 2,3 %.

Stanovení pevnosti stlačením ve válci je zkouška, která by měla být ve své podstatě nejvíce vypovídající o stabilitě kameniva při vysokých teplotách. Zkouška je ovlivněna velikostí jednotlivých zrn a jejich vzájemnou mezerovitostí. Pokud bude mezerovitost vysoká, tak se dá předpokládat, že pevnost bude nižší. Bylo zjištěno, že nejvyšších pevností dosahovalo přírodní hutné kamenivo, které neobsahuje velké množství vzduchových pórů. Pórovitá kameniva právě díky vysokému obsahu pórů vykazují nižší pevnosti stlačením ve válci. Nejvyšších pevností dosahovalo kamenivo Žabčice. Jeho vysoké pevnosti napomohla také plynulejší křivka zrnitosti. Nejstabilnějším kamenivem v této zkoušce (stejně jako u ostatních parametrů) je lupek, u kterého se neprojeví prakticky žádné změny. Dalším stabilním kamenivem je liapor, který do teplot 1000 °C nevykazoval velké změny pevností. Při 1200 °C došlo u liaporu k natavování a zvýšení jeho pevnosti. Rychlé ochlazení ve zkoušce stlačením ve válci mělo vliv hlavně na čedič a amfibolit. Tato hutná kameniva při rychlém chlazení začala praskat a ztrácet svoji pevnost. Praskání zrn se projeví u čediče i v souvislosti se zkouškou síťového rozboru.

Fyzikálně mechanické vlastnosti kameniva úzce souvisí s mikrostrukturou, zjištěnou na SEM. XRD umožňuje identifikaci krystalických fází, které při vysokých teplotách probíhají. Probíhající změny lze snadno pozorovat na přírodním kamenivu, kde jich probíhá nejvíce. U amfibolitu například probíhal rozklad amfibolu, živců, hematitu a naopak vznikl pyroxen. U čediče vzrůstalo množství živců, vznikl hematit a došlo k rozkladu biotitu, nefelínu.

Pro ověření odolnosti proti vysokým teplotám byla vybraná kameniva použita pro výrobu polymercementového kompozitu. Byly navrženy dvě receptury, které obsahovaly kombinaci čediče a liaporu. Tyto směsi se lišily pouze v substituční složce portlandského

cementu. V první byla použita vysokopecní struska a ve druhé byl použit vysokopecní popílek. Malty byly podrobeny zjišťování základních fyzikálně – mechanických vlastností po teplotním zatěžování na teploty 600 °C, 1000 °C a 1200 °C.

Objemová hmotnost testovaných malt klesala se zvyšující se teplotou. Největší změnu zaznamenala směs obsahující strusku při teplotě 1200 °C. Se změnou objemové hmotnosti souvisí i změna rozměrů a změna hmotnosti, kdy dochází k termickému rozkladu nebo natavování jednotlivých složek v kompozitu. Nejmenší změnu rozměrů a hmotnosti zaznamenala směs s popínkem. Působení vysokých teplot mělo vliv hlavně na pevnost v tlaku. Při teplotě 1000 °C došlo k největšímu poklesu hodnot. Při teplotě 1200 °C docházelo k natavování vzorku a pevnost v tlaku se mírně zvýšila. Teplota měla menší vliv na směs s popínkem. Podobně se teplota podepsala i na pevnosti v tahu za ohybu. Při teplotě 1000 °C nastal největší pokles pevností. Při teplotě 1200 °C docházelo k natavování a pevnost se mírně zvýšila. Směs s popínkem opět vykazovala lepší hodnoty. Vyrobená malta se struskou měla objemovou hmotnost 1770 kg/m³ a s pevností v tlaku 43,5 MPa. Poklesy pevností při expozici 600 °C o 13,6 % lze hodnotit jako nadprůměrné a u teploty 1000 °C jako velmi dobré (74,5 % pokles pevností). Směs s popínkem s objemovou hmotností 1760 kg/m³ a pevností v tlaku 41,3 MPa měla stejně jako směs se struskou poklesy pevností při expozici 600 °C nadprůměrné poklesy pevností. Také při teplotě 1000 °C lze hodnotit pokles pevností jako velmi dobré (70,5 %).

5 ZÁVĚR

Jedním ze závazných požadavků na stavby a výrobky je požární odolnost a bezpečnost. Požární odolnost staveb má zajistit bezpečnost stavby při požáru a po určitou dobu zachovat únosnost konstrukce potřebnou pro včasnou a bezpečnou evakuaci osob a zvířat.

Cílem diplomové práce bylo studium vlastností plniv do kompozitů s požadavky na vysokou teplotní odolnost. Plnivo tvoří přibližně 60 – 80 % objemu cementového kompozitu, proto je důležité věnovat mu vysokou pozornost.

Z výsledků této práce lze pozorovat vhodnost použití umělého pórovitého kameniva, které bylo již při své výrobě teplotně zatíženo. Další možností je kombinace s přírodním kamenivem, v tomto případě čedičem a amfibolitem. Čedičové kamenivo je velmi kvalitní z hlediska teplotní odolnosti, ale jen do teploty 600 °C, kde je minimální pokles pevnosti výsledného cementového kompozitu a tedy i všech ostatních parametrů. Pro využití nad teploty 600 °C se jeví jako jednoznačně vhodné pouze pórovité kamenivo, jehož odolnost je limitována teplotou cca 1300 °C, kdy se projevují první změny tvaru zrna.

Podstatný vliv na využití plniv má cena a ochrana životního prostředí. Možností je využít i alternativní suroviny, které jsou jinak odpadem. Škvára, která vzniká ze spalování komunálního odpadu, se ukázala jako nejméně odolná a to jen do teploty 600 °C. Agloporit má mnohem stálejší parametry než škvára a bylo by ho vhodné dále zkoumat a využívat pro výrobu teplotně odolných kompozitů. Užitím alternativních surovin lze snížit koncovou cenu dané hmoty a vyvinout malty šetrné k životnímu prostředí spotřebou vedlejších energetických produktů.

V provedeném výzkumu této diplomové práce se ukázalo, že použitím popílku (Ledvice) bylo dosaženo lepší odolnosti proti vysokým teplotám, než při použití vysokopecní strusky (Štramberk).

Nejodolnějším kamenivem se prokázal lupek, který ale není kvůli vysoké ceně použitelný pro běžné použití. Nejhorší vlastnosti vykazovala škvára, která odolala teplotnímu zatížení nejméně.

V navazujícím výzkumu by bylo vhodné využít žárovou mikroskopii a také jiné mikroskopické metody pro zkoumání povrchu kameniva. A dále se zabývat tepelnou vodivostí kameniva, díky které se může ovlivnit čas a riziko kolapsu konstrukce při požáru.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bradáčová, I., Štefan R. a Vašková J., *Stavby z hlediska požární bezpečnosti*. 1. vyd. Brno: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007, vi, 156 s. Technická knihovna. ISBN 978-80-7366-090-1.
- [2] Procházka, J., Štefan R., a Vašková J., *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010, 189 s. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [3] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.com>
- [4] interní materiály pískovny Žabčice – protokoly zkoušek kameniva
- [5] Ščučka, J., Martinec, P., *Fyzikální vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice, Analytický materiál zpracovaný pro potřeby řešení projektu: GAČR P104/12/1988 Studium interakce složek cementových kompozitů při působení vysokých teplot*.
- [6] Gregorová, M., *PVE Dlouhé Stráně – oprava AB pláště horní nádrže petrograficko - mineralogicko - geochemické posouzení*, 2004, MS nepublikovaná zpráva, MU Brno.
- [7] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz>
- [8] *Geologická encyklopedie* [online]. 2007 [cit. 2015-08-15]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?amfibolit>
- [9] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: [9] http://www.motvoz.cz/produkt-63/fibrils-ffr-nevznetliva-fibrilovana-vlaknahttp://typdok.tudc.cz/Files/TKP/TKP3_23_5.pdf
- [10] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: [online]. <http://www.fhg.cz/vzdelani/kamenivo.pdf> [cit. 2016-01-11].
- [11] Pan, Z.; Sanjayan, J., G.; Kong, D., L., Y. *Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures*, [online], [Construction and Building Materials 36, 2012, 365-372]. Concrete Society: Polymers in concrete, The Constructoin Press, 1975.
- [12] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: http://www.betonconsult.cz/kurzy/data/sanace/technicke_podminky_ Vrátný, O., Procházka, J., *Poškození betonových prvků vystavených požáru a jeho příčiny*, sborník konference 19. Betonářské dny 2012, ČBS Servis s.r.o., Hradec Králové, 2012, p. 524-527, ISBN 978-80-87158-32-6
- [13] Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk, L.D., *Compressive Strength – Color Change Relation in Mortars at High Temperature*, Cement and Concrete Research, V. 34, No. 10, Oct. 2004, p. 1803-1807.

- [14] Sičáková, A. a kolektiv, New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications, 1. vydání Košice, červen 2008, 156 s, ISBN 978-80-553-0040-5.
- [15] FIB - Federation internationale du béton, Fire design of concrete structure - materials, structures and modelling, 2007, Lausanne, Switzerland: Case Postale, 2007, 106 s, ISBN 978-2-88394-078-9.
- [16] Khoury, G.A., Design of concrete for better performance in fire, IMechE 1992, C438/042, p. 121-127.
- [17] Hager, I., Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties, PhD thesis (in french), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, november 2004, 182 p.
- [18] Collepari, M., Moderní beton, Betonové stavitelství, Praha, 2009, p. 0-342, ISBN 978-80-87093-75-7.
- [19] Válek, J., *Výzkum a vývoj kompozitních materiálů s vyšší rezistencí vůči působení vyšších teplot*. Brno, 2014. Doktorská disertační práce. VUT Brno.
- [20] Marcinčin, A., I. Hudec a J. Majling. Technológia materiálov: Materiály z plastov a elastomérov, vláknité materiály a keramické materiály. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002. ISBN 80 – 227 – 1798 - 3.
- [21] ČSN EN ISO 1927 -1. Žárovzdorné výrobky netvarové (monolitické) - Část 1: Úvodní ustanovení a klasifikace. Plzeň: Technický a zkušební ústav stavební, 2013.
- [22] Hlaváč, J., Základy technologie silikátů. 2. vyd. Praha : SNTL, 1988. 520 s
- [23] Sakulin, V., V. Migal', A. Margishvili a V. Skurikhin. High-Temperature and Refractory Heat-Insulating Materials Developed at the Borovichi Refractory Kombinat Joint-Stock Co. Refractories and Industrial Ceramics. 2004, roč. 45, č. 4, s. 282-288. Dostupné <http://link.springer.com/article/10.1023/B%3AREFR.0000046514.71861.df>
- [24] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://www.minerale.net/vznik.php>
- [25] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-1136-8.pdf>
- [26] [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: www.betontks.cz, [online]. [cit. 2016-01-11]
- [27] Procházka, J., a R., Štefan. Komplexní požární ochrana a bezpečnost s využitím betonu [online]. Praha, červen 2009 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/downloads/Komplexni-pozarniochrana.Pdf>
- [28] Hela, R., Bodnářová, L., Křížová, K., Válek, J., Vytvoření postupů a receptur pro použití betonu s vyšší trvanlivostí vůči působení vysokých teplot v konstrukcích, Dílčí

výzkumná zpráva za rok 2010, CIDEAS – Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, listopad 2010

- [29] Kupilík, V., Hodnocení objektů zasažených požárem a výbuchem. Praha: STAV-INFORM, vydavatelství Ústavu stavebních informací Praha, 1994
- [30] Hela, R., L., Bodnárová a I., Hager. New generation cement concretes. Košice, červen 2009. ISBN 978-80-214-388-3.
- [31] Hutné lehké betony z Liaporu. LiaporBeton [online]. [cit. 2015-11-04]. Dostupné z: http://www.liaporbeton.cz/hutne_betony.html
- [32] Drochytka, R., a P., Matulová. *Lehké stavební látky: Modul M01*. 2006.
- [33] ČSN EN 1504-3. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce. Český normalizační institut, 2006
- [34] Jong-Pil W., Hee-Byoung K., Su-Jin L., Joo-Won K., Eco-friendly fireproof highstrength polymer cementitious composites, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek
- [35] Peng G., Bian S., Guo Z., Zhao J., Peng X., Jiang Y., Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures. Construction and Building Materials 2008; 22: 948–55.
- [36] Serdar A., Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek
- [37] Rashad A. M., Sayieda R. Z., A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek
- [38] Feldman, R.F., Sereda, P.J., *A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties*, Materials and Structures, 1968, p. 509-519.

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Konstrukce modelu CSH fáze [38]	11
Obrázek 2: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku způsobené zvýšením teploty [19]	14
Obrázek 3: Stabilita a procesy probíhající v průběhu zahřívání kameniva [15]	15

Obrázek 4: Teplotní přetvoření vybraných kameniv [16]	15
Obrázek 5: Termická analýza kameniv získaný při nárůstu teploty 0 °C/min v atmosféře dusíku [16]	16
Obrázek 6: Struktura betonu zahřátého na 600 °C, beton složený z křemičito – vápenatého kameniva [17]	17
Obrázek 7: Schéma postupu zkoušení kameniv	27
Obrázek 8: Laboratorní pec pro teplotní zatížení vzorků	28
Obrázek 9: Teplotní zatěžování vzorku s volným ochlazováním a rychlým ochlazením	28
Obrázek 10: Příprava vzorku rychle ochlazeného	28
Obrázek 11: Provedení zkoušky pevnosti kameniva stlačením ve válci	29
Obrázek 12: Přístroj pro XRD difrakční analýzu	33
Obrázek 13: Rastrovací elektronový mikroskop	33
Obrázek 14: Schéma postupu zkoušení malt	34
Obrázek 15: pevnost v tlaku za ohybu na zkušební vzorku	36
Obrázek 16: Polypropylenová vlákna [9]	44
Obrázek 17: Vzorky živcového písku – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.	49
Obrázek 18: Porovnání referenčního (22 °C) vzorku živcového písku a zatíženého vzorku na 1000 °C a na 1000 °C rychle ochlazeného.	49
Obrázek 19: Vzorky čediče – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.	49
Obrázek 20: Porovnání referenčního (22 °C) vzorku čediče a zatíženého vzorku na 1000 °C a na 1000 °C rychle ochlazeného.	49
Obrázek 21: Vzorky amfibolit – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.	50
Obrázek 22: Porovnání referenčního (22 °C) vzorku amfibolitu a zatíženého vzorku na 1000 °C.	50
Obrázek 23: Vzorky popílkový agloporit – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.	50
Obrázek 24: Vzorek nataveného popílkového agloporitu při teplotě 1200 °C	50
Obrázek 25: Vzorky Lupek – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.	51
Obrázek 26: Vzorky Škvára – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C	51
Obrázek 27: Vzorky Liapor – Referenční (22 °C), 600 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1000 °C rychlé ochlazení.	51
Obrázek 28: Síťový rozbor – Čedič (expozice 22 až 1200 °C)	52
Obrázek 29: Síťový rozbor – Popílkový agloporit (expozice 22 až 1000 °C)	53
Obrázek 30: Síťový rozbor – Amfibolit (expozice 22 až 1200 °C)	53
Obrázek 31: Síťový rozbor – Liapor (expozice 22 až 1200 °C)	54
Obrázek 32: Síťový rozbor – Živcový písek (expozice 22 až 1000 °C)	54
Obrázek 33: Síťový rozbor – Lupek (expozice 22 až 1200 °C)	55
Obrázek 34: Síťový rozbor – Škvára (expozice 22 až 600 °C)	55
Obrázek 35: Objemová hmotnost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)	60
Obrázek 36: Změna objemové hmotnosti kameniva po teplotní expozici	60
Obrázek 37: Měrná hmotnost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)	61
Obrázek 38: Změny měrných hmotností kameniva po teplotní expozici	62
Obrázek 39: Nasákavost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)	62
Obrázek 40: Rozdíl nasákavosti kameniva po teplotní expozici	63
Obrázek 41: Pórovitost kameniva (expozice 22 až 1200 °C)	64
Obrázek 42: Rozdíl pórovitosti po výpalu	64
Obrázek 43: Pevnost testovaného kameniva stlačením ve válci (expozice 22 až 1200 °C)	68
Obrázek 44: Rozdíl pevností testovaného kameniva stlačeného ve válci	68
Obrázek 45: Synná hmotnost testovaných kameniv (expozice 22 až 1200 °C)	70

Obrázek 46: Rozdíl sypaných hmotností testovaných kameniv po výpalu.....	70
Obrázek 47: Rozdíl hmotností testovaných kameniv po výpalu	71
Obrázek 48: Mezerovitost kameniva (expozice 22 až 1200 °C).....	72
Obrázek 49: Změna mezerovitosti testovaných kameniv po výpalu.....	72
Obrázek 50: Amfibolit zatížený na 22 °C, 1200 °C.....	76
Obrázek 51: Amfibolit – dehydroxylace (rozklad) amfibolu	77
Obrázek 52: Amfibolit – rozklad živce, hematitu a vznik pyroxenu	77
Obrázek 53: Amfibolit – rozpad chloritu, biotitu, amfibolu.....	77
Obrázek 54: Čedič zatížený na 22 °C, 1200 °C.....	79
Obrázek 55: Porovnání čediče – referenční, 600 °C, 1000 °C, 1200 °C.....	80
Obrázek 56: Čedič – úbytek pyroxenu.....	80
Obrázek 57: Čedič – úbytek nefelínu, olivínu, vzrůst množství živců.....	81
Obrázek 58: Čedič – rozklad chloridu, biotitu, amfibolu.....	81
Obrázek 59: Čedič – úbytek nefelínu, vznik hematitu	81
Obrázek 60: Čedič – porovnání postupného chlazení a vzorků s rychlým ochlazením.....	82
Obrázek 61: Živcový písek - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C.....	82
Obrázek 62: Liapor - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C	83
Obrázek 63: Lupek - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C.....	83
Obrázek 64: Agloporit - 800 °C, 1000 °C a 1200 °C.....	84
Obrázek 65: Záznam vzorku škvára zatíženého teplotou 600 °C.....	85
Obrázek 66: Znázornění trhlin na vzorku ze směsi se struskou – 1200°C.....	90
Obrázek 67: Znázornění trhlin na vzorku ze směsi s popílčkem – 1200°C	90
Obrázek 68: Změny rozměrů receptur	91
Obrázek 69: Objemová hmotnost	92
Obrázek 70: Změna objemové hmotnosti	92
Obrázek 71: Změny hmotnosti malt	93
Obrázek 72: Pevnost v tlaku malt	93
Obrázek 73: Změna pevnosti v tlaku	94
Obrázek 74: Pevnost v tahu za ohybu	94
Obrázek 75: Změna pevnosti v tahu za ohybu	95

8 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Shrnutí vlastností nechráněných konstrukčních materiálů vystavených požáru [26].....	6
Tabulka 2: Požadavky na požární bezpečnost ve vztahu k betonu podle Eurokódu 2 [26]	6
Tabulka 3: Požadované základní parametry správkových hmot dle ČSN EN 1504 – 3 [33].....	8
Tabulka 4: Rozdělení betonů do skupin dle požární odolnosti [27]	10
Tabulka 5: Chování betonu při zatěžování teplotou [2].....	11

Tabulka 6: Barevná změna kameniva při působení vysokých teplot [13].....	13
Tabulka 7: Koeficient lineární teplotní roztažnosti pro různé typy hornin [14]	14
Tabulka 8: Rozdělení netvarových žárovzdorných výrobků podle chemického složení [21]	20
Tabulka 9: Přehled běžných druhů žárovzdorných hmot, jejich složení a teplota použití [25]	22
Tabulka 10: Chemické složení cementu [3]	37
Tabulka 11: Vlastnosti cementu [3]	37
Tabulka 12: Vlastnosti živcového písku [4]	38
Tabulka 13: Vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice[5][6]	38
Tabulka 14: Petrografické složení čedičového kameniva z lokality Bílčice[5][6]	39
Tabulka 15: Silikátová analýza z lomu Bílčice[6]	39
Tabulka 16: Vlastnosti lehkého kameniva Liapor [7]	40
Tabulka 17: Chemické složení kameniva Liapor[7]	40
Tabulka 18: Mineralogické složení popílkového agloporitu	41
Tabulka 19: Chemické složení škváry	41
Tabulka 20: Chemické složení lupku	42
Tabulka 21: Chemické složení popílku	42
Tabulka 22: mineralogické složení popílku	43
Tabulka 23: Vlastnosti vláken	44
Tabulka 24: Teplotní zatížení kameniva v pozorovací peci - Čedič, liapor, agloporit.	45
Tabulka 25: Zatížení kameniva vysokou teplotou v pozorovací peci. Amfibolit, kamenivo Žabčice, lupek	46
Tabulka 26: Výsledky makroskopického pozorování	47
Tabulka 27: Výsledky objemové hmotnosti, nasákavosti kameniv	57
Tabulka 28: Výsledky měrné hmotnosti, pórovitosti kameniv	58
Tabulka 29: Výsledky pevností kameniva stlačením ve válci	65
Tabulka 30: Výsledky mezerovitosti, sypané hmotnosti kameniv	66
Tabulka 31: Vybrané snímky pořízené pomocí SEM – Kameniva exponovaná při 1200 °C	73
Tabulka 32: Vybrané snímky pořízené pomocí SEM – Kameniva exponovaná při 1200 °C	74
Tabulka 33: Složení směsi	86
Tabulka 34: Zatížení vzorků vysokou teplotou v pozorovací peci – směs se struskou	87
Tabulka 35: Zatížení vzorků vysokou teplotou v pozorovací peci – směs s popílkem	88
Tabulka 36: Zhodnocení vzorku malt	89
Tabulka 37: Výsledky testování fyzikálně – mechanických parametrů	91