

OBSAH

1 ÚVOD.....	8
2 CÍLE.....	9
A) TEORETICKÁ ČÁST	
3 HISTORIE VYUŽÍVÁNÍ SANAČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ČR A ZAHRANIČÍ.....	9
4 POŽÁRNÍ ODOLNOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ.....	10
4.1 EUKOD 2.....	12
4.2 POŽÁRNĚ ODOLNÉ SANACE.....	14
5 VYBRANÉ PRODUKTY DOSTUPNÉ NA ČESKÉM TRHU	15
5.1 MC Nafufill KM 250	15
5.2 StoCrete TS100.....	16
5.3 EMACO S88.....	17
6 VYBRANÉ PRODUKTY DOSTUPNÉ NA ZAHRANIČNÍM TRHU.....	19
6.1 Sicacrete F (FireProectionMortar)	19
6.2 SpecSealFirestopMortar	20
6.3 Pyroplex	21
6.4 DAP FireResistantMortar.....	21
7 DĚJE PROBÍHAJÍCÍ V ŽELEZOBETONU VYSTAVENÉHO ÚČINKŮM POŽÁRU.....	22
8 POŽADAVKY NA SPRÁVKOVÉ HMOTY.....	24
8.1 VÝSLEDNÉ PARAMETRY SPRÁVKOVÉ HMOTY V NÁVAZNOSTI NA ÚČEL FUNKCE KONSTRUKCE	27
9 ZAHRANIČNÍ VÝZKUM V OBLASTI POŽÁRNĚ ODOLNÝCH HMOT.....	24
9.1 VÝVOJ POŽÁRNĚ ODOLNÉ MALTY S POUŽITÍM STRUSKY A PEMZY	29
9.2 VLIV PEMZY A POPÍLKU NA ODOLNOST MALTY VŮČI VYSOKÝM TEPLOTÁM.....	36

9.3 VÝZKUM V OBLASTI STŘÍKANÝCH POLYMERCEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ ZA POUŽITÍ PP VLÁKEN.....	39
9.4 POLYMER – CEMENTOVÉ KOMPOZITY S POUŽITÍM LEHKÉHO KAMENIVA A POLYPROPYLENOVÝMI VLÁKNY	41
9.5 SMĚS PODÍLŮ EKOLOGICKY ŠETRNÝCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU POŽÁRNĚ ODOLNÉHO BETONU.....	42
9.6 ŽÁRUVZDORNÝ BETON (BEZPEČNOST PŘI UŽÍVÁNÍ TUNELŮ).....	43
9.7 VÝZKUM V OBLASTI POŽÁRNĚ ODOLNÝCH GEOPOLYMERNÍCH KOMPOZITŮ.....	44
B) EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	
10 METODIKA PRÁCE	46
11 SUROVINY	49
11.1 POLYMERNÍ MODIFIKÁTORY	49
11.2 POLYOLEFINOVÁ VLÁKNA	49
11.3 KAMENIVO.....	50
11.4 CEMENT.....	52
11.5 VODA	53
11.6 PŘÍMĚSI	53
12 MALTY.....	54
12.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	54
13 ZATÍŽENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES VYSOKOU TEPLOTOU.....	58
14 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY A POSTUPY	59
14.1 STANOVENÍ ZRNITOSTI KAMENIVA-SÍTOVÝ ROZBOR (ČSN EN 933-1)..	59
14.2 STANOVENÍ SYPNÉ HMOTNOSTI A MEZEROVITOSTI VOLNĚ SYPANÉHO KAMENIVA (ČSN EN 1097-3)	60
14.3 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ČERSTVÉ MALTY (ČSN EN 1015-6)	61
14.4 STANOVENÍ DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI-ULTRAZVUKOVÁ IMPULZNÍ METODA ZKOUŠENÍ BETONU (ČSN 73 1371).....	62

14.5 PEVNOST V TAHU OHYBEM-ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU-ČÁST 5 PEVNOST V TAHU OHYBEM ZKUŠEBNÍCH TĚLES (ČSN EN 12390-5).....	63
14.6 STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU (ČSN EN 12 190).....	65
14.7 STANOVENÍ SOUDRŽNOSTI ODTRHOVOU ZKOUŠKOU (ČSN EN 1542)...	67
15 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PROVEDENÝCH ZKOUŠEK NAVRŽENÝCH RECEPTUR	68
15.1 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ DÁVKY POLYMERNÍ PŘÍSADY	68
15.2 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ DÁVKY VLÁKEN.....	72
15.3 VLIV POUŽITÉHO KAMENIVA NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI MALT.....	75
15.4 STANOVENÍ VHODNÉ DÁVKY POJIVA	80
15.5 SANAČNÍ MALTY S VYŠŠÍ ODOLNOSTÍ VŮČI EXTRÉMNÍM TEPLITÁM	84
16 VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES V PRŮBĚHU ZKOUŠEK	91
17 DISKUSE VÝSLEDKŮ	94
ZÁVĚR	97
POUŽITÉ ZDROJE	100
SEZNAM TABULEK.....	102
SEZNAM GRAFŮ.....	103
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	104
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	105
SEZNAM PŘÍLOH	106

A) TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

Sanace betonu a železobetonu je vzhledem k četnosti konstrukcí z tohoto materiálu stále se rozvíjející část stavebního průmyslu. Hlavní úlohou sanace je oprava a ochrana staveb, které již vyčerpaly svoji dobu životnosti, či došlo k nenadálé situaci, jež má za následek snížení únosnosti.

Během užívání stavby může nastat situace, kdy vznikne požár. Rizikem vzniku požáru mohou být unikající pohonné hmoty, výbuch plynového potrubí, nesprávná manipulace či špatné provedení elektroinstalace a spousta dalších příčin. Vysoké teploty a unikající spaliny mohou ohrozit především lidské životy. Sanačním zákrokem žáruvzdornou maltou či vhodnou volbou složení betonu lze do jisté míry zpomalit šíření požáru či prodloužit dobu únosnosti konstrukce. Prodloužením doby únosnosti takové konstrukce se může realizovat nutná evakuace osob, zvířat a nebezpečného materiálu, u kterého by mohlo dojít např. k explozi. Mezi taková stavební díla, která by měla být protipožárně ošetřena, patří např. tunely, výškové budovy, mosty, sklady nebezpečných látek aj. Pro ošetření takto poškozených konstrukcí je možné využít správkových malt s odolností vůči vysokým teplotám, aby odolnost stávající konstrukce zůstala zachována. Tuzemských výrobců těchto hmot není mnoho. Průzkumem trhu bylo zjištěno, že v ČR takovouto hmotou disponuje spol. MC Bauchemie, která uvádí tento výrobek pod obchodním názvem Nafufill KM 250. Trh v ČR nabízí prostor pro zařazení nových výrobků v kategorii sanačních malt odolných vůči vysokým teplotám.

Je třeba stále hledat nové směry především s využitím nejrozumnějších alternativních surovin, zejména ložisek kameniva, která poskytují dostatečnou surovinovou základnu při zachování ekonomické refundace nákladů s minimálním dopadem na životní prostředí a zároveň zachování fyzikálně mechanických vlastností. Oblast požárně správkových malt skýtá velký prostor pro výzkum a vývoj nových hmot se zaměřením na využití alternativních surovin, jako jsou, kameniva vyráběná za použití nevyhořelých zbytků paliva, jako je např. popílkový agloporit a příměsí upravujících výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti. Vhodnou modifikací vstupních surovin lze docílit stabilitu a požární odolnost po dobu požáru, která je nutná k evakuaci osob a zajištění jejich bezpečnost.

2 CÍLE

Cílem diplomové práce je výzkum sanační malty s odolností vůči extrémně vysokým teplotám, jež jsou charakteristické při vzniku požáru. Z hlediska naplnění cílů je diplomová práce rozdělena do několika dílčích celků.

V první řadě je záměrem práce získání základních poznatků v oblasti požární odolnosti, dějů v železobetonu při vzniku požáru, dostupných produktů na tuzemském i zahraničním trhu. Pozornost bude také třeba zaměřit na výzkum v oblasti vývoje malt s požární odolností formou rešerší zahraničních článků i jiných informačních zdrojů, zabývajících se danou tematikou. Naplnění teoretických poznatků bude uzavřeno fakty týkajícími se požadavků na správkové hmoty.

Druhým dílčím cílem je laboratorní ověření navržených malt s optimalizací složení receptur, výběrem vhodného kameniva, cementu, polymerních vláken, příměsí a stanovením vhodného vodního součinitele pro požadovanou zpracovatelnost a modifikaci konečných fyzikálně mechanických vlastností při běžné laboratorní teplotě a poté i po zatížení vysokými teplotami.

Práce si také klade za cíl všechny dosažené poznatky jak z teoretické části, tak z provedených experimentů vyhodnotit z hlediska dopadu pro praxi a případný následný výzkum, který by např. dále modifikoval a optimalizoval v této práci zkoumané a vyvinuté požárně odolné sanační hmoty. Důležité je též porovnání s normovými požadavky na sanační malty. Posledním cílem praktické části je provést výběr optimální receptury a stanovit základní fyzikálně mechanické vlastnosti jako je objemová hmotnost čerstvé malty i ztvrdlé malty, dále pevnosti v tahu za ohybu popř. modulů pružnosti a objemové změny. Závěrem práce je vyhodnocení výstupů z provedených zkoušek a porovnání výsledků.

3 HISTORIE VYUŽÍVÁNÍ SANAČNÍCH TECHNOLOGIÍ V ČR A ZAHRANIČÍ

Sanace betonových a železobetonových konstrukcí je v ČR relativně mladým odvětvím. Rozvoj tohoto odvětví začal v 90. letech 20. století. Prakticky celá 90. léta minulého století byly sanace prováděny bez dostatečných normativních podkladů, a proto vznikly různé normy podnikové resp. oborové, které tuto problematiku řešily.

Mezi nejznámější patří zejména PN 009 (do roku 2004 PN 9906) ČEZ, a.s. Technické podmínky pro přípravu a kontroly oprav železobetonových konstrukcí ve výrobnách ČEZ, a.s., - chladicí věže a komíny, jejíž první znění bylo připraveno v roce 1996.

Dále se jedná o „Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací“, kapitola 31 Opravy betonových konstrukcí. V roce 2012 byla vydána ucelená publikace v oboru sanací betonu a železobetonu, a to „Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TPSSBK III“, navazující a inovující již předcházející TP SSBK II. Za zmínku stojí také uvést publikace autorů Bilčík J. a Dohnálek J. Sanace betonových konstrukcí Emmons P. H., Drochytka R. a Jeřábek Z. Sanace a údržba betonu v ilustracích.[1]

V evropském nebo celosvětovém měřítku lze zachytit nástup sanační technologie v odborné literatuře v sedmdesátých letech minulého století. Příčina, proč se obor sanací konstituoval více než sto let po aktivním inženýrském využívání betonu a železobetonu, je dobře pochopitelná z historických souvislostí. Cementy v druhé polovině devatenáctého století a první polovině století dvacátého byly velmi hrubě mleté, a i když byly standardně hodnoceny v 28denním stáří tak, jak je tomu i v současnosti, docházelo v čase k nárůstu vaznosti a následně pevnosti betonu v řádu desítek až stovek procent. Beton z hlediska trvanlivosti byl tedy materiálem, jehož pevnost v čase nejen že neklesala, ale naopak významně stoupala. Teprve pokrok ve výpočetních metodách, obecné zaujetí tenkostěnnými konstrukcemi, např. skořepinami, na přelomu první a druhé poloviny dvacátého století vedlo k navození situace, kdy s ohledem na karbonataci betonu a současně nedostatečnou tloušťku krycí vrstvy betonu nad výztuží docházelo k rozběhu elektrochemické koroze výztuže již po deseti i patnácti letech.[16]

4 POŽÁRNÍ ODOLNOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Požární odolnost stavebních konstrukcí je určena dobou, po kterou je stavební konstrukce nebo požární uzávěr, schopna odolávat účinkům požáru, aniž by došlo k porušení jejich funkce, specifikované mezními stavy požární odolnosti. Určuje se podle stupně požární bezpečnosti požárního úseku, udává se v minutách a zároveň je určen i druh konstrukce (DP1, DP2, DP3) podle použitých hmot (A1, A2, B, C, D, E, F – dle ČSN EN 13 501-1). Požární odolnost stavební konstrukce musí být zachována po celou dobu životnosti stavby.[16]

Tabulka 1 – *Shrnutí vlastností nechráněných konstrukčních materiálů vystavených požáru*[17]

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	Nulové	Velmi vysoká	Nízká	Nízká	Nízká
Beton	Vysoká	Nulová	Nulové	Nízká	Vysoká	Vysoká	Vysoká

Tabulka 2 – *Požadavky na požární bezpečnost ve vztahu k betonu* [17]

Cíl	Požadavek	Použití betonu
1. Omezení rozvoje požáru	Stěny, podlahy a stropy by měly být provedeny z nehořlavého materiálu.	Beton je materiál inertní a nehořlavý (třída reakce na oheň A1).
2. 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 většinu své pevnosti.
3. Omezení rozvoje a šíření požáru a kouře	Požárně dělicí stěny a stropy by měly být nehořlavé a měly by mít vysokou požární odolnost.	Kromě výše uvedeného sníží vhodně navržené betonové spoje možnost porušení požárem a tak plně využívají konstrukční kontinuitu betonu.
4. 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.
5. Uspádnění zásahu požárních jednotek	Nosné prvky by měly mít vysokou požární odolnost 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.



Obrázek 1- Příklad betonových prvků po požáru. Odštěpení betonu je jasně patrné [17]

4.1 EUROKÓD 2

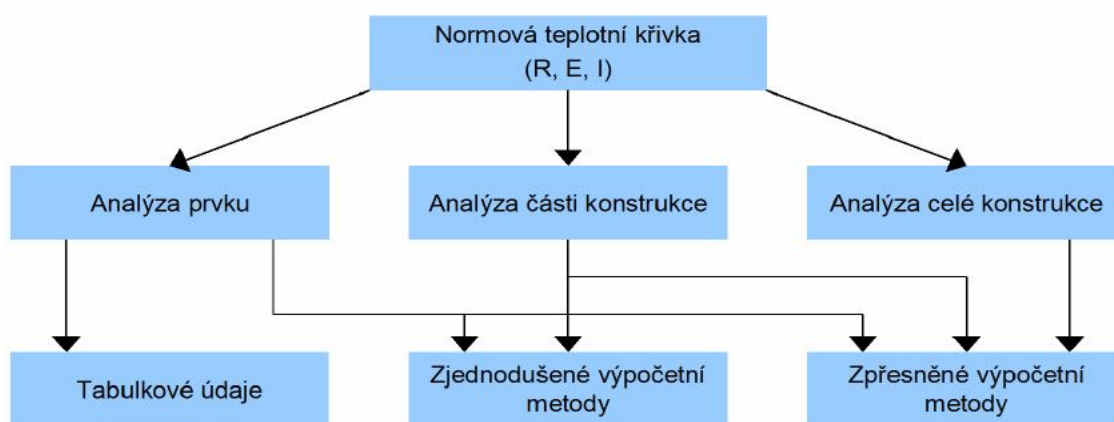
Konstrukce navržené podle Eurokódu 2 musí splňovat následující kritéria požární ochrany: Únosnost (R), Celistvost (E) a Izolační schopnost (I). Tato kritéria jsou vysvětlena v tab. 3. Písemné značky R, E a I se používají společně s číslem vyjadřujícím normovou požární odolnost (vztaženou k normovému požáru ISO 834) v minutách. [17]

Tabulka 3 – Tři hlavní kritéria požární ochrany podle Eurokódu 2, části 1-2.[17]

Označení	Mezní stav při požáru	Kritérium
Résistance (R) <i>Anglicky:</i> Fire resistance, Load-bearing capacity	Mez únosnosti Konstrukce by si měla zachovat únosnost.	Únosnost konstrukce musí být zaručena po předepsanou dobu požáru. <i>Doba, po kterou je zachována nosná funkce prvku při požáru, definovaná jeho mechanickou únosností.</i>
Etanchéité (E) <i>Anglicky:</i> Frame arresting, Separation, Tightness	Mez celistvosti Konstrukce by měla ochránit lidi a zboží před plameny, škodlivým kouřem a žhavými plyny.	Dostatečná celistvost předchází proniknutí plamenů a žhavých plynů na odvrácenou stranu. <i>Doba, po kterou je kromě únosnosti zachována požárně dělící funkce prvku, definovaná těsností jeho spojů pro plameny a plyny.</i>
Isolation (I) <i>Anglicky:</i> Fire shielding, Heat screening, Separation	Mez izolace Konstrukce by měla ochránit lidi a zboží před žářem.	Dostatečná izolace vede k omezení nárůstu teploty na odvrácené straně. <i>Doba, po kterou je kromě únosnosti a celistvosti zachována požárně izolační schopnost prvku, definovaná dodržáním přípustného nárůstu teploty na straně nevystavené požáru.</i>
Výše uvedené mezní stavy se vyjadřují v minutách – v následujících intervalech: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360.		

Norma je zaměřena na mimořádnou situaci vystavení požáru, aspekty pasivní požární ochrany a všeobecnou požární bezpečnost. Eurokód 2 umožňuje inženýrům navrhovat konstrukce a posuzovat jejich požární odolnost pomocí jedné ze tří metod:

1. Určení minimálních hodnot rozměrů průřezu a osově vzdálenosti výztuže od líce betonu podle tabulek.
2. Návrh průřezu prvku pomocí zjednodušených metod pro určení redukovaného průřezu jako funkce normové teplotní křivky (ISO 834).
3. Návrh pomocí zpřesněných výpočetních metod jako funkce teplotního zatížení a chování prvku vystaveného požáru.



Obrázek 2 – Postup návrhu požární odolnosti konstrukcí [17]

Členské státy EU mohou pro doplnění všeobecných částí vztahujících se k požárnímu návrhu stanovit hodnoty některých důležitých parametrů či alternativní postupy ve svých národních přílohách (NP). Důležité je, aby projektanti tyto národní přílohy zohledňovali a použili tak správný přístup pro zemi, ve které pracují či pro niž právě navrhují. [17]



Obrázek 4- Požár v budově Windsor Tower, Madrid [17]



Obrázek 3 – Budova byla požárem zcela zničena, IECA, Španělsko[17]

Ve srovnání s jinými stavebními materiály je odolný, ale i přesto je třeba u některých specifických objektů zvyšovat požární odolnost. U ostatních stavebních materiálů se požární odolnost zvyšuje za pomoci nátěrů, impregnací, oddělováním konstrukcí aj. Betonové stropy a stěny omezují rozsah požáru jak ve vodorovném směru (pomocí stěn), tak ve svislém směru (pomocí stropů). Beton tedy umožňuje vytvářet bezpečné dělicí konstrukce jednoduše a ekonomicky. [17]

4.2 POŽÁRNĚ ODOLNÉ SANACE

Všeobecně pro cementové malty modifikované polymery (PCC) byla již v minulosti prokázána odolnost proti požáru, podle standardní teplotní křivky pro pozemní stavby, jakož i pro křivky požáru v tunelech podle německé směrnice ZTV-ING a směrnic německého Železničního spolkového úřadu (EBA).[18]

Stavební výrobky, v tomto případě správkové malty s odolností vůči vysokým teplotám musí splňovat požadavky dle normy ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Požárně odolné sanace spadají do třídy reakce na oheň A1. Výrobky třídy A1 nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stádiu. Základní třídy hořlavosti jsou zatříděny do pěti stupňů.[14]

Stupeň A – nehořlavé stavební hmoty

Stupeň B – nesnadno hořlavé stavební hmoty

Stupeň C1 – těžce hořlavé stavební hmoty

Stupeň C2 – středně hořlavé stavební hmoty

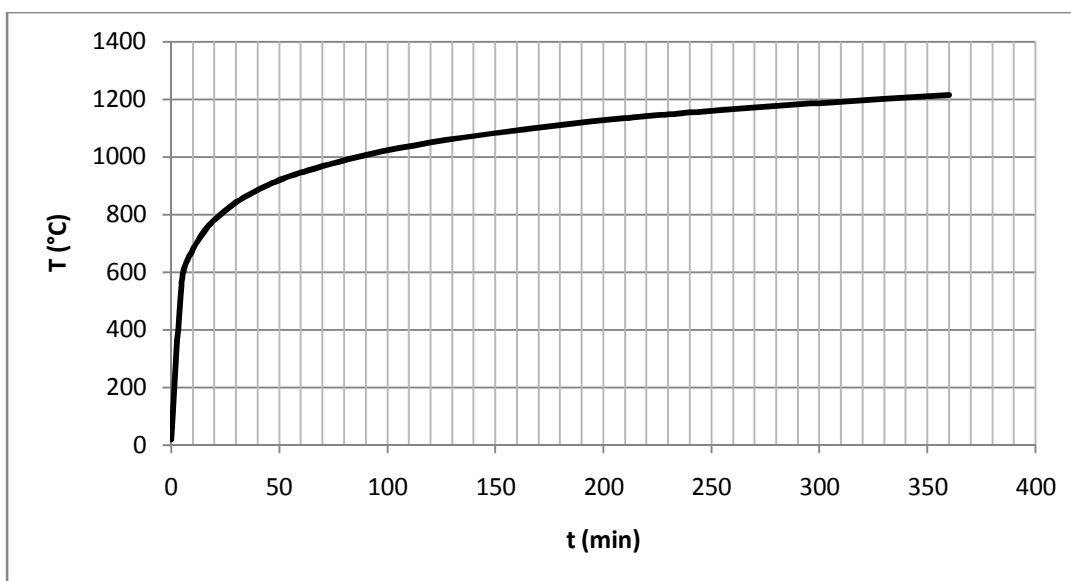
Stupeň C3 – lehce hořlavé stavební hmoty

Zkoušky požární odolnosti jsou specifikovány v normě ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky

V normě je popsán podrobně postup zkoušení vzorků a průběh zatěžovací teploty, který je sledován vztahem:

$$T=345\cdot\log_{10}(8t+1)+20$$

Graf 1 – Normová teplotní křivka [13]



5 VYBRANÉ PRODUKTY DOSTUPNÉ NA ČESKÉM TRHU

5.1 MC Nafufill KM 250

Správková hmota MC Nafufill KM 250 se osvědčila jako PCC-náhrada betonu, použitelná univerzálně při sanaci betonu.[18]

Mezi nejdůležitější vlastnosti správkové hmoty lze zařadit dle normy DIN 4102 část 1 její nehořlavost ve třídě A1 (hmota nehořlavá). Hmota se využívá při sanačních zásazích v tunelech. Výrobce též v technických listech uvádí vysokou odolnost vůči posypovým solím a těsnost vůči chloridům, což lze využít zejména u dopravních staveb. Sanační malta je zpracovatelná ručně i strojně. MC Nafufill 250 se míchá pouze s vodou, kdy suchá směs se vsype přímo do připravené vody, kde výrobce udává množství vody přibližně 4 l. Sanační malta je dodávána v baleních po 25 kg.

V důsledku přímého vysychání je nutno maltu chránit před povětrností a přímým slunečním zářením po dobu 3 dnů.[19]

Z tabulky č. 4 lze vysledovat, že se jedná o jemnozrnný produkt vyhovující příslušným normám, případně i jiným požadavkům. Za zmínku stojí též odolnost proti chloridům této malty. Výrobek je certifikovaný a klasifikovaný dle ČSN EN 1504-3. Při praktických pokusech s požárem produkt MC Nafufill KM 250 obstál. Stavební hmota nevykazovala po značném namáhání požárem žádné narušení v přilnavosti a celý průřez vrstvy zůstal zachován. Na betonu nebylo rovněž zjištěno žádné odlupování.[18]

Tabulka 4 – *Technické hodnoty MC Nafufill 250 KM* [19]

Vlastnost	Měrná jednotka	Hodnota	Poznámky
Zrnitost	mm	2	
Objemová hmotnost čerstvé malty	kg/dm ³	2,06	
Objemová hmotnost suché směsi	kg/dm ³	1,85	
Pevnost v tahu za ohybu/pevnost v tlaku	MPa	4,7/34,4	po 2 dnech
	MPa	5,8/50,4	po 7 dnech
	MPa	8,5/55,0	po 28 dnech
Dynamický modul pružnosti	MPa	32500	po 28 dnech
Statický modul pružnosti	MPa	22600	po 28 dnech
Smrštění	mm/m	0,78	po 90 dnech
Hloubka karbonatace	mm	0	po 90 dnech
Koeficient migrace chloridů	m ² /s	2,53	
Spotřeba (suchá směs)	kg/m ² /mm	1,80	
Doba zpracovatelnosti	minuta	60	při +5 °C
	minuta	45	při +20 °C
	minuta	30	při +30 °C
Tloušťky nanášených vrstev	mm	6	min. tloušťka vrstvy na pracovní krok
	mm	25	min. tloušťka vrstvy na pracovní krok
	mm	50	max. celková tloušťka vrstev
	mm	100	lokální poruchy
Podmínky pro zpracování	°C	≥5-≤30	teplota vzduchu a podkladu
Poměr míchání	hmotnostně	100:15-16	Nafufill KM 250 : voda

Sanační malta Nafufill KM 250 splňuje požadavky dle normy ČSN EN 206 na použití pro expoziční třídy XC 1-4, XF 1-4, XD 1-3, XS 1-3. [20]

5.2 StoCrete TS 100

V případě StoCrete TS 100 se jedná o zušlechtěnou, hydraulicky tuhnoucí jednosložkovou maltu pro nástřik za sucha na cementové bázi s 2mm frakcí. V technických listech výrobce je uvedeno, že malta je vhodná pro obnovu požární odolnosti opravovaných stavebních prvků. Jedná se o třídu stavebnin v kategorii nehořlavá, třída stavebnin A2 podle DIN 4102.

Sanační malta byla testována podle normy DIN a podle křivky závislosti vlastní teploty na čase a křivky uhlovodíků při době požáru 90 minut. Úprava povrchu, ošetřování a skladování malty je podrobněji popsáno v technických listech výrobce. [23]

Tabulka 5 – *Parametry StoCrete TS 100* [23]

Kritérium	Norma/předpis pro zkoušku	Hodnota	Jednotka
Objemová hmotnost čerstvé malty	DIN EN 1015-6	2,1	kg/dm ³
Soudržnost (14 dní)	DIN EN 1542	≥ 2,0	MPa
Pevnost v tahu za ohybu (28 dní)	DIN EN 196-1	9-12	MPa
Pevnost v tlaku (28 dní)	DIN EN 196-1	55-75	MPa
Dynamický modul pružnosti (28 dní)	TP BE-PCC, popř. SPCC	35000	MPa

5.3 EMACO S88

Jedná se o tixotropní rheoplastickou nese segregující a nepropustnou maltu kompenzující smrštění, která poskytuje vysokou pevnost a přilnavost k podkladu. Je zvláště trvanlivá i v agresivním prostředí. Použití malty spadá do oblasti oprav vertikálních a horizontálních nosných konstrukcí či jejich prvků, zdí nebo kleneb, při mechanickém i ručním nanášení. Výrobek neobsahuje kovové přísady ani chloridy. [21]

Po jednodenním zrání při teplotě 20 °C byla část vzorků zhotovených z malty EMACO S88 uložena při teplotě 20 °C. V různých časech, po dobu 6 dní, byla srovnávána pevnost v tlaku a ohybu všech vzorků. Výsledky testu ukázaly, že malty EMACO jsou schopny odolávat vysokým teplotám od 400 °C výše po velmi dlouhou dobu bez závažnějšího poškození. Zásah sanační maltou se provádí stříkáním či ručně v maximální tloušťce 40 mm na jednu vrstvu. Je-li požadována větší hloubka, je nutno nanášet maltu ve více vrstvách. Aplikaci malty není možno provádět při teplotách nižších než 0 °C, naopak při teplotách nad 30 °C je nutno dbát na pravidelné ošetřování a skrápění malty vodou a zabránit tak nadměrnému vysychání malty v době jejího zrání.

Malta je vyráběna v různých modifikacích, jako rychletuhnoucí verze atd.[21]

Tabulka 6 - *Technické údaje EMACO S88* [22]

	Norma	Jednotka	Norma EN 1504-3	Naměřené hodnoty	Deklarované hodnoty
Vzhled					šedý prášek
Obsah chloridových iontů	EN 1015-7	%	$\leq 0,05$		$\leq 0,05$
Velikost zrna		mm			max. 1,5 mm
Objemová hmotnost		g/cm ³			$\geq 2,1$
Množství vody (na jedno balení 25 kg)	ASTM C-230	l			$\pm 3,5-4,5$ (nástřík nebo manuálně-plastická konzistence)
Teplota podkladu při aplikaci (podklad a materiál)		°C			min. +5 a max. +30
Pevnost v tlaku (po 1 dni)	EN 19012	N/mm ²			min. 25
Pevnost v tlaku (po 28 dnech)	EN 19012	N/mm ²	≥ 45		≥ 62
Pevnost v ohybu (po 1 dni)		N/mm ²			min. 5
Pevnost v ohybu (po 28 dnech)		N/mm ²			min. 8
Modul pružnosti (7 dní)	EN 13412	N/mm ²		≥ 25000	
Modul pružnosti (28 dní)	EN 13412	N/mm ²	≥ 20000	≥ 30000	
Soudržnost	EN 1542	N/mm ²	≥ 2		$\geq 2,6$
Odolnost proti karbonataci	EN 13295	mm	$d_k \leq \text{ref. beton (MC45)}$	$\leq \text{ref. beton}$	
Obsah vzduchu		%			3,5-6,5
Kapilární nasákavost	EN 13057	kg/m ² /h ^{0,5}	$\leq 0,5$	0,131	
Pronikání vody		mm	mm	max. 10	
Odolnost proti cyklům zmrazování a rozmrazování		mm ²	mm ²	max. 0,4	
Smrštění					max. 12×10^{-4}

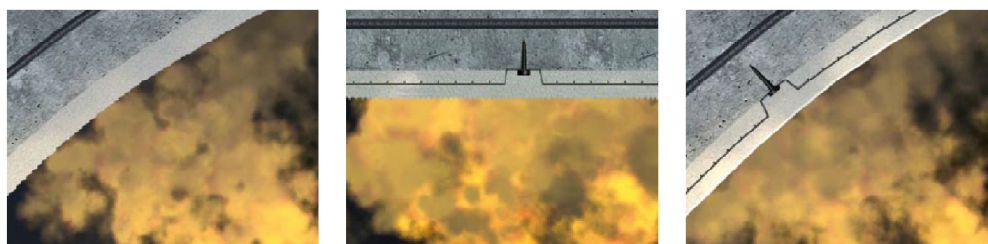
6 VYBRANÉ PRODUKTY DOSTUPNÉ NA ZAHRANIČNÍM TRHU

6.1 Sicacrete F (Fireprotectionmortar)

V technických listech tohoto produktu je uvedeno, že plnivem těchto požárně odolných sanačních malt je vermikulit. Vermikulit slouží jako izolační výplň celé složky.

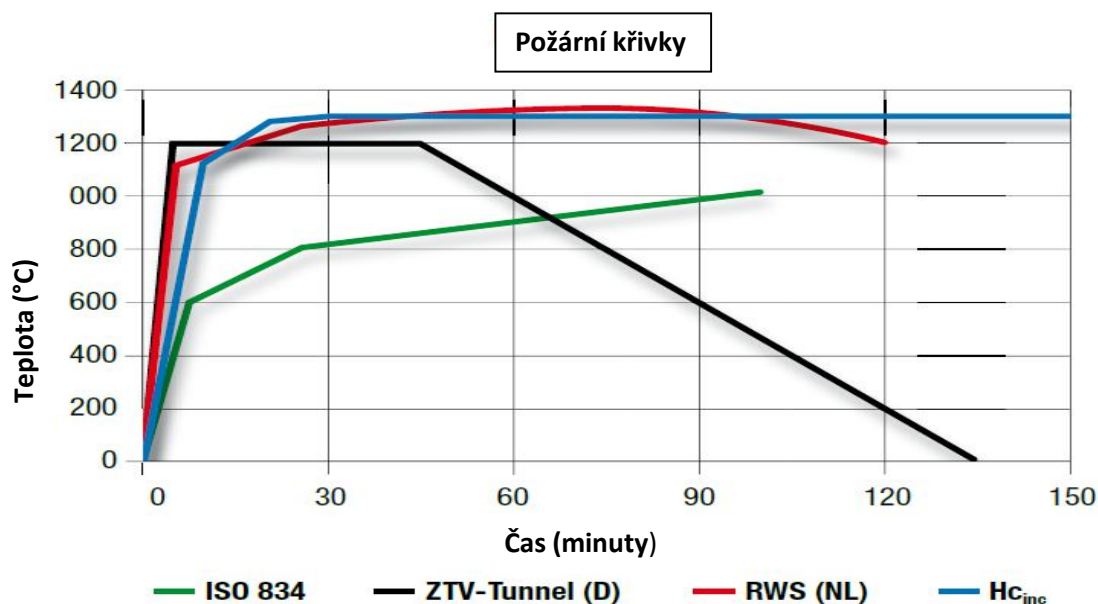
Vermikulit při vysokých teplotách (700 – 1000 °C) ve formě tenkých slídových destiček expanduje. Jeho objem se zvětší až dvacetkrát a voda, která je přirozeně vázána unikne. Malta je používána především pro sanaci tunelů. Výrobce též uvádí ve svých materiálech požadavky na protipožární pasivní systémy, kde by teplota betonu neměla přesáhnout 380 °C a ocelové výztuže pak 250 °C, nemělo by zde také docházet k odprýskávání betonu a delaminaci povrchové protipožární ochrany po požáru. Systémy, které využívají protipožární ochranu Sicacrete F jsou testovány v souladu se zavedenými mezinárodními standardy v akreditovaných laboratořích a zkušebních ústavech na požární odolnost. Úroveň požárního rizika je určována v závislosti na očekávaném budoucím provozu, počtu nákladních aut, kontejnerů a osobní dopravě. Různé požární scénáře jsou uvedeny v mezinárodních standardech. Křivka HC_{inc} (The European Hydrocarbon Fire Curve increased) může být použita jako zaštitění pro všechny mezinárodní normy pro zatížení požárem. HC_{inc} definuje nejhorší možný scénář, který může nastat v tunelu, kde současně hoří několik vozidel a převládající teplota je 1300 °C po dobu 4 hodin. Požárně odolná malta musí chránit beton pod ní. Teplota se během 4 hodin nesmí u betonu vyšplhat nad 380 °C a teplota vyztužení ocelí by neměla překročit 250 °C. Také by zde měl být omezen rozvoj toxických plynů při požáru. Křivka RWS (příklad holandské křivky) definuje maximální expozice, které lze očekávat v dalším extrémním případě. Je definována požárem nákladního auta (silniční cisterny) s nosností 50 m³, která převáží z 90 % kapalná uhlovodíková paliva (benzín). [24]

Použití malty Sicacrete F se provádí dle pokynů výrobce ve třech systémech:



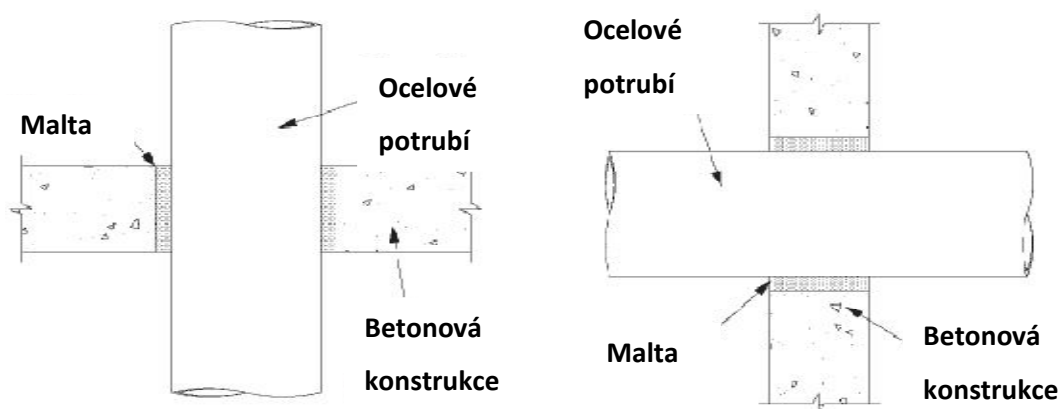
Obrázek 5 – Příklad systémů použití sanační malty Sicacrete [24]

Graf 2 – Požární křivky dle různých kritérií [24]



6.2 SpecSealFirestopMortar

Produkt je založen na bázi portlandského cementu. Jedná se o neobtlačitelný materiál, který slouží jako protipožární izolace. Po smíchání s vodou lze maltu lít či čerpat nebo ručně nanášet. Zatížení ostatních konstrukcí a manipulace s maltou je minimální díky její nízké objemové hmotnosti. Malta je vyráběna v rychleschnoucím provedení, kdy nedochází k praskání a vzniku trhlin v důsledku zamrznutí či změnám teploty. Malta přilne k podkladu pomocí chemické vazby, tudíž není potřeba mechanického kotvení nebo jen minimálního mechanického kotvení. Protipožární malta je klasifikována podle systémů schválených a testovaných na požadavky ASTM E814 (UL1479). [28]



Obrázek 6-Technické řešení prostupu potrubí betonovým stropem a stěnou [28]

6.3 Pyroplex

Výrobce protipožární malty firma Pyroplex Limited udává požární výdrž až 4 hodiny. Malta se používá k realizaci obkladů a prostupů. Poskytuje plynotěsnou překážku proti spalinám vznikajícím při požáru. Mezi vlastnosti, které jsou uvedeny na stránkách výrobce, patří výborná přilnavost k betonu a kovům, nízká tepelná vodivost cca $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, objemová hmotnost $860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Složení produktu výrobce neuvádí. V technických listech je pouze uvedeno, že malta neobsahuje žádná vlákna, křemen a halogeny. Podle způsobu použití se jedná spíše o maltu pro těsnění otvorů proti požáru a prostupu kouřových plynů. [25]



Obrázek 7-Řešení průchodu vzduchotechniky podlahou pomocí protipožární malty [25]

6.4 DAP FireResistantMortar

Jedná se o žáruvzdornou maltu založenou na bázi portlandského cementu. Slouží jako správková malta pro krby, kamna, ohniště aj. Při porušení nebo odštěpení cihel z krbových kamen lze tuto maltu použít k opravě. Přilne pevně na šamotové cihly ať už suché či mokré. Pro průmyslové využití lze maltu aplikovat na dřevěné rámové konstrukce, kde je předepsán ASTM E 136 nehořlavý tmel, dále jako těsnění pro ventilační otvory, trubky, potrubí a komíny. Aplikuje se před použitím sádkokartonových výrobků. Odolává teplotám kolem $2000 \text{ }^{\circ}\text{F}$, což je po převedení na Celsiovu stupnici kolem $1093 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Výrobce udává, že tato malta je vhodná pouze pro aplikace v interiéru. [27]

7 DĚJE PROBÍHAJÍCÍ V ŽELEZOBETONU VYSTAVENÉHO ÚČINKŮM POŽÁRU

Děje probíhající v betonu při požáru

V první fázi zahřívání, což je rozmezí od 20 do 80 °C, nastává pomalá ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. Při 100 °C je zřetelné zvýšení úniku vody. V rozmezí teplot 80 až 150 °C dochází k dehydrataci ettringitu. Při 150 až 170 °C dochází k rozkladu sádry $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Zvýšením teploty na 170 °C dochází k tavení polypropylenových a všeobecně běžně používaných polymerních vláken, počátek dehydratace C-S-H gelu. Při 200 °C nastává ztráta fyzikálně vázané vody doprovázena zvýšením vnitřního tlaku. Volná voda není přítomna při teplotě 374 °C. Rozklad portlanditu nastává při teplotě 400 °C ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$). Další významnou teplotou je 573 °C, kdy dochází ke změně krystalové fáze z β na α modifikaci křemene v kamenivu a písku. Při této přeměně dochází k velkým objemovým změnám, které způsobují vznik trhlin a snížení únosnosti celé konstrukce. Nebezpečným aspektem je též odloupení betonu od výztuže a její vystavení přímému požáru. Při teplotě 600 °C nastává druhá fáze rozkladu C-S-H gelů na $\beta\text{-C}_2\text{S}$. V okolí teploty 700 °C dochází k rozkladu uhličitánu vápenatého $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, jedná se o silnou endotermickou reakci, která je doprovázena unikem oxidu uhličitého. U jemnozrnného uhličitánu vápenatého je tato teplota ještě nižší. Při 800 °C nastává počátek vzniku keramické vazby. Teplota 1100 až 1200 °C má za následek tvorbu Wollastonitu, což je metamorfovaný vápenec β ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{SiO}_2$). Při 1300 °C dochází k celkovému rozkladu betonu a tavení některých složek.[26]

Rozdílná schopnost absorbovat tepelnou energii a rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti jednotlivých složek i teplotní gradient mezi povrchovými a vnitřními vrstvami stavebního materiálu (správkové malty), jsou příčinou vzniku pnutí na rozhraní jednotlivých částic, krystalů apod. doprovázených vznikem jemných prasklin. Tento vznik trhlin a prasklin je samozřejmě doprovázen okamžitým poklesem pevnosti, růstem pórovitosti a zvětšováním povrchu materiálu, což vede dále ke snížení odolnosti proti působení vody a vodných roztoků solí, což se negativně může projevit i korozí výztuže, kam tento pórovitý systém dosáhne.[26]

Rychlost pohybu vody i její množství v pórovitém materiálu významně závisí na charakteru pórovité struktury, na celkovém objemu pórů a na distribuci pórů podle velikosti.

Popsat pórovitý systém stavebních materiálů je velmi složité, protože jejich póry nemají pravidelný, matematicky snadno popsatelný tvar, Jsou to nepravidelné dutinky nejružnějších velikostí, tvarů i charakteru povrchu.

Z hlediska pohybu kapalin a plynů mají pozitivní vliv, umožňující únik vodní páry při požáru pouze ty, které jsou navzájem propojené a umožňují odvod páry a snížení tlaku ve struktuře kompozitu. V uzavřené struktuře pórů dochází k překročení tlaku vodní páry a odprýskávání povrchových vrstev.

V pórovitém materiálu se navíc nikdy nevyskytuje čistá voda, ale více či méně koncentrované vodné roztoky plynů nebo pevných látek, jejichž vlastnosti se od čisté vody mohou v různé míře lišit. [40]

Polymerní vlákna mají ve struktuře kompozitu příznivý vliv, který se při vzniku požáru projevuje jejich vyhoříváním a utvářením nové kapilární struktury, jež umožňuje snížit tlak vodní páry. Tento tlak způsobuje tzv. explozivní odprýskávání povrchových vrstev. Toto explozivní odprýskávání zpravidla způsobí obnažení výztuže a její přímé vystavení požáru popř. po skončení požáru a ponechání výztuže povětrnostním vlivům a vlhkosti dochází ve většině případů k rychlé korozi výztuže. Pozitivní vliv mají polymerní vlákna též na zamezení vzniku smršťovacích trhlin při zrání správkové malty či jiného kompozitního systému.

Děje probíhající v oceli při požáru

Při teplotách do 350 °C dochází k rekrytalizaci mikrostruktury, ale mechanické vlastnosti oceli se nemění natolik, aby ohrozily bezpečnost objektu. Teplota kolem 470 °C se považuje za kritickou teplotu oceli. Po překročení této kritické hranice může dojít k přetvoření ocelového prvku a ztrátě jeho nosnosti. Platí zde obecné pravidlo, že s rostoucí teplotou klesá pevnost a tažnost oceli, ale rostou plastické vlastnosti. Dochází k tzv. tečení oceli.

Kombinace oceli a betonu je vhodná nejen z důvodu alkalické pasivace výztuže, ale též zvyšuje časový úsek, po který je schopna ocelová výztuž zachovávat svou mechanickou stabilitu a únosnost. Beton zabraňuje přímému ohřevu ocelových prvků. Jedním z negativních vlivů je rozdílná teplotní roztažnost ocelové výztuže a betonového kompozitu, kdy může vlivem zvýšené teploty docházet k předčasnému vzniku trhlin a zhoršení mechanických vlastností betonu. [26]

8 POŽADAVKY NA SPRÁVKOVÉ HMOTY

Volba správkových materiálů pro ochranu a opravu betonu představuje důležitý a komplexní proces, při kterém se musí pochopit, co očekává majitel (uživatel), co vyžadují podmínky provozu a prostředí, ale je potřeba zohlednit i způsob provádění. Po stanovení jasných požadavků a definování materiálových vlastností lze přistoupit k volbě vhodných hmot. Při výběru musíme dokonale znát všechny vlastnosti materiálů, protože ty jsou základem kvalitní sanace. Materiály se musí vyznačovat vzájemnou kompatibilitou, neboť by mělo dojít k dokonalému spolupůsobení stávajícího a správkového materiálu. Konečná volba materiálů se provádí na základě vztahu mezi cenou, pracovními charakteristikami a technologickou náročností provedení sanace.

Jeden z největších problémů správkových materiálů jsou jejich objemové změny ve vztahu k podkladu. Důsledkem objemových změn je pak generace napětí v systému podklad – správková hmota, které mohou být příčinou například příčinou vzniku trhlin, snížení soudržnosti správkové hmoty příp. její úplné separace od podkladu apod.

Materiálové vlastnosti sanačních hmot

- požadavky na únosnost,
- požadované vlastnosti s ohledem na podmínky provozu a prostředí,
- technologická náročnost a vzhledové vlastnosti.

Další důležitou vlastností materiálů je jejich soudržnost s podkladem. Pro dosažení uspokojivých hodnot je obvykle zapotřebí použít hmoty, které jsou modifikovány vhodnými přísadami. Zlepšení soudržnosti také pozitivně ovlivňuje aplikace adhezního můstku.

Při použití materiálů je nezbytné sledovat způsob jejich skladování v souladu s pokyny výrobce (obvykle uvedenými na obalu a v technickém listu), a zajistit jejich zpracování před uplynutím záruční lhůty. U většiny hmot je doporučený způsob skladování v suchých prostorech při teplotě 5 – 20 °C, nejlépe v originálních neporušených obalech.

Správkové hmoty

Úkolem správkových hmot je obnovit betonové konstrukční prvky do původního tvaru, resp. obnovit nebo zvětšit tloušťku krycí vrstvy nad výztuží, případně staticky zesílit konstrukci. Správková hmota slouží především k obnovení trvanlivosti betonových prvků a k jejich vzhledovému uvedení do původního stavu. V případě, že správková hmota má vytvořit vrstvu zesilující betonový 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.

Správkové hmoty se člení do tří skupin podle složení:

- **cementové malty a betony (CC),**
- **polymercementové malty a betony (PCC)** – cementové malty a betony modifikované polymerními přísadami (např. akryláty, polyvinylacetáty a jejich kopolymery),
- **polymer malty a polymerbetony (PC)** – malty a betony, jejichž pojivem jsou výhradně polymerní pryskyřice (např. epoxidy, PUR, PES, SI).

Správkové hmoty musí splňovat tyto požadavky:

- vysokou soudržnost s podkladem,
- dobrou vodotěsnost, resp. malou nasákavost
- mrazuvzdornost minimálně na úrovni T100, případně větší podle konkrétních podmínek expozice,
- minimální objemové změny v důsledku změn vlhkosti a teploty,
- omezený vznik smršťovacích trhlin,
- modul pružnosti, který by měl být:
 - **nižší** než je modul pružnosti podkladního betonu, pokud správková hmota nemá statickou funkci,
 - **stejný** jako je modul pružnosti podkladního betonu, pokud správková hmota má statickou funkci,
- pevnost v tlaku, resp. v tahu za ohybu na shodné nebo mírně vyšší úrovni než podkladní beton, pokud správková hmota má statickou funkci,
- odolnost vůči agresivním médiím podle konkrétních podmínek expozice.

Tabulka 7 – Požadované základní parametry správkových hmot podle ČSN EN 1504-3 [3]

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	$\geq 15 \text{ GPa}$	$\geq 20 \text{ GPa}$
Odolnost proti karbonataci (ČSN EN 13295)	Bez požadavků	Bez požadavků	$d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45))	$d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45))
Tepelná slučitelnost^{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	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$

¹ Uvedená hodnotaje 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.



Obrázek 8 – Mokrý způsob nanášení správkové hmoty stříkáním [29]

8.1 VÝSLEDNÉ PARAMETRY SPRÁVKOVÉ HMOTY V NÁVAZNOSTI NA ÚČEL FUNKCE KONSTRUKCE

Správkový materiál sanace musí vykazovat uspokojivou přídržnost ke stávajícímu podkladu, musí vyplnit dutiny bez rozměšování a plně obalit obnaženou ocelovou výztuž. Pokud nebudou splněny uvedené požadavky, může se stát, že ochrana a oprava povrchu nebude odpovídat zadaným požadavkům na konstrukci a estetiku.

Podstatné je, aby materiál ochrany a opravy pevně přilnul k podkladu a aby následná namáhání nenabyla hodnot vedoucích k porušení soudržnosti. Je třeba připomenout, že hodnota přídržnosti správkové malty k podkladu se může v průběhu času působením negativních faktorů (mráz, agresivita prostředí) snižovat a z hlediska zajištění požadovaných parametrů je tedy nezbytné, aby nedošlo k jejímu poklesu pro požadovanou hodnotu.

Výběr správkových hmot závisí od konkrétních podmínek zadání. O výběru použitých sanačních správkových hmot rozhoduje zhotovitel na základě projektu sanace. Pro výběr správkové hmoty jsou kromě užitných parametrů podstatné i zkušenosti zhotovitele s vybraným typem materiálu. Podmínkou je, že pracovníci zhotovitele mají s vybraným typem správkové hmoty opakované, nejméně dvouleté zkušenosti, případně prokáží, že byli pro práci s tímto typem hmot zaškoleni výrobcem nebo dodavatelem hmoty.

Posuzování kvality a vhodnosti jednotlivých typů správkových hmot při jejich výběru se doporučuje provádět na základě referenčních sanačních akcí provedených v minulosti a s tímto typem hmot a na základě výsledků zkoušek prokazujících splnění parametrů podle technických podmínek sanace betonových konstrukcí a příslušných norem nebo požadavků obsažených v projektu sanace. Výrobcům stavebních hmot, jejich dodavatelům i zhotovitelům se doporučuje, aby systematicky evidovali referenční stavby.

Principy provádění:

Uvedené správkové hmoty mohou být nanášeny zednickým způsobem, nebo stříkáním betonu-torkretováním (za sucha nebo za mokra míchaný beton), pěchováním, čerpáním do bednění, odléváním do bednění nebo oddělenou betonáží s injektáží.

Zpracování, nanášení a ošetřování správkových hmot se provádí přesně podle pokynů výrobce uvedených v příslušných technologických předpisech. [3]

S tímto technologickým předpisem musí být seznámeni všichni zodpovědní pracovníci zhotovitele a přiměřeným způsobem i staveništní personál provádějící sanační práce.

Není dovoleno nanášet jakékoliv správkové hmoty bez existence písemného technologického předpisu, se kterým je v předstihu seznámen objednatel prací.

V technologickém předpisu musí být zejména přesně specifikován postup přípravy sanační správkové hmoty, eventuální vážení jednotlivých komponent, způsob a délka míchání, ale i otevřené časy pro zpracování správkové hmoty v závislosti na teplotě. Dále musí být přesně vymezeno, za jakých klimatických podmínek nelze se správkovou hmotou pracovat, tj. zejména jaká je nejnižší přípustná teplota vzduchu a podkladního betonu. V obvyklých případech se nepřipouští, aby teplota vzduchu a podkladu klesla pod +5 °C.

V technologickém předpisu musí být přesně specifikována kvalita podkladního betonu, zejména pak jeho vlhkost. Správkové hmoty na čistě polymerní bázi je obvykle nezbytné nanášet na podklad, jehož vlhkost je nižší než 4, resp. 5 %.

Dále jsou v technologickém předpisu přesně specifikovány podmínky ošetřování správkových hmot, a to zejména u správkových hmot obsahujících jakákoliv silikátová pojiva. Délka ošetření závisí na typu použitého pojiva i tloušťce nanesené vrstvy. Minimálně je nezbytné zabránit vysušení a podchlazení správkových hmot s pojivem na silikátové bázi po dobu 7 dnů. [3]



Obrázek 9 – Nanášení inhibitoru koroze na před upravený povrch betonové konstrukce [41]

9 ZAHRANIČNÍ VÝZKUM V OBLASTI POŽÁRNĚ ODOLNÝCH HMOT

9.1 VÝVOJ POŽÁRNĚ ODOLNÉ MALTY S POUŽITÍM STRUSKY A PEMZY

Výzkum požárně odolné malty byl prováděn v Turecku na univerzitě DokuzEylul, kde byl zjištěn příznivý účinek minerálních příměsí jako je fluidní popílek a mletá granulovaná struska, s ohledem na vysoké teplotní odolnosti. Tato odolnost je způsobena stabilizací $\text{Ca}(\text{OH})_2$ z cementu pomocí pucolánové reakce.

Mletá granulovaná struska je získávána při výrobě oceli jako vedlejší produkt. Struska slouží v betonu ke zlepšení zpracovatelnosti a zvýšení pevností v pozdějším stádiu zrání, struska přispívá ke snížení tzv. bleedingu čerstvého betonu (krvácení betonu), propustnost, pórovitost.

Vliv použitého kameniva má velký podíl na chování betonu při požáru. Bylo zjištěno, že kamenivo obsahující křemen, jako je písek, pískovec a křemen může vyvolat nepříznivé napětí v betonu při zatížení vysokou teplotou. Při 573 °C dochází k modifikační přeměně křemene z modifikace β na modifikaci α , přičemž dochází k velkým objemovým změnám, které způsobují již zmíněné napětí v betonu. Další nebezpečí hrozí při teplotě nad 700 °C, kde dochází k rozkladu vápence přibližně při teplotě 898 °C.

Významným faktorem pro výběr kameniva pro použití jako protipožární suroviny je i tepelná vodivost. Čím vyšší je výsledná tepelná vodivost betonu, tím horší požární odolnost tento beton vykazuje. Volba směřuje tudíž k lehkým kamenivům jako je např. pemza, keramzit, zpěněná struska.

Cement v této studii byl použit CEM-I (42,5N) z cementárny Izmir Turecko. Chemické a fyzikální vlastnosti cementu a strusky byly testovány za spolupráce s ocelárnou Iskenderun. Při výzkumu byl cement nahrazen až z 80 % struskou (GGBFS) a pemzou na pojivo v poměru 3:1. Suchá směs cementu, pemzy a strusky je míchána dle požadavků normy ASTM C305. Suchá směs je míchána po dobu 3 minut, poté je přidávána voda a míchání pokračuje přibližně 5 minut.

Čerstvá směs byla uložena do připravených ocelových forem o rozměrech zkušebního tělesa 40x40x160 mm. Vzorky byly uchovány při pokojové teplotě přibližně 20 °C po dobu 24 hodin.

Po uplynutí této doby byly vzorky odformovány a ponechány při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 90±5 % do testování. Vzorky byly testovány při teplotách 300, 600, 900 °C po dobu 3 hodin v peci. Nárůst teploty byl nastaven na 10 °C/min, testováno bylo 12 vzorků pro jednu konkrétní teplotu. Teplota ohřevu byla nastavena pozvolněji z důvodu takového, že při vyšší rychlosti ohřevu by se uplatnil větší rozdíl teploty na povrchu zkoušených vzorků a jejich jádrem. Poté byly vzorky ochlazovány dvojím způsobem. Jedna sada zkušebních těles byla chlazená pomalým způsobem pouze v laboratorním prostředí. Druhá sada zkušebních těles byla podrobena rychlému chlazení. Po období ochlazování vzorků byly tyto vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku byla provedena v návaznosti na ohybové zkoušky. Pevnost v tlaku byla zkoušena na zlomcích zkušebních těles, které zbyly po ohybových zkouškách. Výsledky zkoušek byly porovnány se vzorky nezatíženými vysokou teplotou. [7]

Tabulka 8 – Fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti cementu a strusky (GGBFS) [7]

Fyzikální a mechanické vlastnosti cementu a strusky GGBFS		
Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Měrný povrch cementu (Blaine)	352	m ² /kg
Pevnost v tlaku cementu (2 dny)	27,2	MPa
Pevnost v tlaku cementu (7 dní)	42,4	MPa
Pevnost v tlaku cementu (28 dní)	52,7	MPa
Pucolánový index aktivity GGBFS (7 dní)	98	%
Pucolánový index aktivity GGBFS (28 dní)	108	%
Měrný povrch GGBFS (Blaine)	485	m ² /kg

Na základě chemických a fyzikálních vlastností jednotlivých komponent byla vytvořena receptura, která obsahuje různé procentuální zastoupení strusky pod značením GGBFS. Před samotnou přípravou vzorků byl proveden též síťový rozbor, jehož výsledek je uveden v tabulce č. 9. [7]

Tabulka 9 – Chemické složení cementu a GGBFS[7]

Chemické složení	Cement[%]	GGBFS[%]
SiO ₂	19,30	35,71
Al ₂ O ₃	5,57	14,52
Fe ₂ O ₃	3,46	0,80
CaO	63,56	32,13
MgO	0,86	9,39
Na ₂ O	0,13	
K ₂ O	0,80	
SO ₃	2,91	
LOI	2,78	
Nerozpustný zbytek	0,42	
Volný CaO (%)	1,22	

Tabulka 10 – Fyzikální a chemické vlastnosti pemzy[7]

Chemické složení	[%]	Fyzikální vlastnosti	Jednotka	Hodnota
SiO ₂	75,51	Měrná hmotnost	g/cm ³	2,03
Al ₂ O ₃	1,1	Nasákavost	%	6,38
Fe ₂ O ₃	9,94	Sypná hmotnost	kg/m ³	1220
CaO	0,25	Hmotnost v setřeseném stavu	kg/m ³	1380
MgO	0,04			
Na ₂ O	2,04	Velikost oka síta (mm)		% propad
K ₂ O	5,12	4		100,0
TiO ₂	<0,01	2		91,5
P ₂ O ₅	<0,001	1		75,4
LOI	4,27	0,5		52,5
		0,25		27,4

Tabulka 11 – Návrh směsí [7]

Označení záměsi	GGBFS (%)	Vodní součinitel	Zkouška rozlítím (mm)	Objemová hmotnost v čerstvém stavu (kg/m ³)
GGBFS0	0	0,72	111	1968
GGBFS20	20	0,71	110	1944
GGBFS40	40	0,70	110	1941
GGBFS60	60	0,70	110	1940
GGBFS80	80	0,70	110	1942

Tabulka 12 – Výsledné pevnosti v tlaku všech směsí [7]

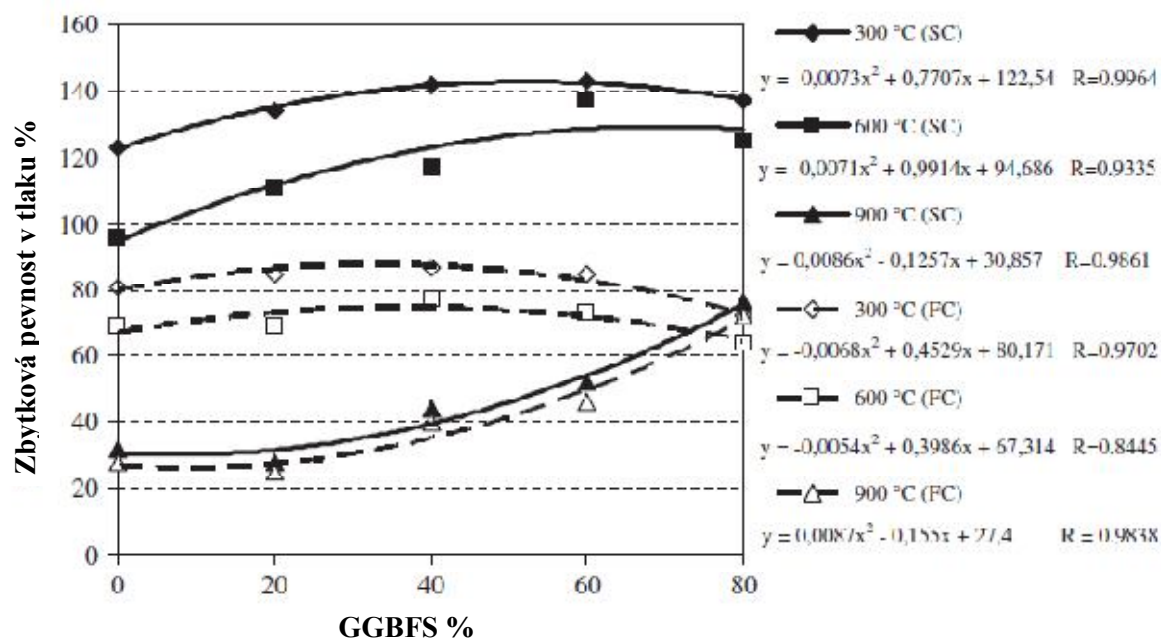
Záměs	Pevnost v tlaku [MPa]						
	20 °C	300 °C		600 °C		900 °C	
		SC	FC	SC	FC	SC	FC
GGBFS0	45,6	55,9	37	43,7	31,5	14,4	12,8
GGBFS20	41,1	55,2	35	45,5	28,4	11,4	10,4
GGBFS40	40,7	57,6	35,4	47,5	31,2	18	16,2
GGBFS60	32	45,8	27,3	43,7	23,2	16,5	14,9
GGBFS80	20,5	28,1	14,7	25,6	13,1	15,7	14,7

Tabulka 13 - Výsledné pevnosti v tahu za ohybu všech směsí [7]

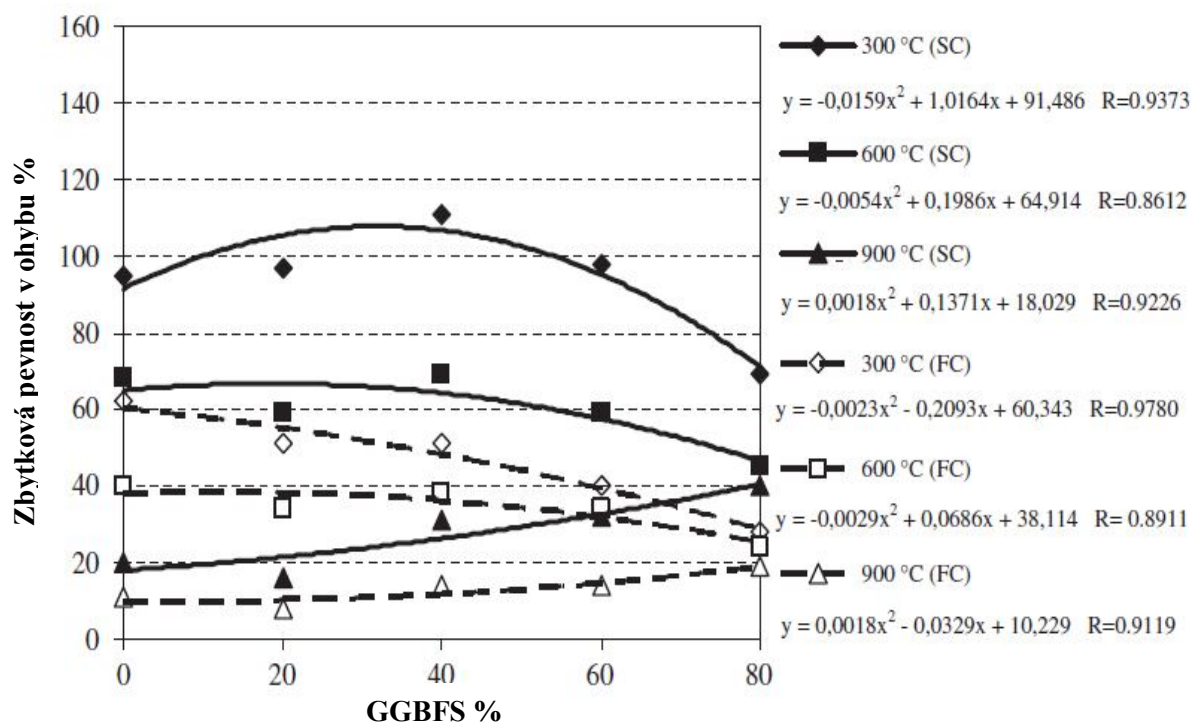
Záměs	Pevnost v tahu ohybem [MPa]						
	20 °C	300 °C		600 °C		900 °C	
		SC	FC	SC	FC	SC	FC
GGBFS0	9,0	8,6	5,6	6,1	3,6	1,8	1,0
GGBFS20	9,1	8,8	4,6	5,3	3,1	1,4	0,8
GGBFS40	8,1	8,9	4,1	5,5	3,1	2,5	1,2
GGBFS60	7,2	7,0	2,9	4,2	2,4	2,3	1,0
GGBFS80	5,6	3,9	1,5	2,5	1,3	2,2	1,1

SC – SlowCooled (pomalé chlazení); FC – Fast Cooled (rychlé chlazení)

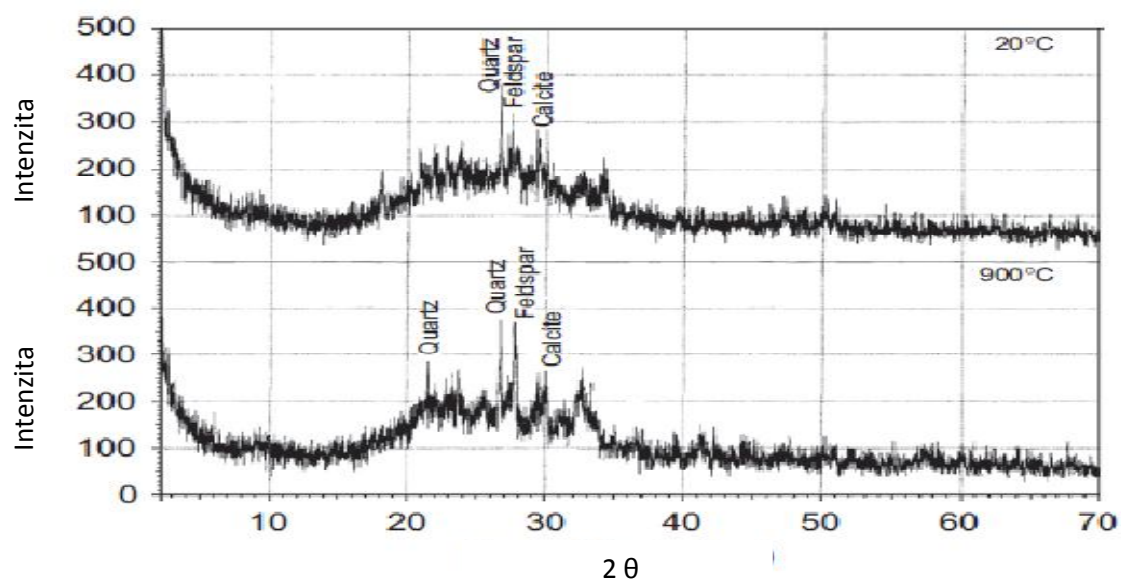
Graf 3 – Relativní zbytková pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu FC a SC malt [7]



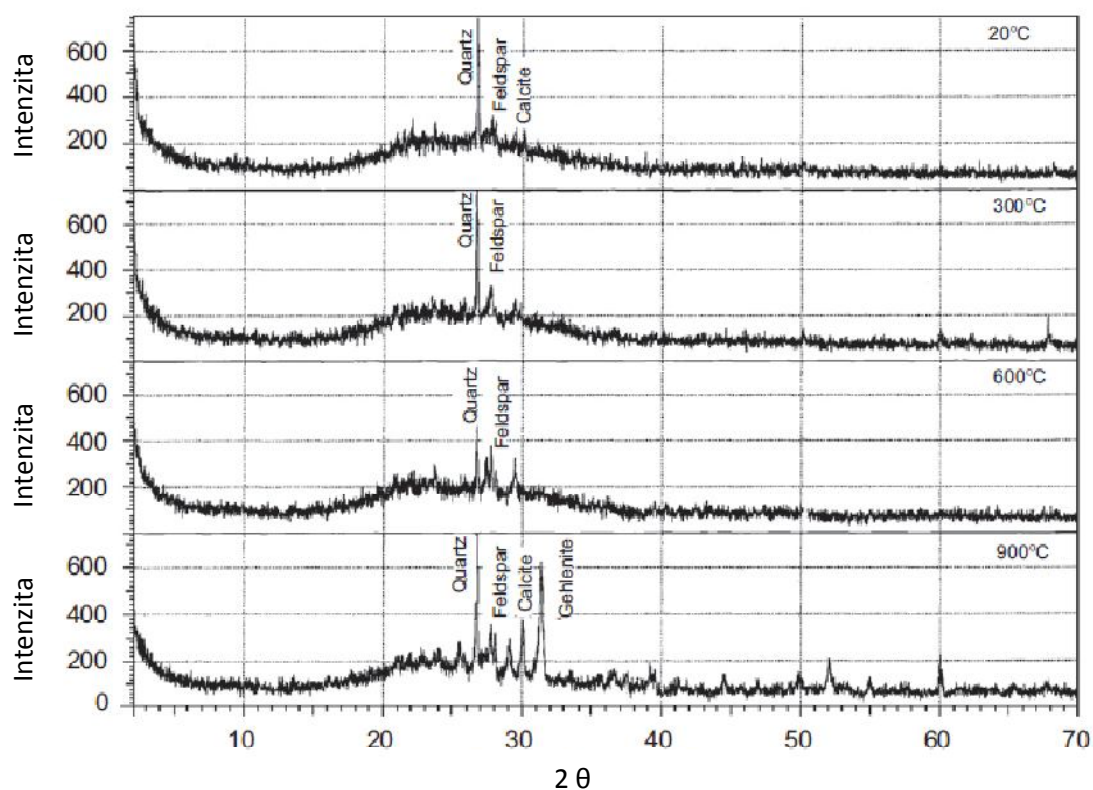
Graf 4 – Relativní zbytková pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu FC a SC malt [7]



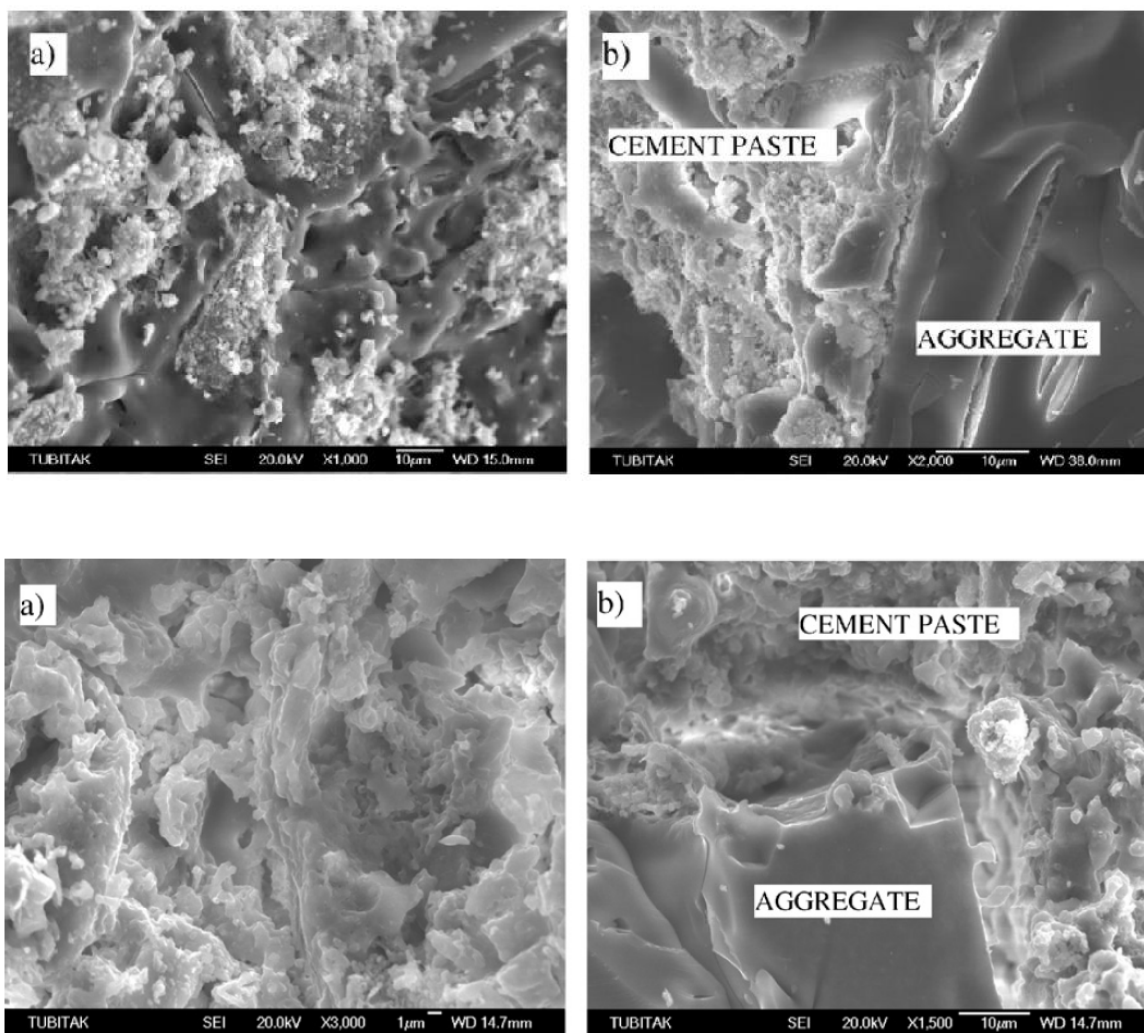
Graf 5 - RTG difrakční analýza GGBFS0 SC malty při 20 °C a 900 °C [7]



Graf 6 - RTG difrakční analýza GGBFS60 SC malty při 20 °C, 300 °C, 600 °C a 900 °C [7]



Quartz (křemen); Feldspar (živce); Calcite (kalcit); Gehlenite (Gehlenit)



Obrázek 10 – SEM analýza pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu GGBFS0 a GGBFS60 při teplotě 900 °C; a) Cementový tmel; b) ITZ. [7]

SEM analýza byla realizována na vzorcích GGBFS0 (nulový obsah strusky) a GGBFS60 při 900 °C. SEM analýza prokázala u GGBSF0 při 900 °C, že C-S-H gely a CH vykazují amorfní fázi a ztrácí charakteristickou krystalickou strukturu. Krystaly s kulatým tvarem můžou být β -C₂S, který je jedním z produktů rozkladu C-S-H při zvýšené teplotě.

Při výzkumu bylo také zjištěno oddělení cementového tmelu od kameniva a tím způsoben vznik mezer. Při porovnání receptur GGBFS0 a GGBFS60 bylo prokázáno, že u GGBFS0 docházelo k výraznějšímu poškození matrice než u GGBFS60. Pozitivní příspěvek GGBFS60 je přisuzován galenitové formaci. Dále je zde také zohledněn způsob chlazení a namáhání vzorků. Všechny tyto parametry mají příznivý vliv na vysokou teplotní odolnost materiálů na bázi cementu. [7]

U vodního způsobu chlazení vzorků byly vysledovány vyšší pevnostní ztráty než u způsobu chlazení vzduchem, zejména při relativně nízkých teplotách je u těchto vzorků pozorována vyšší ztráta pevností v ohybu než u pevností v tlaku. V důsledku tohoto zjištění je možno konstatovat, že materiály na cementové bázi, které jsou vystaveny ohybovému namáhání, jsou citlivější na vysoké teploty než tlačené prvky. Cementová malta s použitím pemzy a GGBFS se zdá být vhodná pro použití jako víceúčelový izolační materiál pro konstrukce vystavené zvýšenému teplotnímu namáhání po dobu jejich životnosti.[7]

9.2 VLIV PEMZY A POPÍLKU NA ODOLNOST MALT VŮČI VYSOKÝM TEPLITÁM

Výzkum vlivu pemzy a popílku na požární odolnost byl prováděn v Turecku na univerzitě Dokuz Eylul, kde byl zjištěn příznivý účinek minerálních příměsí popílku a pemzy, s ohledem na vysoké teplotní odolnosti cementových malt.

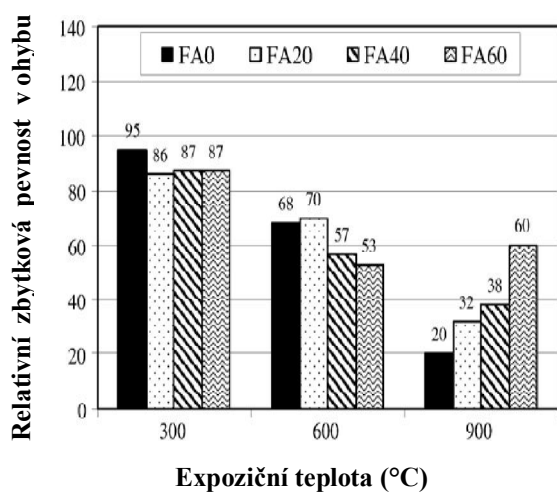
Tabulka 14 - *Fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti popílku* [8]

Fyzikální a mechanické vlastnosti cementu		
Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Pucolánový index aktivity popílku (7 dní)	79	%
Pucolánový index aktivity popílku (28 dní)	88	%
Měrný povrch popílku (Blaine)	290	m ² /kg

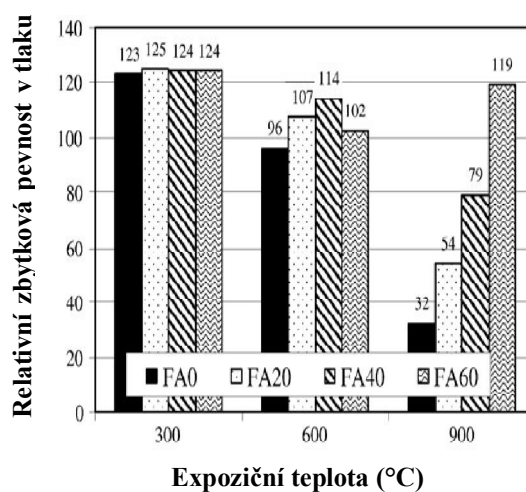
Tabulka 15 - *Návrh směsí* [8]

Záměs	Popílek (%)	Vodní součinitel	Zkouška rozlitím (mm)	Objemová hmotnost v čerstvém stavu (kg/m ³)
FA0	0	0,72	111	1968
FA20	20	0,74	110	1920
FA40	40	0,76	110	1900
FA60	60	0,78	111	1868

Graf 8 – Relativní zbytková pevnost v tlaku malt chlazených vzduchem[8]

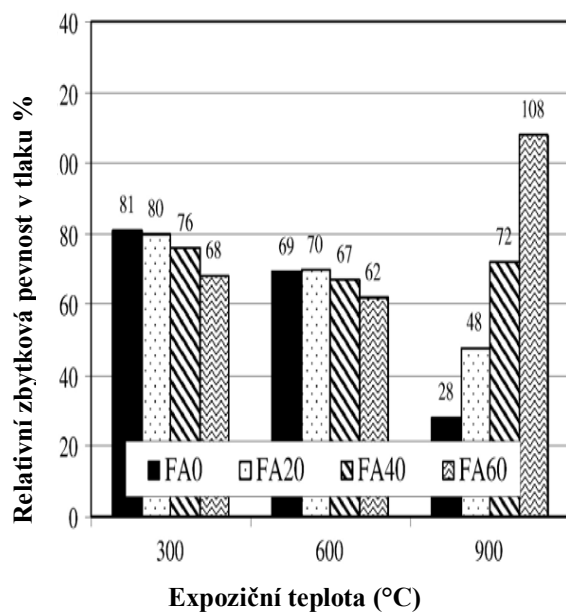


Graf 7 – Relativní zbytková pevnost v ohybu malt chlazených vzduchem[8]

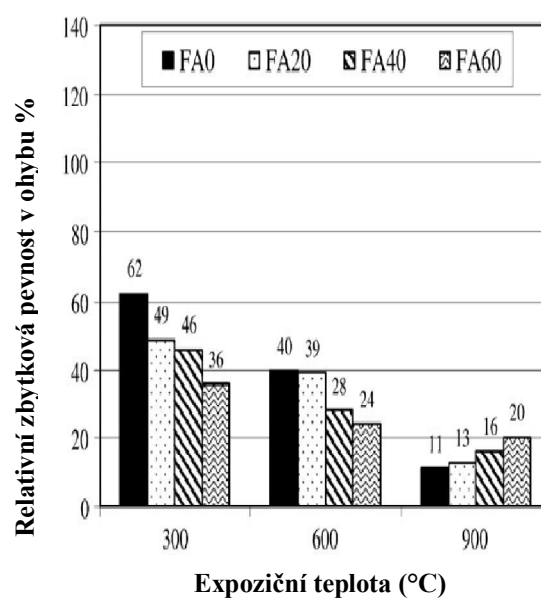


Při zkoušení vzorků chlazených vzduchem byl zaznamenán pokles pevnosti v tlaku FA0 až 80 % při použití expoziční teploty 900 °C. Expoziční teploty byly rozděleny do tříd po 300 °C. Při vystavení vzorků vysokým teplotám dochází ke vzniku mikrotrhlin, které způsobují nejvyšší namáhání a snížení pevnosti v ohybu namáhaných prvků. Vzorky, které byly chlazené vzduchem, dosahují vyšších pevností než u chlazení vodou.[8]

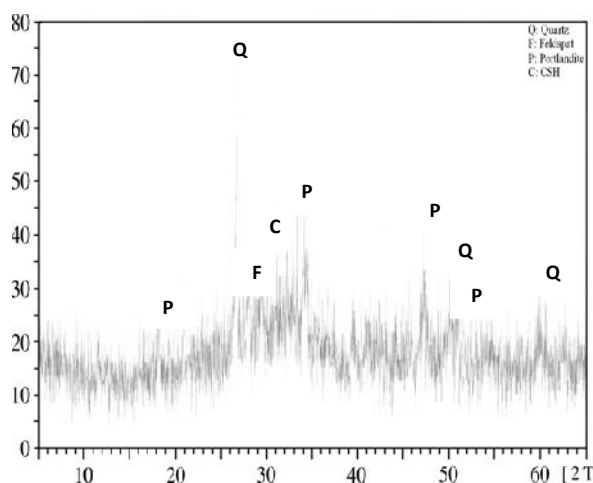
Graf 10 – Relativní zbytková pevnost v ohybu malt chlazených vodou[8]



Graf 9 – Relativní zbytková pevnost v tlaku malt chlazených vodou[8]

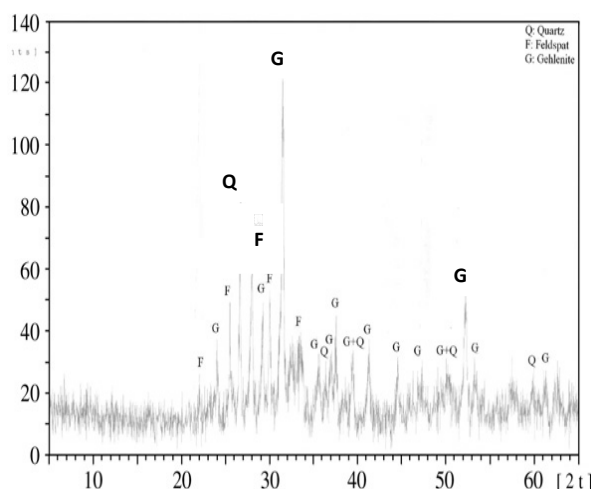


Graf 12 – RTG difrakční analýza cementového tmele (60 % FA) při 900 °C



2 θ

Graf 11 – RTG difrakční analýza cementového tmele (60 % FA) při 20 °C



2 θ

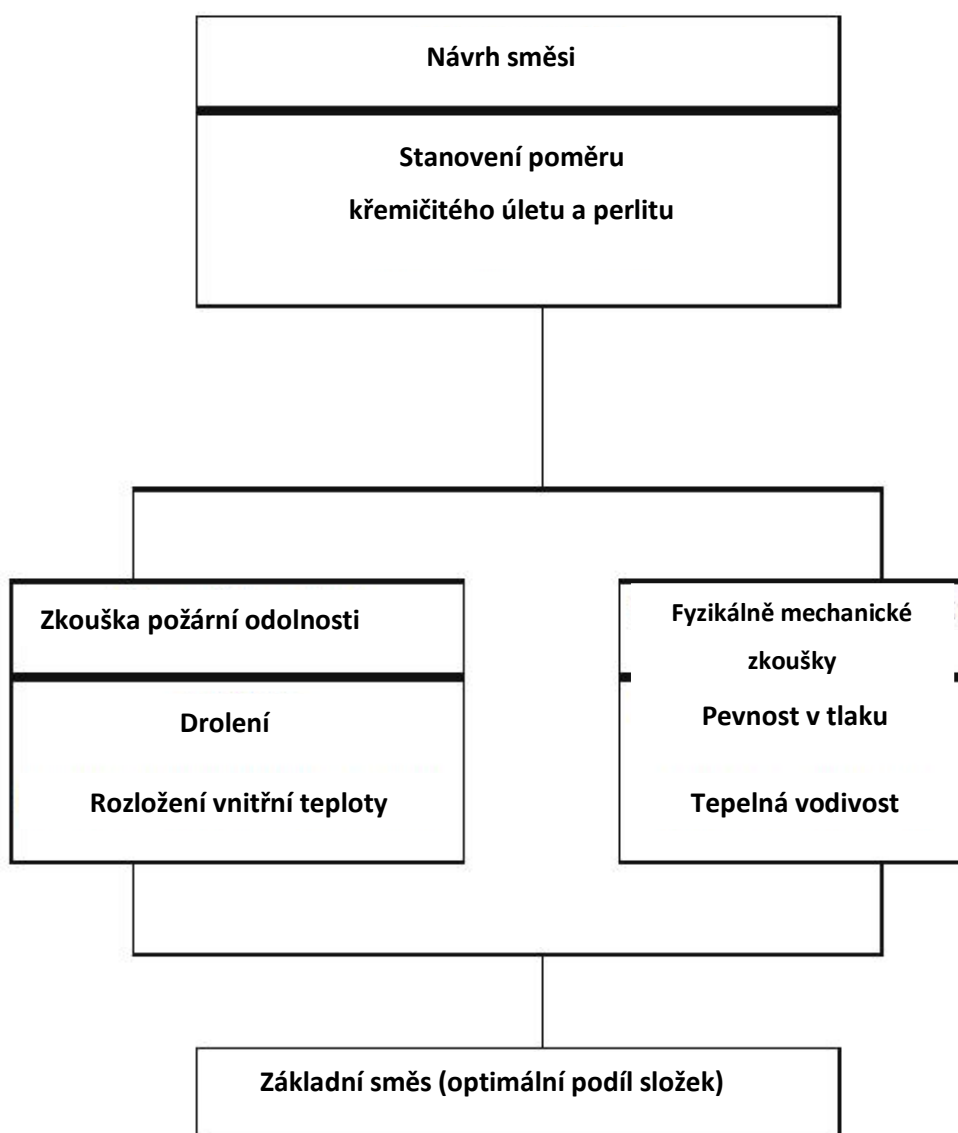
Požárně odolná malta s pemzou a cementem jako pojivem prokázala teplotní odolnost až do 600 °C. Tato malta vykazovala pouze 4 % ztrátu pevnosti v tlaku a 32 % ztrátu pevnosti v ohybu. Tyto hodnoty byly zjištěny při ochlazování vzorků vzduchem. Při teplotě 900 °C tyto pevnosti výrazně poklesly. Při náhradě cementu popílkem FA60 (60 % popílku) se pevnosti výrazně zvýšily cca o 19 % oproti kontrolním vzorkům chlazených vzduchem. Obsah popílku 60 % byl shledán nejlepší variantou, kdy při vysoké teplotě, v tomto případě 900 °C vzniká mikrostruktura podobná keramice. RTG difrakční analýza prokázala, že pemza neprojevovala žádné významné změny při 900 °C. Největší změnou procházel popílek při teplotě 900 °C, kde vzniká galenitová fáze namísto portlanditu a C-S-H fáze. Významný rozdíl v pevnostech malt způsobil zejména též způsob chlazení, kdy chlazením vzorků vodou docházelo pravděpodobně k teplotním šokům a vzniku mikrotrhlin ve struktuře malty.

Požárně odolná malta, která byla vyvinuta s použitím pemzy, popílku a cementu se jeví jako vhodná varianta pro výrobu tvárnice či malty pro konstrukce vystavené vysokým teplotám. Malta se dá využít i jako alternativa tepelně izolačního materiálu díky své nízké tepelné vodivosti, která dosahuje hodnot cca $0,522 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Oproti běžně komerčně vyráběným maltám je tato hodnota přibližně třetinová.[8]

9.3 VÝZKUM V OBLASTI STŘÍKANÝCH POLYMERCEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ ZA POUŽITÍ PP VLÁKEN

Cílem výzkumu stříkaných polymercementových kompozitů odolných vůči vysokým teplotám bylo určit optimální směs vysokopevnostních polypropylenových vláken a polymercementového kompozitu pro docílení snížení rizika explozivního odprýskávání povrchových vrstev betonu v tunelech a podzemních betonových konstrukcích a především zvýšení požární odolnosti těchto konstrukcí.[9]

Graf 13 – *Předběžný experimentální plán* [9]





Obrázek 11-*Typický vzor porušení polymer-cementového kompozitu po zkoušce požární odolnosti [9]*

Závěry této studie jsou následující: Cílená pevnost v tlaku byla dosažena, a to v hodnotě 40 MPa. Polymer-cementový kompozit obsahující kamenivo perlit, který má malou tepelnou vodivost, zajišťuje pomalejší šíření tepla, polymerní vlákna mají za následek menší drolení. Konečné optimální složení směsi obsahovalo 10 % mikrosiliky, 30 % perlitu a 0,2 % polymerních vláken. Výsledkem výzkumu byla pevnost v tlaku, která přesáhla 40 MPa a pevnost v ohybu 5 MPa před zkouškou požární odolnosti.

Po zatížení vysokou teplotou, jejíž maximální hodnota činila 1200 °C, se objevily na vzorcích stopy drolení a mikrotrhliny, jež jsou patrné z obr. č. 11. Zmíněné trhliny jsou způsobeny překročením vnitřního tlaku ve vzorcích způsobeného vysokou teplotou, který překročil pevnost malty a betonu. Výskyt trhlin a drolení byl značně omezen zvýšením dávky polypropylenových vláken na 0,2 %. Po provedení testu tepelné odolnosti hmotnost vzorků poklesla na 86 – 88 % z původní hodnoty v důsledku rozpuštění vláken z polypropylenu a úniku vodní páry ze zkušebních těles. Zbytková pevnost v tlaku činila 31 – 32 % z původní hodnoty, pevnost v ohybu poklesla na 28 – 31 % původní pevnosti. Polypropylenové vlákno účinně zabránilo odlupování betonu, ale i přes tento významný benefit pevnost betonu se výrazně snížila. Pokles byl způsoben deformací kameniva vystaveného teplotě 1200 °C. Příčinou je již zmíněný rozklad $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Trhliny jsou způsobeny rozdílnou tepelnou roztažností kameniva a cementového tmele. Polypropylenová vlákna omezují vznik těchto trhlin, ale jejich výskyt přesto nedokážou zcela eliminovat. Shrnutím poznatků bylo konstatováno, že polymer-cementový kompozit měl vysokou pevnost v tlaku, v ohybu (40,5;1,6 MPa), jež jsou dostačující pro povrchové tlaky vyskytující se v silničních a železničních tunelech.[9]

9.4 POLYMER-CEMENTOVÉ KOMPOZITY S POUŽITÍM LEHKÉHO KAMENIVA A POLYPROPYLENOVÝMI VLÁKNY

Výzkum polymer-cementových kompozitů s lehkým kamenivem se zabývá vlivem množství polymerních vláken na vznik explozivního odprýskávání. Cílem studie je prokázání účinnosti polymerních vláken a stanovení jejich optimální dávky. Dalším bodem výzkumu je porovnání různých druhů lehkých kameniv. Byly použity 3 druhy kameniv. Byla testována pevnost v tlaku, pevnost v ohybu a tepelná vodivost.



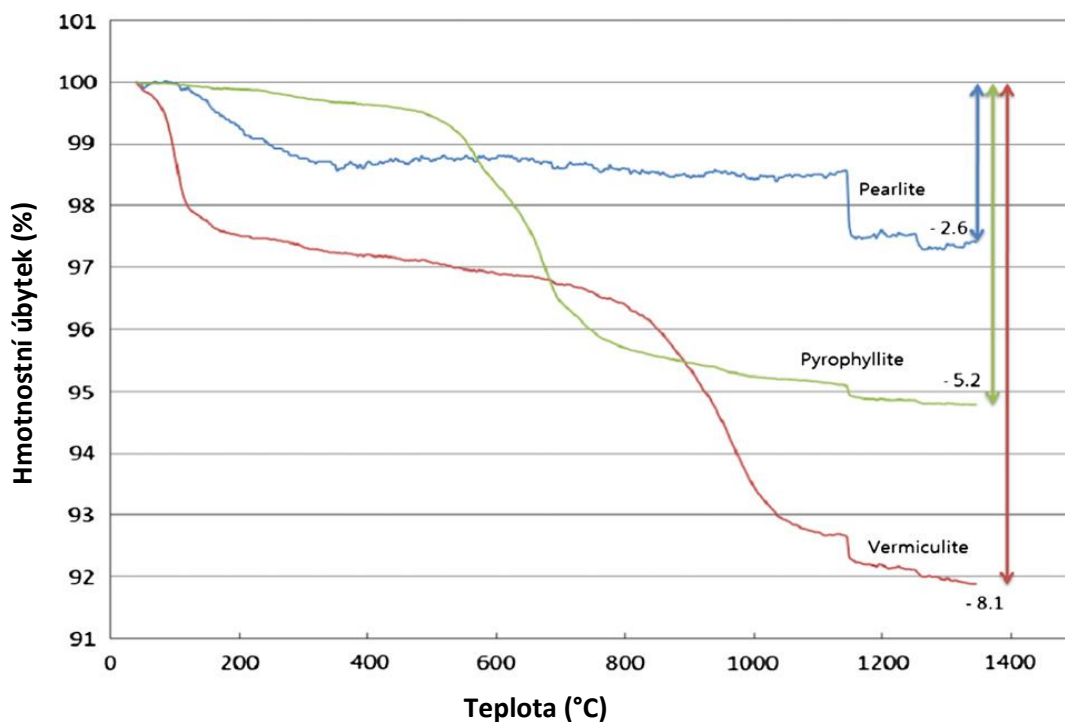
a)

b)

c)

Obrázek 12 – a) Perlit, b) Vermikulit, c) Pyrophyllit

Graf 14 – Termogravimetrická analýza polymer-cementového kompozitu s různými lehkými kamenivy [10]



Porovnáním provedených zkoušek se prokázalo, že optimálních výsledků bylo dosaženo u expandovaného perlitu, který vykazoval vysokou tepelnou stabilitu společně s dávkou polypropylenových vláken 0,2 %. Nejvyšší zatěžovací teplota byla nastavena na 1400 °C. Otázku nízké tepelné vodivosti splnil nejlépe taktéž expandovaný perlit. Vznik trhlin byl omezen vyhoříváním polypropylenových vláken, které vytvořily tenké kanálky, kterými mohla uniknout vodní pára a nedocházelo tak k explozivnímu odprýskávání. U pyrophillitu s nejvyšší tepelnou vodivostí docházelo k rozvoji trhlin v širším měřítku. Tento jev lze vysvětlit rychlým nárůstem vnitřní teploty zkušebních těles a porušením struktury náhlým teplotním šokem. Z provedeného výzkumu je patrné, že v určitých případech nestačí testovat pouze pevnosti a mineralogické složení, ale i tepelnou vodivost použitého kameniva.

9.5 SMĚS PODÍLŮ EKOLOGICKY ŠETRNÝCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU PROTIPOŽÁRNÍHO VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU

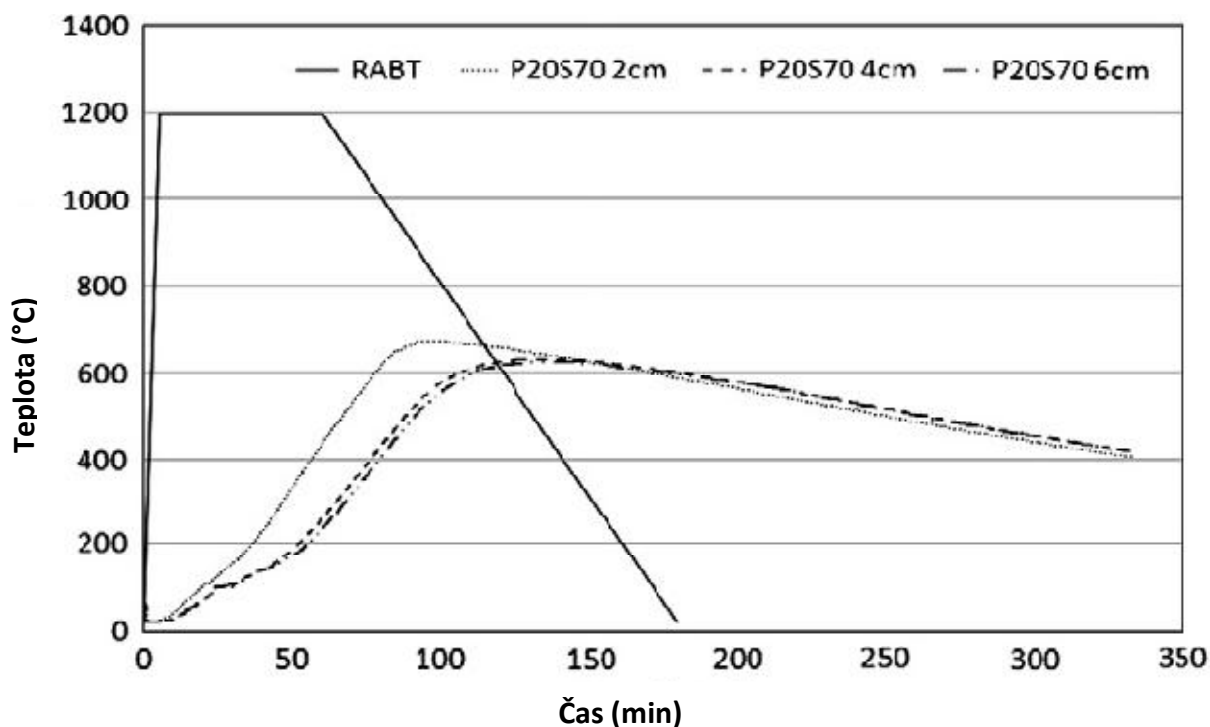
Výzkum v oblasti alternativních surovin pro výrobu požárně odolného betonu se zabývá vlivem směsi mleté granulované vysokopecní strusky a drceného keramického střepu. Cílem výzkumu bylo prokázat pozitivní vliv na životní prostředí, kdy by při výrobě takového betonu byly sníženy emise oxidu uhličitého CO₂ na minimum. V tomto případě se jedná o náhradu jistého podílu cementu. Druhým úkolem prováděného výzkumu je prokazatelnost požární odolnosti takto vyrobeného betonu.

Výsledkem výzkumu se stala směs s označením P20S70, což značí 20 % keramického střepu ve směsi a náhrada 70 % cementu mletou vysokopecní struskou. Snížení emisí CO₂ na jednu tunu cementu vychází na 36,4 %, což je nezanedbatelný výsledek, přinášející omezení úniku skleníkových plynů do atmosféry. Testováním požární odolnosti bylo dosaženo též vynikajících výsledků při teplotě 600 °C. Pro použití vysokopecní strusky je ale ovšem zapotřebí použít alkalického aktivátoru. Fyzikálně mechanické vlastnosti splnily taktéž kriteria požadovaná v cílech studie. Pevnost v tlaku po 28 dnech přesáhla 45 MPa, což byl jeden z požadavků cílů tohoto výzkumu.

Legenda ke grafu č. 14:

- **RABT křivka byla vybrána jako standard pro srovnání jednotlivých záměsí při tepelném namáhání**
- **2, 4, 6 cm jsou hloubky, ve kterých byla měřena vnitřní teplota od povrchu vystaveného účinkům uměle vyvolaného požáru**

Graf 15 – Sledování vnitřní teploty [11]



9.6 ŽÁRUVZDORNÝ BETON (BEZPEČNOST PŘI UŽÍVÁNÍ TUNELŮ)

Výzkum žáruvzdorného betonu se zabývá bezpečností tunelů se zohledněním materiálové základny. Požární ochrana je jednou z položek, která chrání uživatele tunelu. Degradace betonových konstrukcí a výztuže může vyvolat nestabilitu. Pro vývoj správné betonové směsi bylo potřeba prostudovat odbornou literaturu, navrhnout zkušební směs, provést zkoušky čerstvého betonu, zkoušky ztvrdlého betonu. Vzorky byly testovány a porovnávány s požární křivkou RWS. Na základě výzkumu byla vypracována dokumentace pro dávkování primárních složek a ošetřování betonu na staveništi.

Výsledkem výzkumu je konstatování, že je možné navrhnout pro podzemní stavby, zejména pak tunely tzv. obětovanou vrstvu betonu. Pasivní požární ochrana betonové konstrukce je mnohem účinnější. Je méně citlivá na účinky mechanického poškození a poškození vlivem mrazu či vysokých teplot. Polypropylenová vlákna propůjčují betonu vyšší houževnatost při mrazech a zároveň jsou schopna vyhořet při vysokých teplotách a zabránit explozivnímu odprýskávání betonu. Aby bylo možné vypočítat vliv smrštění betonu, bylo nutné provést další zkoušky v průběhu požárních testů. Dále byly zjišťovány i moduly pružnosti betonu ve stáří 28 dní.[12]



Obrázek 13 – Fotografie vláknobetonu. Byly použity různé super-plastifikátory. Některé z nich zvýšily obsah vzduchu až na 3,6 %. Při použití jiných typů plastifikátorů činil obsah vzduchu na 1,5 až 2%. [12]

9.7 VÝZKUM V OBLASTI POŽÁRNĚ ODOLNÝCH GEOPOLYMERNÍCH KOMPOZITŮ

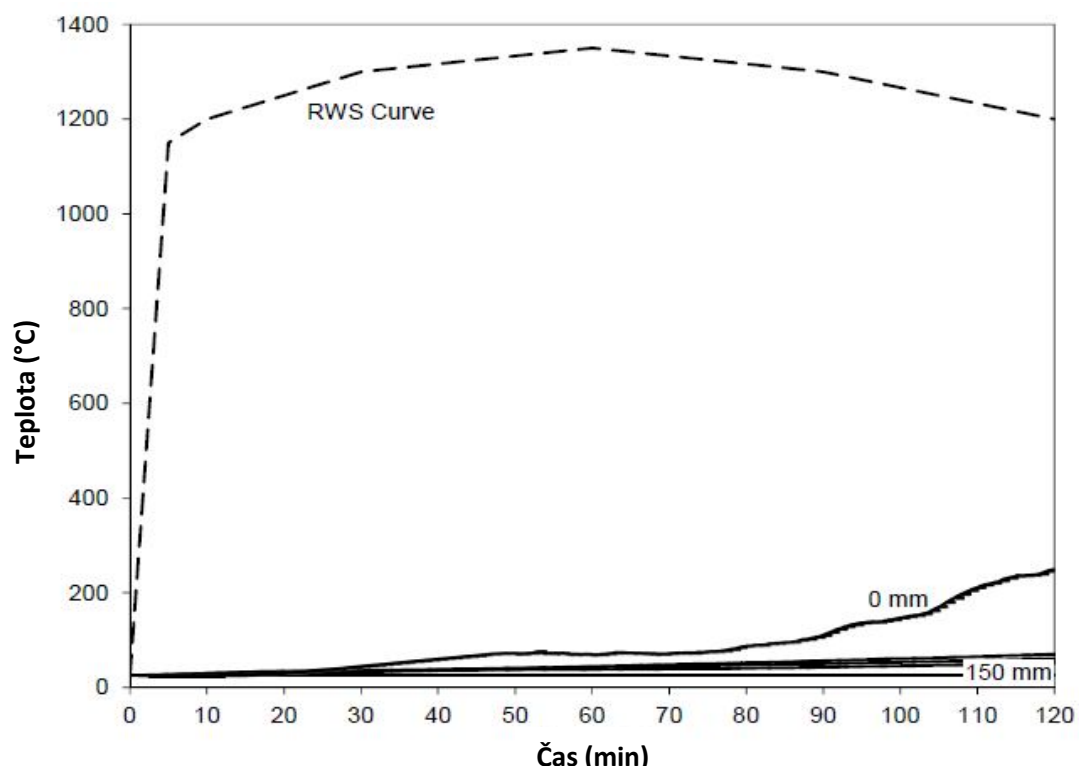
Cílem výzkumu požárně odolných geopolymerních kompozitů bylo vyvinout materiál s vysokou požární odolností a přitom zachování minimálních nákladů na výrobu. Jedním z možných řešení se jeví použití geopolymérů, které mají výborné vlastnosti. Geopolymery jsou nehořlavé a kombinují vynikající fyzikální, chemické, mechanické, tepelné vlastnosti s velmi nízkými výrobními náklady a velkým přínosem pro životní prostředí. V tomto článku jsou uvedeny výsledky výzkumu, kde je materiál vystaven požáru, který je uměle simulován a odpovídá situaci, která může nastat v tunelu. Jako příměs je použita vysokopecní struska z řeckého hutního závodu Larco GMMSA.

Experimenty v malém měřítku prokázaly, že FeNi struska na bázi anorganických polymerů vykazuje minimální tepelnou vodivost 0,135 W/mK měřeno při 300 K. Také anorganický polymer – geopolymer prokázal dobré fyzikálně mechanické vlastnosti. Jako pasivní požární ochrana se využití kopolymerů jeví jako reálná možnost. Využití v praxi bude třeba ověřit ještě navazujícím výzkumem a souborem zkoušek. [6]



Obrázek 14 – Zatěžování prvku v peci [6]

Graf 16 – Teplotní křivky zaznamenané během zkoušky v malém měřítku [6]



B) EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Výběrem surovin pro výrobu správkových malt s odolností vůči vysokým teplotám lze zvýšit odolnost, a dobu, po kterou bude konstrukce schopna vzdorovat požáru. Mezi základní složky takových malt patří především kamenivo, které je procentuálně nejvíce zastoupenou složkou. Volba kameniva by je jedním z rozhodujících faktorů při návrhu sanačních malt, vystavených vysokým teplotám zejména z důvodu modifikačních přeměn křemene. Kamenivo by nemělo obsahovat SiO_2 v krystalické podobě, aby nedocházelo k náhlým objemovým změnám a předčasné destrukci konstrukce. Složka, která přispívá k negativním účinkům požáru, je především voda v podobě vlhkosti obsažená ve správkové maltě. Voda se mění při 100 °C na vodní páru, čímž se zvětšuje i tlak této páry, který se přenáší na maltu. Ve velké míře záleží na struktuře správkové malty. Pokud je mikrostruktura malty otevřená, může vodní pára unikat a sníží se tlak této páry. Prvky, jež hrají při návrhu receptury důležitou roli, jsou také polymerní vlákna. Tato vlákna při požáru vyhořívají a vytváří tak cestu pro únik požárních zplodin, vodní páry a jsou schopna zabránit explozivnímu odprýskávání sanační malty. Této výhodné vlastnosti se již řadu let využívá i pro betony, kde vlákna jen nepatrně zvyšují pevnost v tahu malt a betonu.

Pro zajištění fyzikálně mechanických vlastností malty je třeba tedy provést vhodný návrh receptury, což znamená vhodnou volbu křivky zrnitosti, polymerních vláken, polymerní přísady, cementu samotného a především též vhodnou úpravou vodního součinitele k zachování potřebné konzistence, zpracovatelnosti a zamezení nadměrného vzniku kapilár, které snižují mechanické pevnosti betonů a malt. Experimentální část byla z hlediska řešení rozdělena do několika etap, týkajících se vývoje správkové malty odolné vůči vysokým teplotám.

10 METODIKA PRÁCE

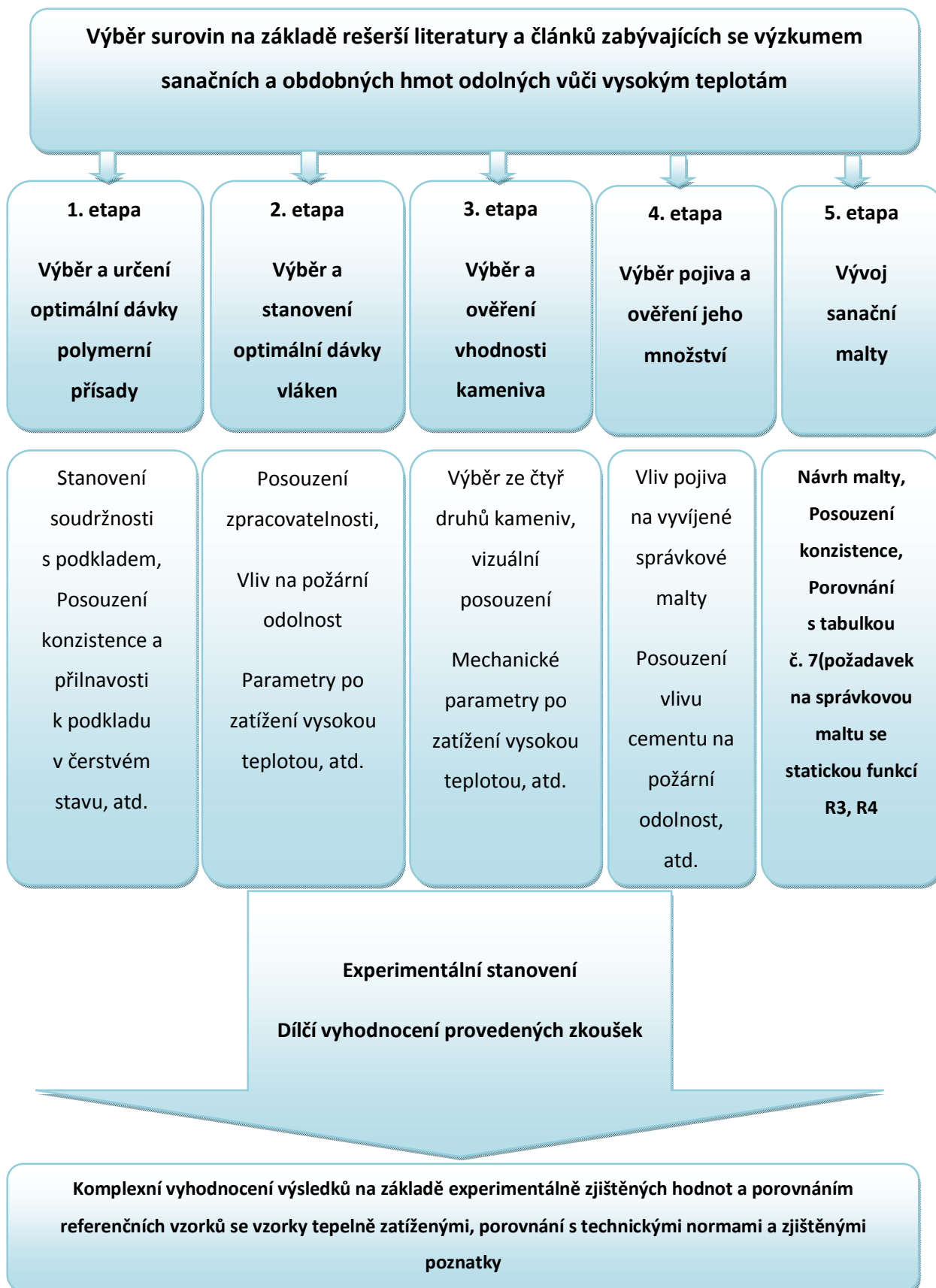
První etapa je věnována výběru optimální dávky polymerní přísady a jejímu vlivu na přídržnost čerstvé i ztvrdlé malty. Jedná se především o soudržnost malty s podkladem. Zkušební tělesa zhotovená z této malty nebyla vystavena vysokým teplotám. Předmětem zkoušení je především stanovení zpracovatelnosti malty, pevností v tahu ohybem, v tlaku. Hlavním požadavkem pro stanovení optimální dávky je přilnavost k nanášenému povrchu a soudržnost již ztvrdlé malty.

Druhá etapa je zaměřena na stanovení optimální dávky polyolefinových vláken. V tomto dílčím celku práce je zjišťována konzistence a zpracovatelnost malty. Zjišťována je zde také doba míchání celé směsi s vlákny. Zkoušen je především vliv na odolnost malty vůči vysokým teplotám. Zkušební tělesa byla vystavena teplotám v rozmezí 20 až 500 °C. Maximální teplota 500 °C byla zvolena z důvodu vyloučení vlivu modifikačních přeměn křemene a následným objemovým změnám a porušení struktury na rozhraní kameniva a cementového tmele. Zkoušen je především vliv dávky vláken a jejich příspěvek k vyšší odolnosti malty vůči vysokým teplotám ke zvýšení požární odolnosti. Vláknem při vyhoření vytváří únikové cesty v podobě kapilárních pórů a snižují tlak vodní páry způsobující explozivní odprýskávání.

3. etapa účelně vyhodnocuje vhodnost kameniva s ohledem na mineralogický původ, chování při vysokých teplotách a jeho pořizovacích nákladech. Pro účely práce byly vybrány čtyři druhy kameniva a stanoveny. Receptury obsahující kamenivo byly vystaveny teplotě až 1000 °C a posuzován vizuálně i pomocí fyzikálně mechanických zkoušek stav zkušebních vzorků a jejich vlastnosti. K nedestruktivnímu ověření vlivu kameniva byla použita ultrazvuková zkouška dynamických modulů pružnosti.

Čtvrtá etapa souvisí s vhodným výběrem cementu a vliv dávky tohoto hydraulického pojiva na výsledné parametry správkových malt. Pro receptury byly použity dvě rozdílné dávky cementu. V této fázi byly zohledněny poznatky z rešerší literatury a informačních zdrojů pro výběr vhodného pojiva.

V páté etapě výběru konkrétních surovin včetně stanovení jejich optimální dávky a návrhu receptur správkových hmot následovala příprava zkušebních těles, na nichž byly provedeny testy základních parametrů vybraných z tabulky č. 7, kdy zkušební tělesa byla exponována v prostředí až 1000 °C. Pro zajištění vysokých užitných parametrů byly receptury správkové malty modifikovány mikrosilikou pro dosažení parametrů správkové malty se statickou funkcí třídy R3 a vyšší.



Obrázek 15 - Schematické znázornění postupu řešení DP

11 SUROVINY

11.1 POLYMERNÍ MODIFIKÁTORY

Polymerní modifikátory slouží k úpravě konečných vlastností malt. Dalším možným využitím je i aplikace v adhezním můstku, který slouží ke zlepšení soudržnosti správkové malty s podkladním materiálem. Vyrábí se zpravidla cementové suspenze s daným polymerem. Dávkování do malt je doporučeno v rozmezí 3 až 5 % z hmotnosti cementu. Polymerní přísada vykazuje příznivý vliv zejména na přilnavost čerstvé směsi k podkladu a má též příznivý vliv na zpracovatelnost a dobu míchání celé směsi. [35]

Polyvinylacetát PVAc nejčastěji vzniká emulzní polymerací z vynilacetyleny, který je rozpustný ve vodě. Jedná se o čirý, bezbarvý a dosti křehký polymer. Výroba může probíhat všemi druhy polymerací a kopolymerací. Významnými vlastnostmi jsou vysoká stálost na světle a vysoká adheze. S ohledem na dostupnost a cenu byla zvolena polymerní přísada Vinnapas.

11.2 POLYOLEFINOVÁ VLÁKNA

Každé polymerní vlákno má přesně specifikované vlastnosti a od tohoto je odvozena i jeho účinnost ve výsledném kompozitu, jako je malta. Vlákná po kvalitním rozmísení vytvoří v betonové směsi třídimenzionální strukturu. Tato struktura je potom základem pevnostních charakteristik vláknobetonu. Na trhu se nabízí několik typů polymerních vláken. Jejich základní dělení je na monofilamentní vlákna tj. vlákno vyráběná jednotlivě a následně dělená na požadovanou délku s hladkým kruhovým průřezem, a na fibrilované (rozvlákněné) vlákno, tj. vlákno vyráběné z folie a též následně dělené na požadovanou délku s hranatým průřezem a drsnějším povrchem.

V žádném případě fibrilace neznamena nějaké zvláštní zdrsňení či jinou úpravu vlákna na povrchu. Jediná povrchová úprava polymerních vláken je způsobena lubrikací, která zaručí při styku s vlhkostí nebo vodou dokonalé rozdělení jednotlivých pastilek. Polymerní vlákna se používají do betonu, potěrů a malt z důvodu omezení poruch těchto materiálů. Obvyklá dávka je 0,8-1,1 kg·m⁻³ betonu. Především se jedná o zamezení vzniku trhlin od plastického smršťování a sedání. Přidáním vláken do betonové směsi vytvoříme z betonu či malty celkově houževnatější a spolehlivější materiál. Polypropylenová vlákna zvyšují adhezi čerstvého betonu, čímž se zlepšuje jeho modul pružnosti. [5]

FibroforHigh Grade

Zkoušení polyolefinových vláken proběhlo dle požadavků INFRAM a.s. Jedná se o inovované, svazkovité, fibrilované vysoko pevnostní vlákno využívané jako prostorová betonová výztuž či výztuž do malt. Důkladně zdrsňený povrch zajišťuje efektivně kotvení v maltě. High Grade je též využíván v projektování požár nešířících zón na vysoce ohnivzdorných betonových staveb. Pro ohnivzdorný beton či maltu je doporučeno dávkování do $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [15]

Polyolefinová vlákna při vyhořívání vytváří systém kapilárních pórů, které umožňují únik vodní páry z malty vystavené extrémním teplotám. Rozpínající se vodní pára způsobuje vnitřní pnutí ve struktuře malty, a pokud není umožněno snížení tohoto tlaku, dochází k odprýskávání povrchových vrstev malty či betonu a obnažení ocelové výztuže. Příznivých vlastností vláken je možné dosáhnout správným dávkováním. Při použití nadměrné dávky dochází ke snížení pevností v tlaku a zhoršuje se i zpracovatelnost směsi, což lze do jisté míry ovlivnit vhodnou plastifikační přísadou. Použití plastifikační přísady ovšem zvyšuje náklady na výrobu malty.

11.3 KAMENIVO

S ohledem na zjištěné teoretické poznatky a výsledky vybraných zejména zahraničních výzkumných prací byly vybrány základní čtyři typy kameniv s rozdílným mineralogickým složením. Toto složení je podstatné především z hlediska objemových změn při teplotním namáhání, kdy dochází k rozdílným dilatacím kameniva a plniva. Malty s kamenivem z vápencových šterků, čediče, škváry a pemzy vykazují malé objemové změny, zatímco u křemene při teplotách kolem $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ resp. $573 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází k modifikačním a objemovým změnám a k trvalému protažení po ochlazení dosahujícímu $3,5 \%$. Pórovité kamenivo z pemzy a škváry vyhovuje i při teplotách kolem $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Malty s vápenitým kamenivem vykazují výrazný úbytek objemové hmotnosti v oblasti $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, způsobený tepelným rozkladem vápencových složek. Rozdílnost tepelných deformací cementového tmelu a kameniva vyvolává vznik lokálních napětí ve vzájemných dotykových plochách kameniva a cementového tmelu, která narušuje soudržnost složek malty nejen při požáru, ale i po vychladnutí. [43]

Křemičité sloučeniny obsahují i čedič a amfibolit, ale nemusí se přímo jednat o křemen, který podléhá značným objemovým změnám při zatížení extrémními teplotami. [44]

Živcový písek

Jedná se živcové kamenivo, které vzniká zvětráváním granitoidních hornin s vysokým obsahem živců, které se koncentrují především v aluviálních uloženinách. U nás k tomuto typu patří ložisko Halámky a Bratčice (jihozápadně od Brna, kde jde o živcové štěrkopísky syrovicko-iváňské terasy Jihlavy a Svatky). Jsou tvořeny přibližně ze 70-90 % křemenem. Kameniva s vysokým obsahem krystalického křemene způsobují při zatěžování vysokou teplotu velké objemové změny kolem teploty 600 °C. Cena tohoto kameniva se pohybuje kolem 170 Kč/t. [30]

Čedič

Vlastnosti čediče zdaleka převyšují požadavky na kamenivo do malt (pevnost v tlaku se pohybuje v rozmezí 250-400 MPa). Své využití nachází zejména pro železniční a dopravní stavby.[36] Objemová hmotnost čediče se pohybuje v rozmezí 2050 – 3000 kg·m⁻³. Nasákavost je velmi nízká v rozmezí 0,1-0,3 %.[30] Čedič patří do kategorie vyvřelých hornin, které dosahují vysokých pevností a z hlediska vystavení vysokým teplotám již při jeho vzniku magmatickou činností je předpoklad jeho vysoké odolnosti vůči vysokým teplotám. Minerální strukturu tvoří převážně labradorit (světlý minerál), augit (tmavý minerál).

Jednou z nevýhodných vlastností tohoto kameniva je jeho vyšší pořizovací cena oproti častěji používaným kamenivům do malt a betonů. Cena čediče se pohybuje kolem 250 Kč/t.

Amfibolit

Amfibolity jsou jemnozrnné černé až šedé horniny. Jedná se o přírodní hutné kamenivo pro stavební účely, drobné a hrubé drcené kamenivo. Hornina je odolná proti alkalicko-křemičité reakci. Amfibolit patří do skupiny metamorfovaných hornin. Malé množství amfibolu může obsahovat také čedič, což je kamenivo, které vykazuje velké pevnosti v tlaku [37]

Objemová hmotnost amfibolitu se nachází v rozmezí 2700-3100 kg·m⁻³. Pevnost v tlaku amfibolitu je 170-280 MPa. Nasákavost je velmi podobná čediči v rozmezí 0,1-0,4 %.

[4]

Pořizovací náklady amfibolitu dle ceníku lomu v Želešicích činí přibližně 140 Kč/t.

Kamenivo popílkový agloporit

Jedná se o uměle vyráběné kamenivo. Jako agloporit označujeme skupinu pórovitých kameniv vyráběných slinováním krátkodobým výpalem prováděným zpravidla na aglomeračních roštech. Jako suroviny se používají především různé druhotné suroviny či vedlejší energetické produkty z energetického, hutního i jiného průmyslu, které mohou být i dosti rozdílného fyzikálního a chemického složení a jejichž odstraňování ze závodů bývá jinak nákladné.

V ČR se pod názvem agloporit rozumí agloporit popílkový, což je umělé pórovité kamenivo získané sbalkováním létavých popílků vznikajících spalováním domácích černých a hnědých uhlí a spékáním syrových sbalků na aglomeračním roštu.

Agloporit používaný pro účely této práce je vyroben samovýpalem z vysokoteplotního popílku z el. Ledvice. Složky popílku jsou podstatné z hlediska tepelného namáhání. Popílek je složen z 39,3 % mullit, amorfní fáze 39 %, a krystalického SiO_2 krystalický 7 %. Nízký podíl SiO_2 v krystalické fázi předurčuje zmíněné kamenivo k použití jako kameniva pro vývoj správkové malty, z důvodu k minimálním objemovým změnám, ke kterým dochází vlivem modifikační přeměny v krystalické fázi křemene. Za pozitivní vlastnost agloporitu lze považovat též nízkou objemovou hmotnost a tudíž snadnější manipulaci s kamenivem. Před vlastním použitím agloporitu je potřebné toto kamenivo nechat nasáknout vodou, jelikož při nedodržení tohoto postupu dochází k odebírání vody potřebné k hydrataci cementu.

11.4 CEMENT

Pro tuto práci byl vybrán CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R. Důvodem je pozvolnější vývin hydratačního tepla, což je spojeno s nižším vývinem smršťovacích trhlin. Trhliny jsou nebezpečné v důsledku pronikání vlhkosti hlouběji do struktury malty či betonu. Tento cement obsahuje 65 – 79 % portlandského slínku, což je hlavní složka. Jako vedlejší složka je zde vysokopecní struska a vápenec 21-35 %. Vápenec, který je v cementu obsažen, přispívá k nižším objemovým změnám při vyšších teplotách, což splňuje nejdůležitější požadavek pro použití k výrobě správkové malty, která by měla být odolná vůči vysokým teplotám. Benefit, který tento typ cementu přináší je i nižší cena než u CEM I 42,5 R, a tím i snížení nákladů na výrobu správkové hmoty. Při použití již zmíněného směsného cementu je značně sníženo riziko pozdějších výkvětů.

Mezi další výčet výhodných vlastností lze řadit jeho odolnost vůči agresivnímu prostředí, za normálních podmínek dlouhá zpracovatelnost betonu, velice malá objemová roztažnost, stálost mechanických, fyzikálních a chemických vlastností.

U portlandských cementů dochází vypuzováním vody, které značně roste při teplotách 500 °C, při vyšších teplotách probíhá dehydratace hydroxidu vápenatého na oxid vápenatý. Velikost smršťování je trvalého charakteru (velikost objemového smrštění dosahuje až 0,5 % a způsobuje na povrchu malty trhlinky. Pokud dojde k ochlazení, může nastat nová hydratace oxidu vápenatého provázená růstem objemu. Z toho hlediska se lépe uplatňují malty s cementem obsahujícím i strusku. Cena tohoto cementu se pohybuje kolem 2800 Kč/t. [42]

11.5 VODA

Záměsová voda byla použita z vodovodního řádu. Byla použita v souladu s požadavky ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu-specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně jako záměsové vody do betonu.

11.6 PŘÍMĚSI

Vzhledem k vytyčeným cílům diplomové práce, tj. vývoj požárně odolné sanační malty min. třídy R3 bylo třeba pro dosažení požadovaných parametrů modifikovat složení vyvíjených hmot i příměsemi zlepšujícími parametry jako je zvýšení počáteční pevnosti, zvýšení konečné pevnosti správkové malty. Pozitivní vliv má také na snížení náchylnosti k odlučování vody a rozměšování. Obsahuje 93 % amorfního oxidu křemičitého. Obsah tohoto oxidu nepřispívá k modifikační přeměně SiO_2 . Cena se pohybuje v rozmezí 10000 – 20000 Kč. Z hlediska vysokých pořizovacích nákladů této příměsi byla zvolena dávka v maximálním množství 10 % z hmotnosti cementu ke kompenzaci v případě snížení pevností v tlaku zkušebních těles vyrobených s použitím popílkového agloporitu.

Dalšími výhodnými vlastnostmi jsou omezení vnikání chloridových iontů do struktury hmoty a snížení roztažnosti při alkalicko-křemičité reakci. Doporučené dávkování je 5 – 15 % z hmotnosti cementu. [2]

12 MALTY

12.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Příprava zkušebních těles probíhala v závislosti na typu a požadovaných parametrech pro danou recepturu.

Vliv polymerní přísady

Receptury byly navrženy s požadavkem na určení optimální dávky polymerní přísady. Pro stanovení dávky přísady byla použita normová receptura používaná pro zkoušení cementu. V druhé etapě byla dávkována polymerní přísada v množstvích 1 %; 2 %; 3 %; 4 % a 5 %. Zkušební tělesa byla hutněna pomocí vibračního stolu k dosažení celistvých zkušebních těles bez vnitřních kavern ve struktuře, které by negativně mohly ovlivnit zkoušku dynamických modulů pružnosti v důsledku odklonění impulsu a ovlivnění času průchodu tohoto impulsu. Sledována byla konzistence z hlediska přilnavosti k podkladu, zpracovatelnosti malty a doby míchání. Doba míchání se pohybovala kolem tří minut. Malta dosahovala při dávkách od 3 % z hmotnosti cementu ideální „lepivé“ konzistence, kdy ulpívala na zednické lžíci a dobré přilnavosti k předem navlhčenému betonovému podkladu v podobě dlažebního prvku, na který byla nanášena ve stejnoměrné tloušťce. Poté byla stanovena objemová hmotnost čerstvé malty a zkušební tělesa uložena k zrání pro pozdější stanovení soudržnosti s podkladem a stanovení dalších vybraných vlastností této malty.

Vliv dávky polyolefinových vláken

Zkušební tělesa zhotovená za účelem stanovení optimální dávky vláken byla navržena za použití normové receptury pro cement. Jednotlivé složky směsi byly nejprve smíchány za suchého stavu. Takto zvoleným postupem bylo dosaženo rovnoměrnější distribuce vláken v záměsi. Voda je dávkována až po cca 3 minuty trvajícím mícháním suchých složek. Přidáním vody k suché směsi bylo dosaženo různých konzistencí v závislosti na dávce polyolefinových vláken. Vláknina byla dávkována v množstvích 1,5; 3; a 5 kg·m⁻³. U dávky vláken s rostoucím množstvím k 5 kg·m⁻³ se nepatrně zhoršila zpracovatelnost čerstvé směsi při zkoušce rozlitím, kdy bylo u dávky 5 kg·m⁻³ stanoveno na 140 mm, což odpovídá plastické maltě podle tabulky č. 16 plastické maltě. Doba míchání se zvyšovala v závislosti na množství vláken. Časový interval míchání směsi se pohyboval kolem pěti minut. Zhutnění zkušebních těles proběhlo na vibračním stole. Zkušební tělesa byla vystavena ve ztvrdlém stavu zatížení teplotami 200, 300, 400 a 500 °C. Maximální teplota 500 °C byla použita s ohledem na vyloučení vlivu kameniva na parametry malt po zatížení vyššími teplotami. Účelem bylo stanovit pouze vliv dávky vláken.

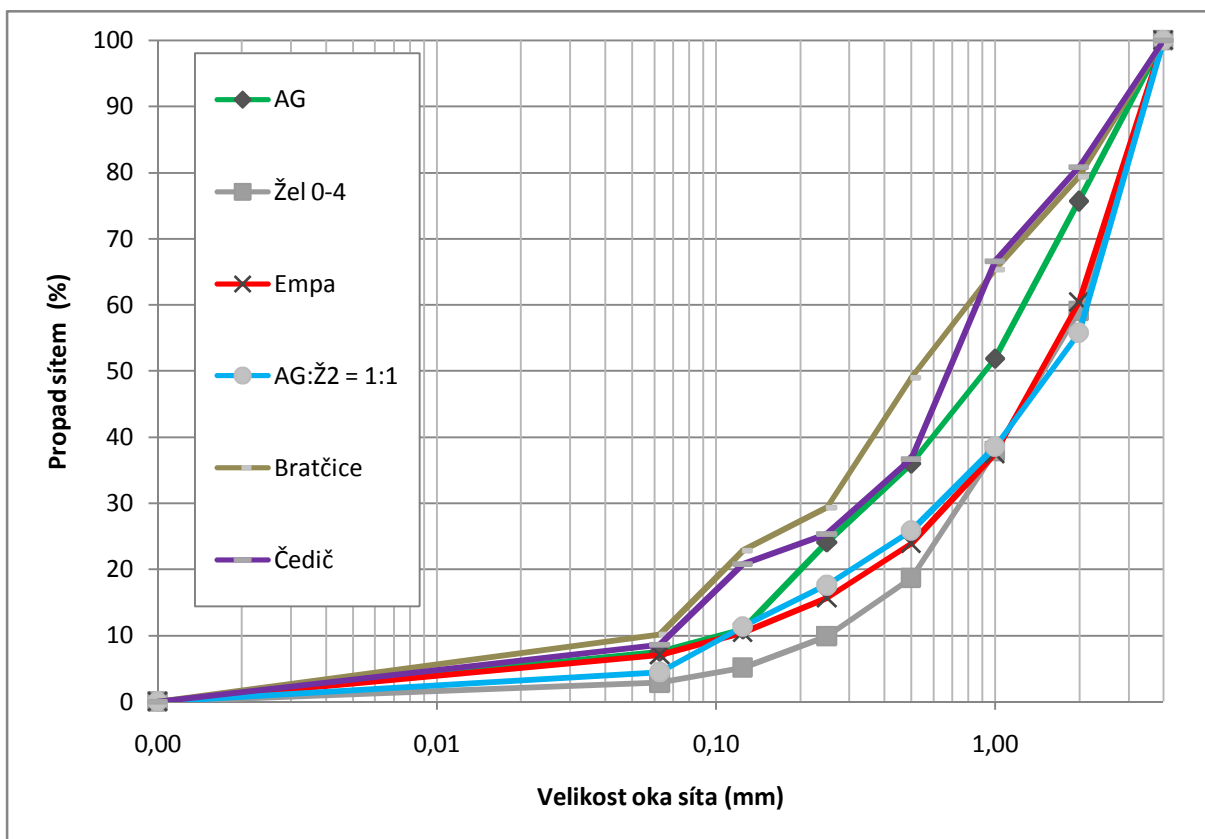
Tabulka 16 – Hodnoty rozlití (ČSN EN 1015-3)

Konzistence při použití	Hodnota rozlití (mm)	Postup plnění měřicí nádoby
Hustá malta	< 140	Vibrační metoda
Plastická malta	140 - 200	Vibrační nebo rázová metoda
Řídká malta	> 200	Plnicí metoda

Vliv použitého druhu kameniva

U kameniva se stanovily síťovým rozbořem křivky zrnitosti pro jednotlivé druhy kameniv a mísení jejich poměrů k dosažení optimální křivky zrnitosti s minimálním počtem mezer a vyšší hutnosti navrhovaných malt. Křivka EMPA v tomto případě znázorňuje modelovou křivku, ke kterým se mají přibližovat i křivky zkoušených kameniv. Při zkoušení jednotlivých kameniv je prokázáno, že každé z jednotlivých druhů má rozdílný podíl jemných částic. Při vysokém podílu hrubých částic se vyrobená malta více „sypala“ a snížila se její přilnavost k povrchu betonové dlaždice.

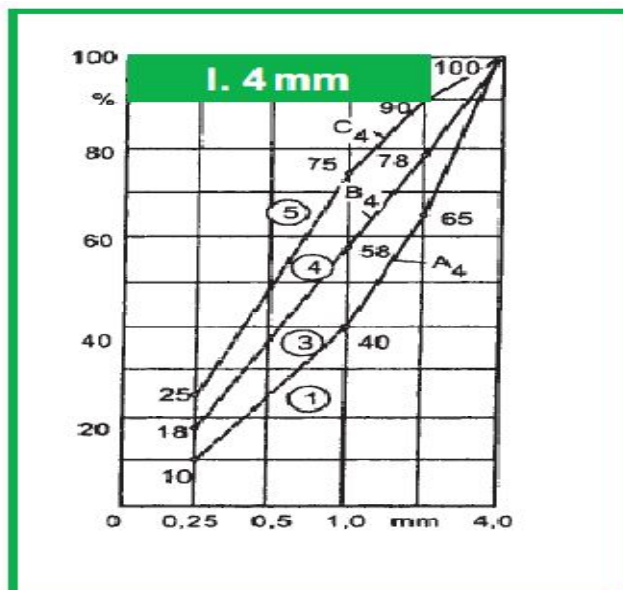
Graf 17- Vyhodnocení síťových rozborů dle normy ČSN EN 933-1 jednotlivých kameniv a porovnání s ideální křivkou EMPA



křivka EMPA

Představuje ideální křivku s plynulou zrnitostí kameniva, při které by mělo být dosaženo maximální hutnosti betonu či malty. Popsané situace ovšem nelze v praxi dosáhnout, lze se k ideální křivce pouze přiblížit. Pro stanovení ideální křivky zrnitosti lze použít i jiných metod, jako např. Fuller, Bolomey.

Graf 18 – Ideální křivka zrnitosti kameniva pro $D_{max}4mm$ [36]



Graf č. 18 je rozdělen do pěti oblastí, které vyjadřují vhodnost kameniva pro beton. Oblast 1 a 5 jsou nevhodné zrnitosti, oblast 3 vyjadřuje dobrou zrnitost, oblast 4 vymezuje ještě použitelnou zrnitost pro maximální zrno kameniva.

Pro výpočet návrhu jednotlivých receptur je stanovena i sypná hmotnost kameniva. V závislosti na rozdílné sypné hmotnosti bylo nutné tuto zohlednit ve výpočtu složení receptur a možnosti mísení kameniv v různém poměru pro dosažení optimální křivky zrnitosti dle grafu č. 17.

Tabulka 17 – Stanovení sypné hmotnosti

Kamenivo	ρ_b [kg·m ⁻³]	Objem nádoby [dm ³]
Amfibolit (Želešice)	2250	5
Písek (Bratčice)	1750	
Čedič	2350	
Popílkový agloporit	1600	

Vliv kameniva byl zkoušen na čtyřech recepturách, u kterých je použita normová receptura malty pro zkoušení cementů za použití rozdílných druhů kameniva. Vodní součinitel byl volen v závislosti na konzistenci výsledné malty. Doba míchání činila cca 2 minuty. Vodní součinitel se pohybuje přibližně kolem hodnoty 0,4. Při hodnotě $w = 0,4$ je dosaženo plastické konzistence malty. Zkušební tělesa byla zhutněna na vibračním stole. Vyrobeny byly sady těles pro zkoušení odolnosti vůči vysokým teplotám. Zatěžovací teplota byla nastavena v rozsahu 200, 400, 600, 800 a 1000 °C. Teplotní zatěžování je popsáno v dílím celku této práce „Zatížení zkušebních těles vysokou teplotou“. Vliv použité křivky zrnitosti na konečnou podobu malty byl vizuálně hodnocen nanesením malty na vhodný podklad v podobě betonové dlaždice. Porovnáním nanesených malt bylo zjištěno, že poměr jemného podílu a hrubého kameniva byl dostačující a neprojevovala se vyšší mezerovitost kameniva v maltě z důvodu nízkého podílu jemných částic.

Vliv dávky cementu

Při stanovení dávky cementu bylo použito kamenivo Amfibolit frakce 0-4. V první fázi byly nadávkovány suché složky malty a následně zamíchány. Doba míchání činila průměrně 2 minuty pro homogenizaci celé směsi a dokonalému rozmísení vláken. Následně byla směs míchána asi 5 minut pro dokonalou homogenizaci všech složek. Voda byla dávkována s ohledem na konzistenci, kdy bylo při vodním součiniteli 0,42 u obou dávek cementu dosaženo plastické konzistence. Receptura byla navržena v objemu o 30 % vyšším, aby bylo možné nanést i tenkou vrstvu pro stanovení soudržnosti s podkladem. Vrstva o tloušťce přibližně 20 mm nanášena na betonovou dlaždici snadno přilnula. Pouze u dávky kamenivo: cement (4:1) se projevila hrubější struktura kameniva v důsledku nižšího množství jemného podílu. Dávka polymerní přísady byla stanovena na 3 % z hmotnosti cementu v návaznosti na výsledky stanovení optimální dávky polymerní přísady. Pro úpravu konečných pevností a vyplnění pórů mikrostruktury malty bylo použito i mikrosiliky v dávce 3 % z hmotnosti cementu. Zkušební tělesa byla zatěžována ve ztvrdlém stavu teplotami 200, 400, 600, 800 a 1000 °C.

Vývoj správkové malty s odolností vůči vysokým teplotám

Návrh receptury se opírá o předchozí stanovení, kdy již byla zvolena vhodná kameniva, dávka polymerní přísady a dávka vláken pro návrh správkové malty. První sada zkušebních těles byla namíchána z vhodného poměru frakcí popílkového agloporitu a dávkováním složek dle výsledků zkoušek předešlých receptur.

Před mícháním receptury bylo nutné nejprve nechat popílkový agloporit nasáknout vodou, aby bylo možné stanovit přesněji vodní součinitel. Při dávkování vody bylo postupováno opatrně pro zachování plastické konzistence malty. Rozlití malty činilo 160 mm, což této konzistenci nejlépe odpovídá. Dávkování složek bylo provedeno nejprve v pořadí agloporit, cement, polymerní přísada, silika, vlákna. Směs byla následně homogenizována. Doba míchání byla 3 minuty u suché směsi a následně 5 minut po přidání vody. Hutnění probíhalo na vibračním stole. Zbylá malta byla nanášena na podkladní betonovou dlaždici ve vrstvě cca 20 mm. Malta se dobře „natahovala“ zednickou lžící na nanášený povrch.

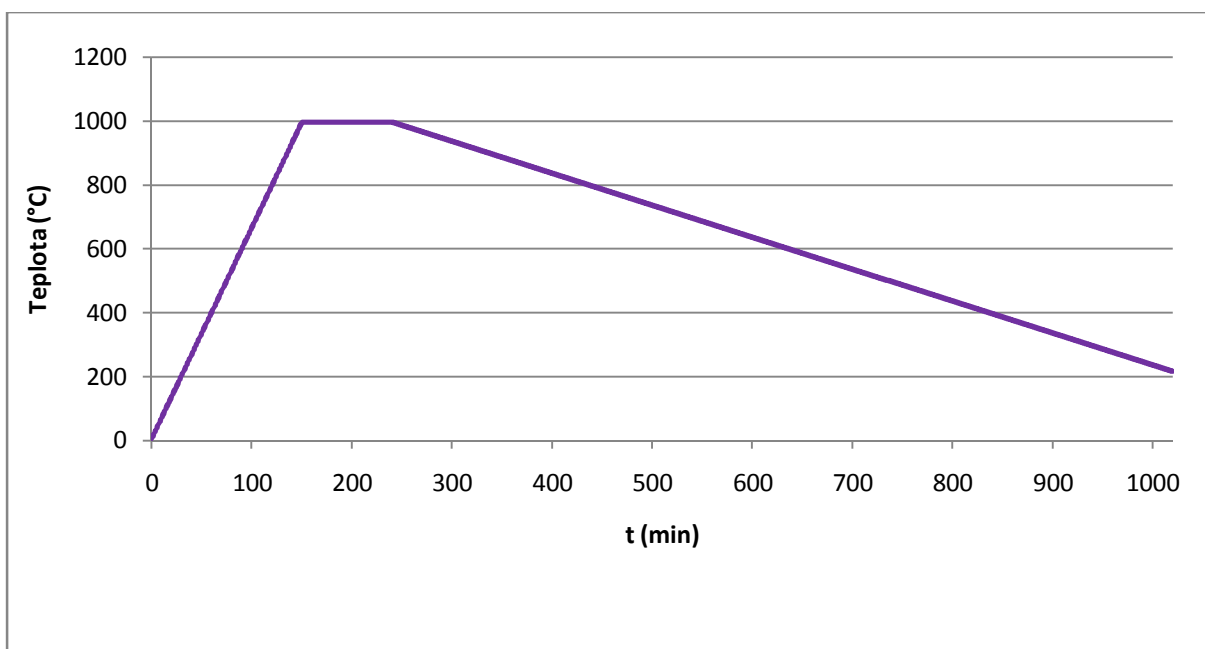
Návrh druhé receptury správkové malty s optimálním složením všech komponent byl modifikován poměrem mísení dvou kameniv vhodných pro návrh správkové malty odolné vůči vysokým teplotám. Zvolen byl poměr kameniva amfibolitu frakce 2-4 mm a různého mísení poměrů agloporitu frakce 0-1mm a 1-2 mm. Pro receptury s obsahem amfibolitu byla snížena dávka siliky na 3 a 5 % z hmotnosti cementu z důvodu použití kameniva s vyššími pevnostmi v tlaku a ohybu. Vodní součinitel byl upraven v závislosti na obsahu vody v pórovitém kamenivu (agloporit). Výsledná konzistence byla stejná jako u receptury předchozí. Po zhutnění vzorků na vibračním stole byly zkušební tělesa uloženy pro vyžrání a následné zkoušky. Z hlediska požární odolnosti byla zkušební tělesa vystavena teplotám 200, 400, 600, 800, 1000 °C.

13 ZATÍŽENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES VYSOKOU TEPLOTOU

Teplotní režimová křivka byla nastavena v souladu s normovou teplotní křivku graf č. 1. Pro zatížení vysokými teplotami byly použity muflové pece, kde byly nastaveny různé teplotní rozsahy pro všechny etapy práce kromě první, kde byla posuzována dávka polymerní přísady. Pro stanovení dávky vláken byly použity teploty 200; 300; 400; 500 °C. Jedná se o recepturu stanovující vliv vláken na požární odolnost. Pro vyloučení vlivu modifikačních přeměn křemene v kamenivu byla použita maximální teplota 500 °C.

V ostatních případech, co se týče receptur výběru kameniva, stanovení dávky cementu a vývoje správkové malty odolné vůči vysokým teplotám jsou použity teploty 200; 400; 600; 800; 1000 °C. Zkušební tělesa byla vytvořena v několika sadách, aby bylo možné stanovit průkazně jejich parametry. Nárůst teploty činil 6,6 °C za minutu po dobu cca 2,5 hodiny. Teplotní pokles činil přibližně 1 °C za minutu při chlazení zkušebních těles. Doba expozice vysoké teplotě i s chlazením se pohybovala v rozmezí od 17 až 19 hodin při zatěžovací teplotě 1000 °C. U teplot pod 1000 °C, čímž je rozuměno 200, 400, 600 a 800 °C je dosahováno nižších časů výpalu.

Graf 19 – Teplotní křivka pro zkušební tělesa zatížená teplotou 1000 °C



Teplotní křivka se skládá ze tří částí. V první části je charakterizována teplotním nárůstem 6,6 °C za minutu, v druhé etapě následuje izotermní výdrž po dobu 90 minut na teplotě přibližně 1000 °C. Následuje další chlazení 1 °C za minutu až na teplotu okolního prostředí.

Při zkoušení vlivu vláken maximální teplota nepřesáhla 500 °C. Požadovaným výstupem je pouze vliv vláken, nikoliv kameniva, které může obsahovat krystalický křemen a docházelo by ke zkreslení výsledků.

14 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY A POSUPY

14.1 STANOVENÍ ZRNITOSTI KAMENIVA - SÍTOVÝ ROZBOR (ČSN EN 933-1)

Podstata zkoušky: Kamenivo se roztřídí a oddělí pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Velikosti otvorů sít a počet sít jsou voleny podle druhu vzorku a požadované přesnosti. Hmotnost částic zachycených na sítích se uvádí v procentech k počáteční hmotnosti vzorku.

Postup zkoušky:

1. Příprava zkušebních navážek

Zkušební navážka se vysuší při teplotě $110 \pm 5^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, ponechá se vychladnout a zváží se a zaznamená hmotnost M_1 .

2. Praní

Vzorek kameniva se vloží do nádoby, přidá se dostatečné množství vody a promíchá – nutno uvolnit jemné částice. Na síto 0,063mm se umístí ochranné síto např. 1 nebo 2mm a umístí do odpadní nádoby. Vzorek se nalije na zkušební síta a promývá vodou tak dlouho, dokud voda protékající zkušebním sítem 0,063mm není čistá. Zbytek zachycený na sítích se vysuší do ustálené hmotnosti při teplotě $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, ponechá se vychladnout a zváží se a zaznamená hmotnost M_2 .

3. Prosévání

Sestaví se sada zkušebních sítí vzestupně dle normové řady (nejmenší síto je dole). Sloupec sítí obsahuje i dno a víko. Vypraný, vysušený a zvážený vzorek se vsype na sloupec sítí.

Sloupcem se ručně nebo mechanicky třese do ustálené hmotnosti.

4. Vážení

Odebírají se jednotlivá síta, začíná se největším, zváží se zachycený materiál na síti (nesmí dojít ke ztrátě vzorku) a zaznamená se hmotnost na jednotlivých sítích $R_1, R_2, R_i \dots$. Materiál zbylý na dně se zváží a zaznamená jako P .

5. Pokud se součet hmotností $R_i + P$ odlišuje od M_2 o více jak 1%, musí se zkouška opakovat.

Výpočet:

Vypočítá se zachycená hmotnost na každém síti jako procento k původní suché hmotnosti M_1 . Vypočítá se souhrnné procento propadů každým sítem z původní suché hmotnosti až k sítu 0,063mm. Vypočítá se procento jemných částic f propadlých sítem 0,063.[34]

14.2 STANOVENÍ SYPNÉ HMOTNOSTI A MEZEROVITOSTI VOLNĚSYPANÉHO KAMENIVA (ČSN EN 1097-3)

Podstata zkoušky: zjistí se hmotnost vysušeného kameniva v odměrné nádobě a vypočte se sypná hmotnost volně sypaného kameniva. Mezerovitost v procentech se vypočte ze sypné hmotnosti volně sypaného kameniva a objemové hmotnosti zrn kameniva.

Postup zkoušky:

1. Příprava dílčích navážek - vzorek kameniva navýšený o 20-50% hmotnosti potřebné k naplnění nádoby se vysuší při teplotě $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ do ustálené hmotnosti.
2. Příprava nádoby – válcová nádoba z nerezavějícího kovu (5 dm^3)
3. Zjistí se hmotnost prázdné, suché nádoby m_1 .
4. Nádoba se umístí na vodorovnou plochu a přeplní kamenivem pomocí lopatky.

Lopatka při plnění se nesmí opírat o nádobu ani být více jak 50 mm nad horním okrajem plněné nádoby.

5. Opatrně se srovnávací lištou odstraní převršené kamenivo, při této operaci nesmí dojít ke zhutnění povrchu kameniva. Pokud povrch kameniva není pravidelný, zarovnáme ho ručně tak, aby kamenivo pokud možno vyplňovalo objem nádoby.

6. Zváží se naplněná nádoba a zaznamená se její hmotnost m_2 na 0,1 %.

7. Vyzkouší se tři dílčí navážky.

8. Kalibrace nádoby – objem nádoby se stanoví hmotností vody potřebné k jejímu naplnění.

Nejdříve se zváží suchá čistá nádoba se skleněnou deskou. Pak se naplní vodou a přikryje skleněnou deskou, přičemž se odstraní vzduchové bubliny a přebytečná voda. Osuší se vnější stěny nádoby a zváží se. Zjistí se objem vody v litrech vyjádřený hmotností vody v kgo dečením hmotnosti nádoby naplněné vodou a suché nádoby v .

Výpočet a vyjádření výsledků:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Sypná hmotnost volně sypaného kameniva ρ_b v kg.m^{-3} pro každou dílčí navážku se vypočítá: kde: m_1 hmotnost prázdné nádoby [kg], m_2 hmotnost nádoby se zkušební navážkou [kg], V objem nádoby v l.

14.3 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ČERSTVÉ MALTY (ČSN EN 1015-6)

Podstata zkoušky: objemová hmotnost čerstvé malty se stanoví jako poměr její hmotnosti a objemu zhutněného vzorku n nádobě o známém objemu.

Postup zkoušky:

1. Příprava vzorku: Vzorek čerstvé malty musí mít objem min. 3 l nebo 1,5 násobek potřebného množství. Vzorky musí být předem upraveny na předepsanou hodnotu rozlití dle ČSN EN 1015-3 nebo dle pokynů výrobců. Zkoušeny musí být dva vzorky.

2. Stanoví se hmotnost prázdné měřicí nádoby – m_1 .

3. Stanoví se objem měřicí nádoby – V_v .

4. Vibrační metoda:

Měřicí nádoba se naplní maltou pomocí lopatky, až přesáhne okraj nádoby. Umístí se na vibrační stůl a vibruje se tak dlouho, až nedochází k dalšímu sedání malty. Během vibrování se přidává další malta. Pomocí špachtle se setře přebytečná malta, povrch se urovná s horním okrajem nádoby a nádoba se zvenku očistí vlhkou tkaninou.

5. Rázová metoda:

Měřicí nádoba se naplní do poloviny výšky maltou. Za účelem hutnění se nádoba zvedne 10krát do výšky asi 30mm nad pevnou podložku a nechává se spadnout. Poté se doplní maltou a zhutní se stejně s postupným doplňováním malty. Pomocí špachtle se setře přebytečná malta, povrch se urovná s horním okrajem nádoby a nádoba se zvenku očistí vlhkou tkaninou.

6. Plnicí metoda: Měřicí nádoba se plní pomocí lopatky tak, aby malta stékala od středu nádoby k jejímu vnějšímu okraji, až přesáhne horní okraj nádoby. Pomocí špachtle se setře přebytečná malta, povrch se urovná s horním okrajem nádoby a nádoba se zvenku očistí vlhkou tkaninou.

Stanoví se celková hmotnost měřicí nádoby naplněné vzorkem malty – m_2 .

Výpočet a vyjádření výsledků

Hodnota objemové hmotnosti pro každý vzorek se vypočítá:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v}$$

kde: m_1 hmotnost prázdné měřicí nádoby [g]

m_2 hmotnost měřicí nádoby se vzorkem [g]

V_v objem měřicí nádoby [g]

Výsledek se zprůměruje ze dvou měření a zaokrouhlí se na 10kg.m^{-3} . [33]

14.4 STANOVENÍ DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI-ULTRAZVUKOVÁ IMPULZNÍ METODA ZKOUŠENÍ BETONU (ČSN 73 1371)

Podstata zkoušky:

Ultrazvuková impulzní metoda se používá k zjištění dynamických modulů pružnosti. Tuto metodu lze použít i k defektoskopii i jiným účelům.

Postup zkoušky:

Na boční stěny zkušebního tělesa se umístí dvě sondy a měří se doba průchodu impulzu strukturou materiálu.

Rychlost přenosu ultrazvukové vlny v $[\text{km.s}^{-1}]$ se počítá jednoduše podle (1) jako podíl vzdálenosti mezi sondami L [m] a času t [s], který během měření zaznamenáváme: Podstatné přitom je, že z rychlosti přenosu ultrazvukové vlny v [m/s] a hustoty malty $[\text{kg.m}^{-3}]$ počítáme dynamický modul pružnosti E_{dyn} [GPa]. [38]

Výpočet a vyjádření výsledku:

$$(1) v = \frac{L}{t} [\text{km.s}^{-1}]$$

$$(2) E_{\text{dyn}} = v^2 \rho [\text{GPa}]$$

Dle normy ČSN EN 73 1371 značen jako E_{bu} dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu. Ultrazvuková impulzní metoda se zakládá dle normy na měření rychlosti šíření impulzů UV vlnění v betonu. Použití ultrazvukové impulzní metody na určení fyzikálně mechanických vlastností betonu je založeno na odvozeném vztahu mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a těmito vlastnostmi betonu.

Z ultrazvukových měření je možné stanovit:

- 1) rychlost šíření UV vlnění
- 2) dynamické moduly pružnosti betonu a Poissonův koeficient
- 3) pevnost betonu, hutnost, degradaci, objemovou hmotnost, aj.

14.5 PEVNOST V TAHU OHYBEM-ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU-ČÁST 5 PEVNOST V TAHU OHYBEM ZKUŠEBNÍCH TĚLES (ČSN EN 12390-5)

Podstata zkoušky:

Podstatou zkoušky je určení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. Zkušební tělesa mohou být zatěžována jedním nebo dvěma břemeny.

Postup zkoušky:

- očištění tlačných desek
- středové uložení zkušebního tělesa s přesností $\pm 1 \%$
- zatěžování rychlostí od 0,04-0,06 MPa/s
- zatěžovat lze dvěma nebo jedním břemenem

Výpočet a vyjádření výsledku:

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

F-maximální zatížení [N]

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

b-šířka zkušebního tělesa [mm]

h-výška zkušebního tělesa [mm]

Hodnota pevnosti v tahu se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa



Obrázek 16- Pevnost v tahu ohybem zkušebního tělesa (160x40x40 mm)

14.6 STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU (ČSN EN 12 190)

Podstata zkoušky:

Zkouškou se ověřuje pevnost v tlaku správkových malt, jež je jednou z nejvýznamnějších posuzovaných vlastností. Zkouška se provádí postupem dle ČSN EN 12 190 -Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí-Zkušební metody- Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt. Tato norma určuje postup pro stanovení pevností v tlaku malt a betonů pro staticky funkční i pro staticky nefunkční opravy ve smyslu definice v ČSN EN 1504-1. Tato zkušební metoda platí pro všechny typy správkových malt a betonů s maximální zrnitostí do 8 mm. Norma rozlišuje mezi maltami s hydraulickými a polymerovými pojivy.

Postup zkoušky:

U malt typu PC, PCC a CC je podstatou zkoušky stanovení pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech ve tvaru krychle o hraně 40 mm. Alternativní metoda používá tělesa ve tvaru hranolu o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm, která se buď rozlomí, nebo rozřezou na požadovaný rozměr. Pevnost v tlaku se stanoví na šesti zkušebních tělesech tvaru krychle nebo hranolu dle ČSN EN 196-1 „Metoda zkoušení cementu-Část 1:Stanovení pevnosti,“ pro každé požadované stáří vzorku. Stáří malty v době zkoušky musí odpovídat požadavku uvedenému v normách řady 1504. Výsledkem zkoušky je hodnota pevnosti v tlaku v MPa.

Výpočet a vyjádření výsledku:

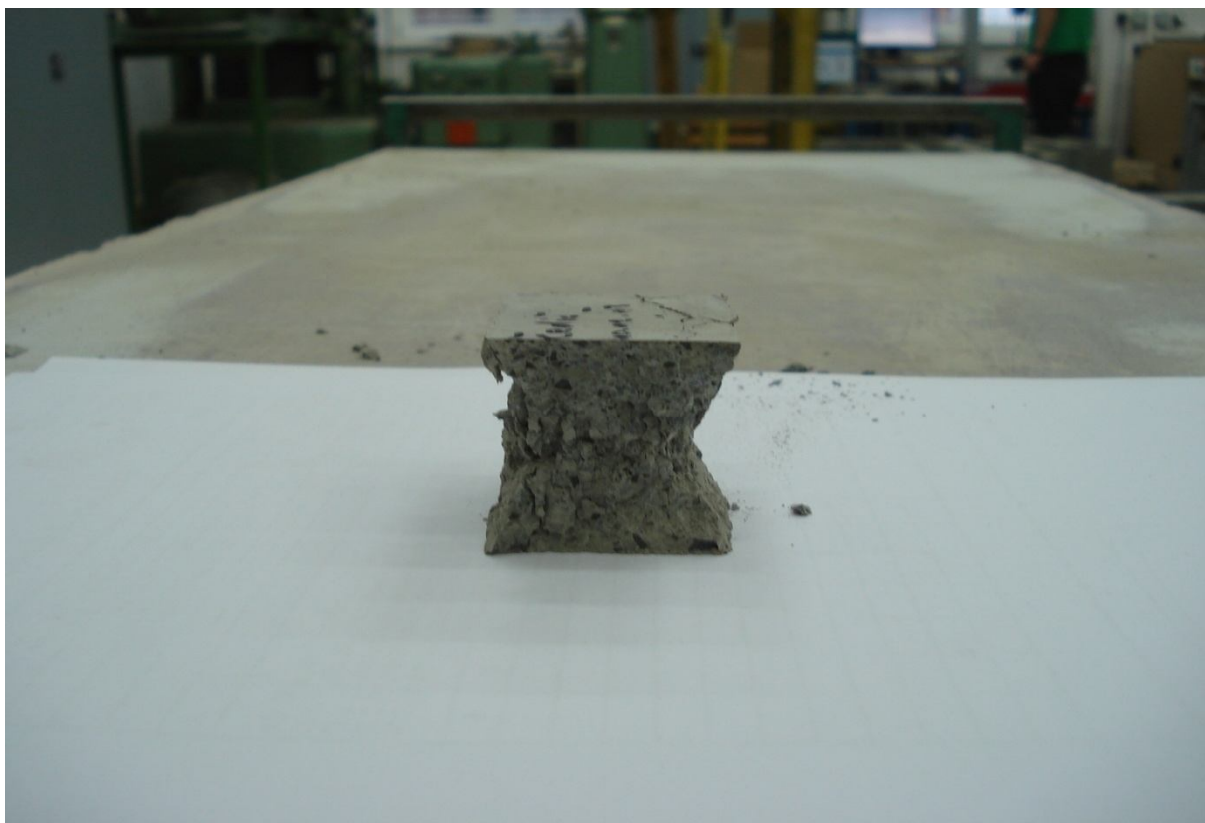
$$f_c = \frac{F}{A_c} \text{ [MPa]}$$



Obrázek 17- Vyhovující způsoby porušení zkušebních těles



Obrázek 18 – Ukázka destruktivní zkoušky porušení pevnosti zkušebního tělesa tlakem



Obrázek 19 – Ukázka typického porušení zkušebního tělesa tlakem

14. 7 STANOVENÍ SOUDRŽNOSTI ODTRHOVOU ZKOUŠKOU (ČSN EN 1542)

Podstata zkoušky:

Zkouška stanovení soudržnosti s podkladem se provádí pro posouzení správkové malty z hlediska soudržnosti se stávajícím podkladem.

Příprava zkušebních těles a postup:

Zkoušený materiál se nanese ve stejnoměrné tloušťce na rovinný zkušební vzorek s otryskaným povrchem ve vodorovné nebo svislé poloze, dle určení zkoušeného materiálu. Tělesa se pak po dobu třech dnů ošetřují dle doporučení výrobce a na dalších sedm dnů jsou uložena ve standardním laboratorním prostředí.

Aby při zkoušce došlo k poškození zkoušené hmoty, je nutné, aby kohezní vlastnosti a přilnavost lepidla byly vždy větší než tyto vlastnosti zkoušené hmoty. Je upřednostňováno lepidlo, které poskytuje nejvyšší výsledky, což znamená, že vytváří nejčastěji adhezní porušení mezi zkoušenou hmotou a podkladem nebo porušení podkladního betonu. Zkušební terče jsou vyrobeny z oceli nebo hliníku a jsou speciálně navrženy k použití s trhacím zkušebním zařízením. Každý terč má pevnou, rovnou základnu pro spojení lepidlo/malta na jedné straně a závit pro uchycení v trhacím zařízení na straně druhé. Zkušební terče mají běžně kruhový tvar o průměru 50 mm, alternativně se používají terče čtvercové o rozměru 50 x 50 mm. Tvar a rozměr terče je však nutno vždy uvést v protokolu o zkoušce. Před vlastním nalepením odtrhového terče na zkušební místo se nejdříve použije řezný nástroj (v případě kruhových terčů jádrová vrtačka, v případě čtvercových terčů úhlová bruska k proříznutí zkoušeného systému až do hloubky 15 ± 5 mm do betonového podkladu.

Provedení zkoušky a postup:

Po vytvrzení lepidla je nalepený terč vždy uchycen do vhodného trhacího zařízení (např. ProceqDyna Z16, Comtest OP, atp.). Přilepená sestava je podrobena kontrolované tažné síle (odtrhová zkouška). Rychlost zatěžování musí být rovnoměrná v intervalu 0,04-0,06 MPa/s. Je měřena síla potřebná k porušení souvrství. Provádí se minimálně 5 stanovení. Pokud není odsouhlaseno jinak, zkouška se provede při teplotě (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50 ± 5) %.

Vyhodnocení zkoušky:

Výsledek zkoušky se prezentuje jako odtrhová síla v Newtonech (N), A je plocha odtahového terče v mm². Vypočítá se průměr ze všech pěti stanovení a zaokrouhlí se na nejbližší celé číslo. Výsledek se vyjádří jako průměrná hodnota. Dále se zaznamenává charakter porušení, výsledek se vyjádří jako odhad procentuálního podílu plochy a charakteru porušení zkoušeného systému. [3]



Obrázek 20 - Ukázka odtrhové zkoušky [39]

15 VYHODNOCENÍ VÝLEDKŮ PROVEDENÝCH ZKOUŠEK NAVRŽENÝCH RECEPTUR

15.1 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ DÁVKY POLYMERNÍ PŘÍSADY

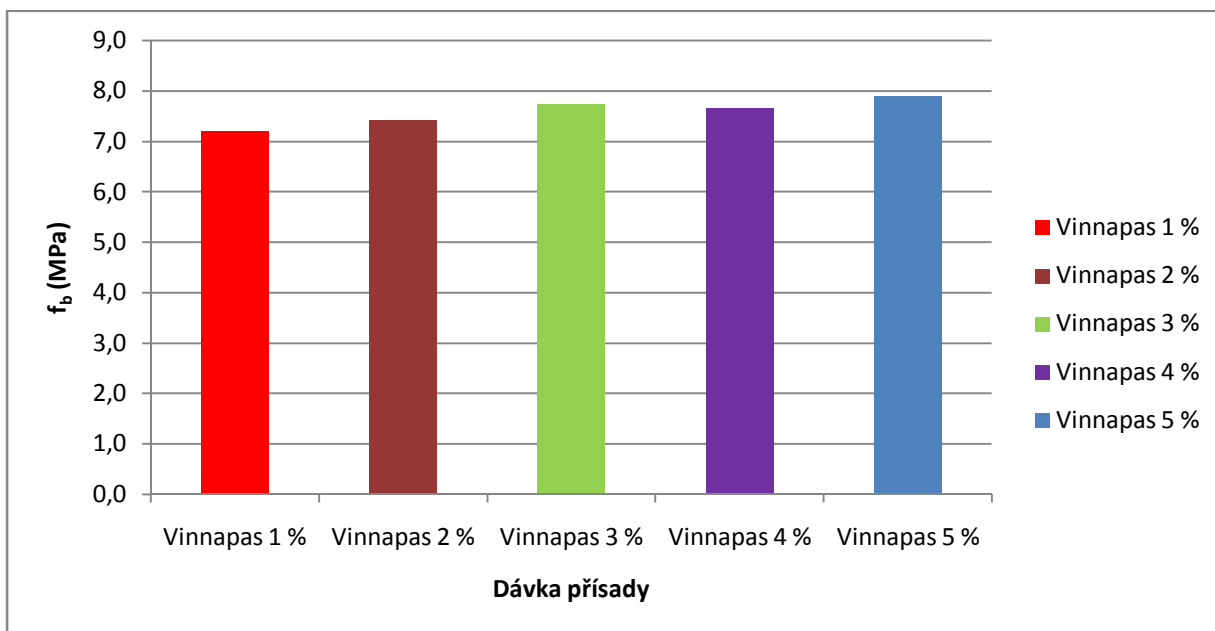
Při uvážení zjištěných poznatků byl sledován vliv polymerní přísady v množství 1 až 5 % hmotnosti z dávky cementu na základní charakteristiky malt. Zjišťovány byly následující parametry jako je objemová hmotnost malty, dynamické moduly pružnosti, pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a především soudržnost s podkladem.

Tabulka 18- *Receptura malty*

Receptura-Vliv množství polymerní přísady (především na soudržnost s podkladem)		
Složka	Dávka na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	586	0,48
Kamenivo písek Bratčice (0-4)	1758	
Polymerní přísada (Vinnapas)	6	
Polymerní přísada (Vinnapas)	12	
Polymerní přísada (Vinnapas)	18	
Polymerní přísada (Vinnapas)	23	
Polymerní přísada (Vinnapas)	29	
Voda	281	

Pevnost v tahu ohybem

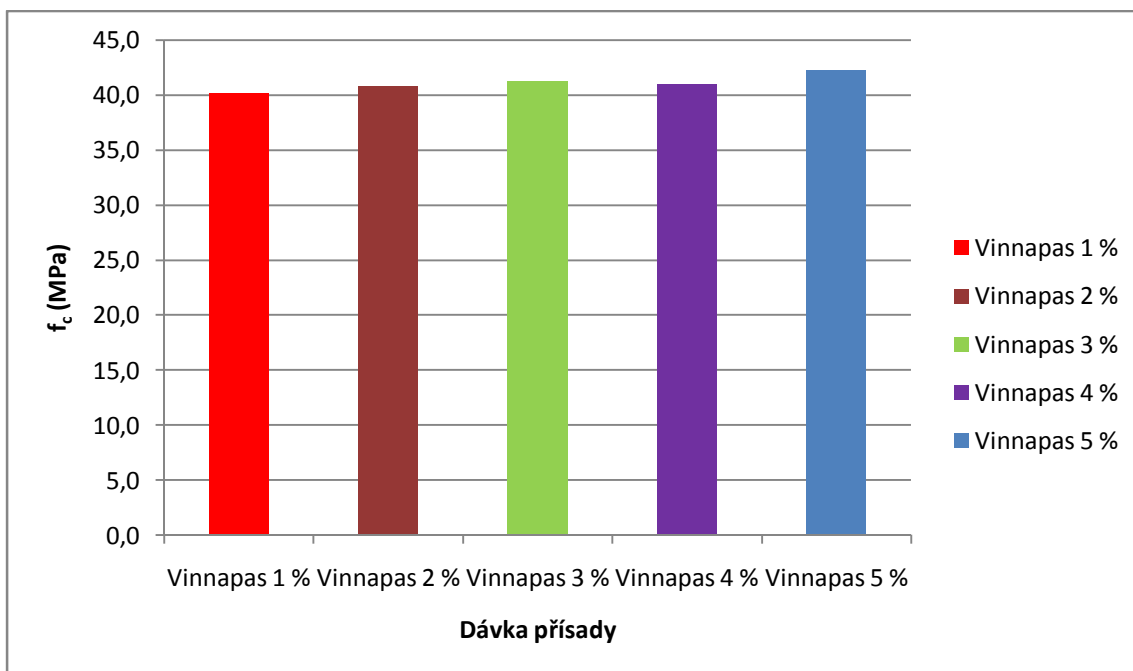
Graf 20 -*Porovnání vlivu polymerní přísady na pevnost v tahu ohybem*



Z grafu lze vyčíst, že srovnatelných pevností v tahu ohybem bylo dosaženo s dávkou polymerní přísady 3 a 5 % z hmotnosti cementu. Samotný výrobce této přísady uvádí příznivý vliv na tyto pevnosti. Vliv dávky 3 a 5 % je srovnatelný, z čehož lze vyvodit, že dávka 3 % je optimální pro využití ve správkové maltě z ekonomického hlediska.

Pevnost v tlaku

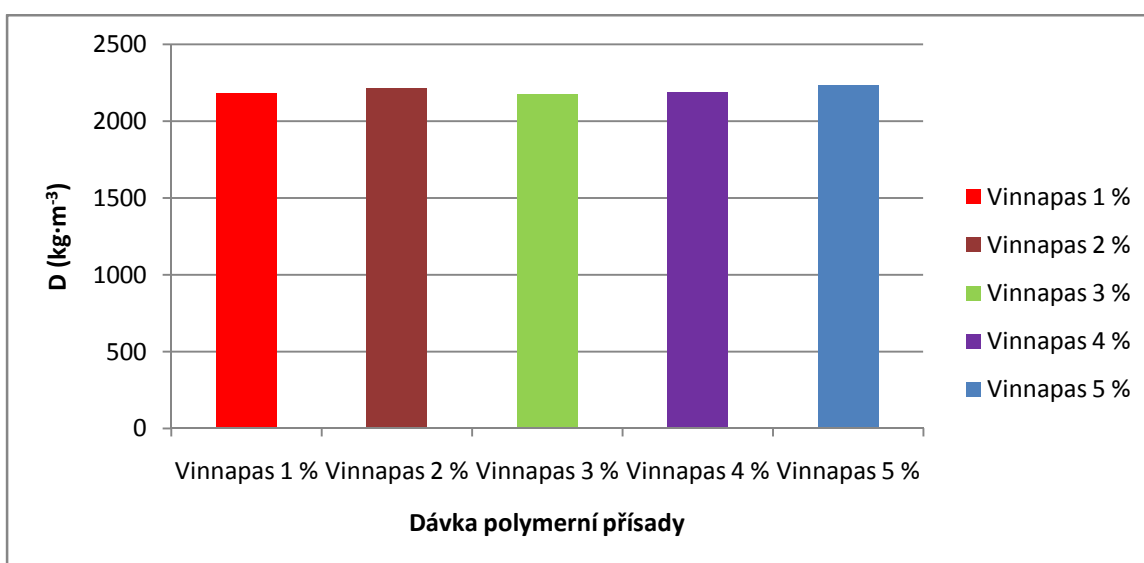
Graf 21 - *Vliv dávky polymerní přísady na pevnost v tlaku malty*



U pevnosti v tlaku se výsledky při použití dávky 3 a 5 % z hmotnosti cementu příliš neliší, tudíž vzhledem ke snížení nákladů na výrobu se jeví použít dávku 3 % z hmotnosti cementu.

Objemová hmotnost ztvrdlé malty

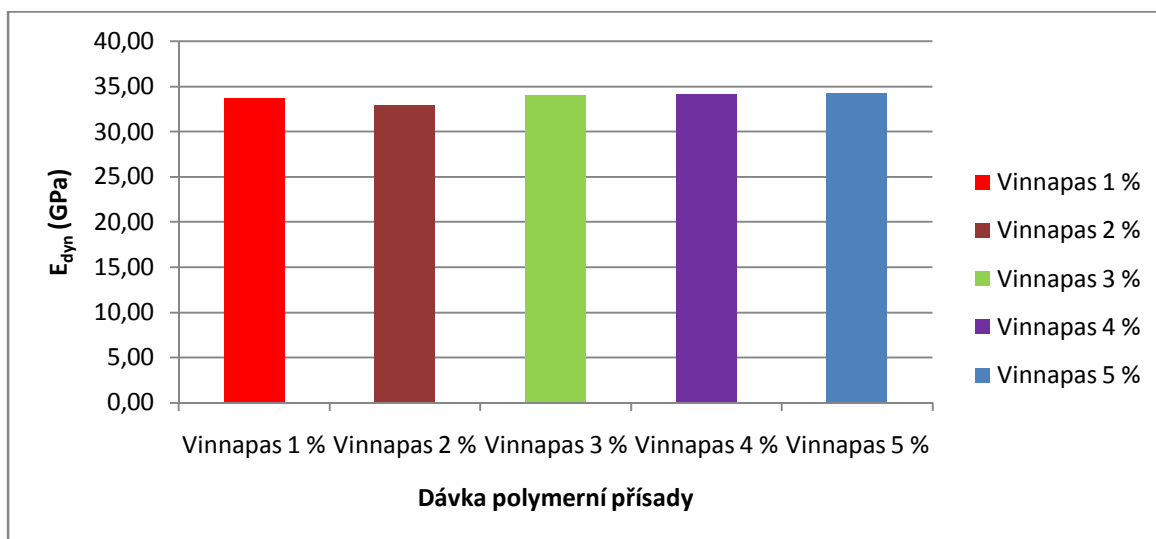
Graf 22 - *Vliv dávky polymerní přísady na objemovou hmotnost ztvrdlé malty*



Při posouzení dávky polymerní přísady v tak malém množství jako je 1 až 5 % z hmotnosti cementu nevykazuje objemová hmotnost ztvrdlé malty výraznější změny.

Dynamické moduly pružnosti

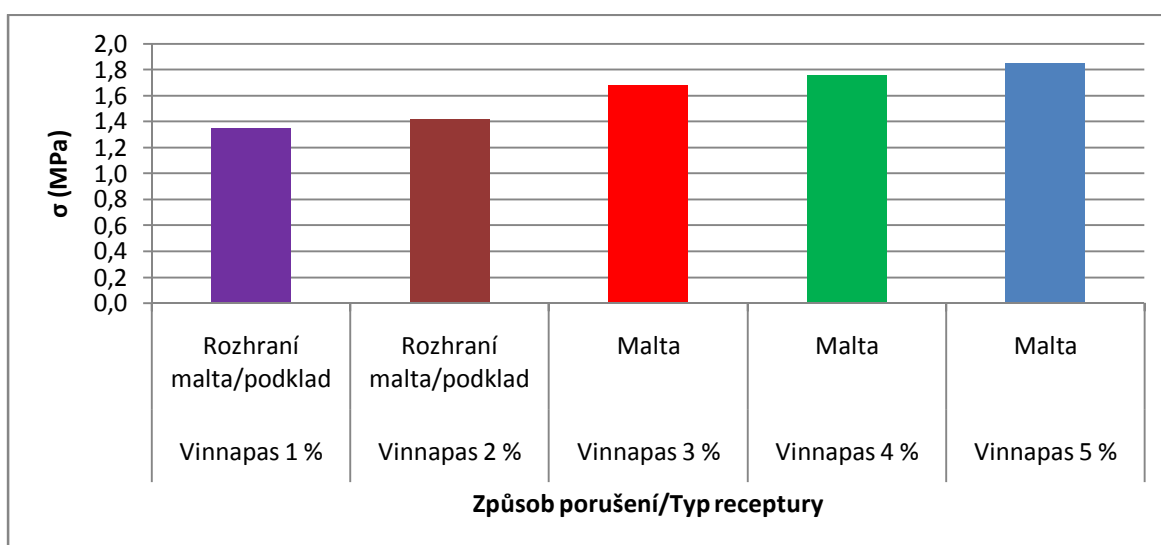
Graf 23 - Vliv dávky polymerní přísady na dynamický modul pružnosti malty



Z grafu č. 23 lze vypočítat srovnatelné dynamické moduly pružnosti u dávek 3, 4 a 5 % z hmotnosti cementu. Pro snížení nákladů na výrobu malty je opět vhodné použít dávku 3 % z hmotnosti cementu.

Soudržnost s podkladem

Graf 24 - Vliv dávky polymerní přísady na soudržnost malty s podkladním betonem



Při posuzování vlivu dávky polymerní přísady se osvědčily dávky v množství 3, 4 a 5 %. Pro srovnatelné výsledky lze opět použít dávku 3 % z hmotnosti cementu.

Z hlediska aplikace polymerní přísady do správkové malty vzhledem k soudržnosti s podkladem a výsledných pevností se osvědčila dávka 3 % z hmotnosti cementu. Pro návrh dalších receptur lze uvažovat tuto dávku jako optimum.

15. 2 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ DÁVKY VLÁKEN

V následující tabulce č. 19 je uvedeno složení receptur pro posouzení vlivu dávky vláken na požární odolnost malty. Receptura vychází z normové malty pro zkoušení cementu. Byly pouze modifikovány některé složky. Teplotní rozsah byl nastaven do 500 °C z důvodu možného vlivu modifikačních přeměn křemene na objemové změny zkušebních těles, porušení struktury a ovlivnění výsledků.

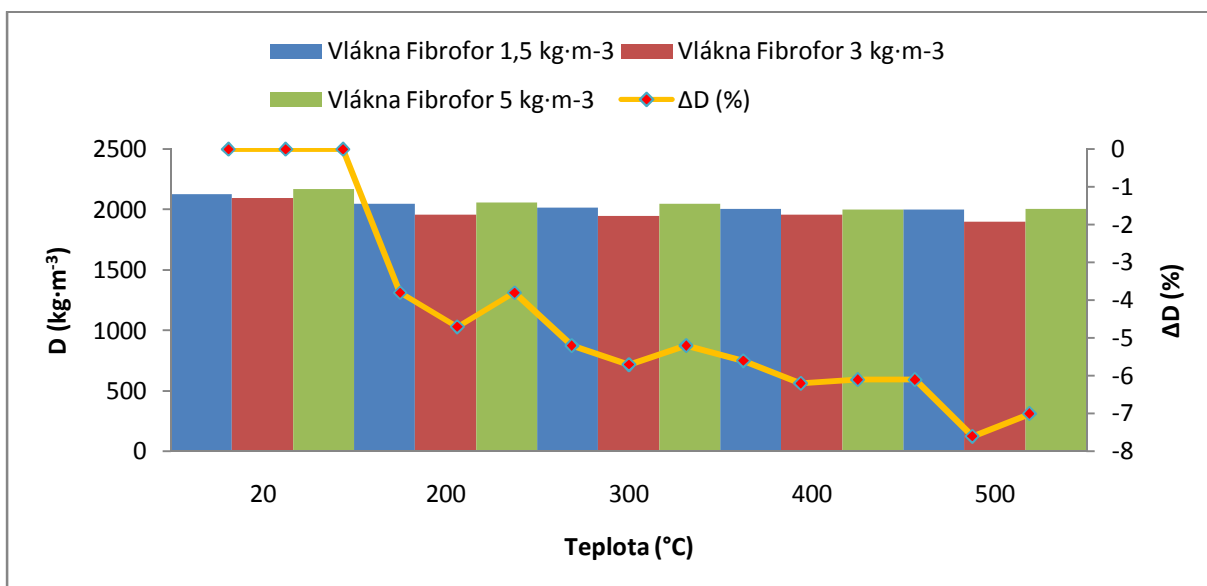
Tabulka 19-Receptura malty pro stanovení optimální dávky polyolefinových vláken

Návrh receptury	
Složka	Množství složky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
Cement 32,5 II/S	570
Kamenivo (frakce 0-4 mm)	1730
Voda ($w=0,5$)	285
Polymerní vlákna Fibrofor-Highgrade	0; 1,5; 3; 5*

* Pro stanovení optimální dávky polyolefinových vláken byly zhotoveny 4 receptury s různou dávkou vláken.

Objemová hmotnost ztvrdlé malty

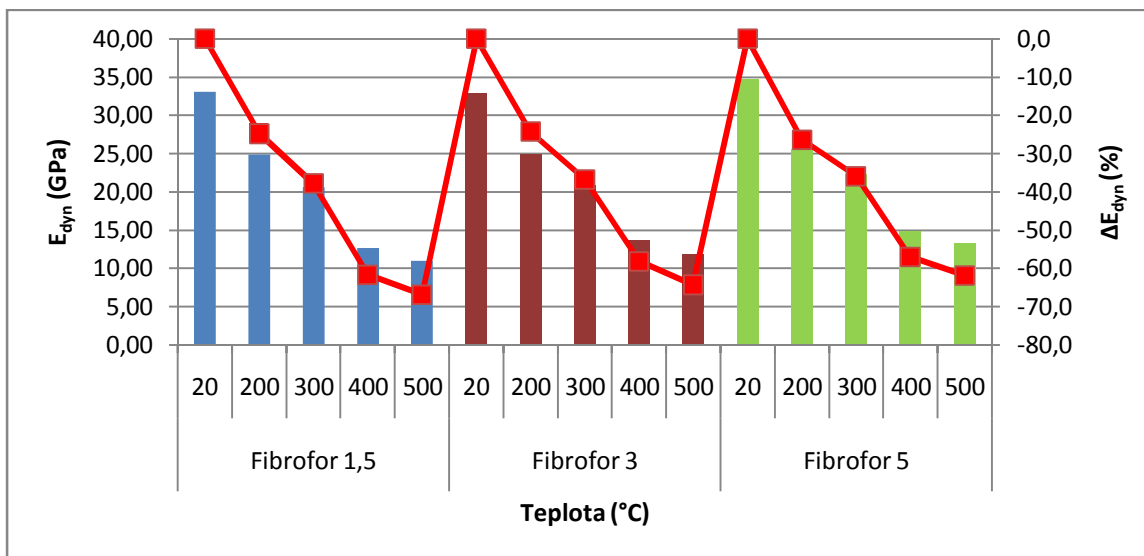
Graf 25- Vliv množství vláken na objemovou hmotnost malty při zatížení vysokou teplotou



Z grafu č. 25 lze vysledovat pozitivní vliv dávky $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vláken na objemovou hmotnost, jejíž pokles není tak razantní jako u dávek nižších.

Dynamické moduly pružnosti

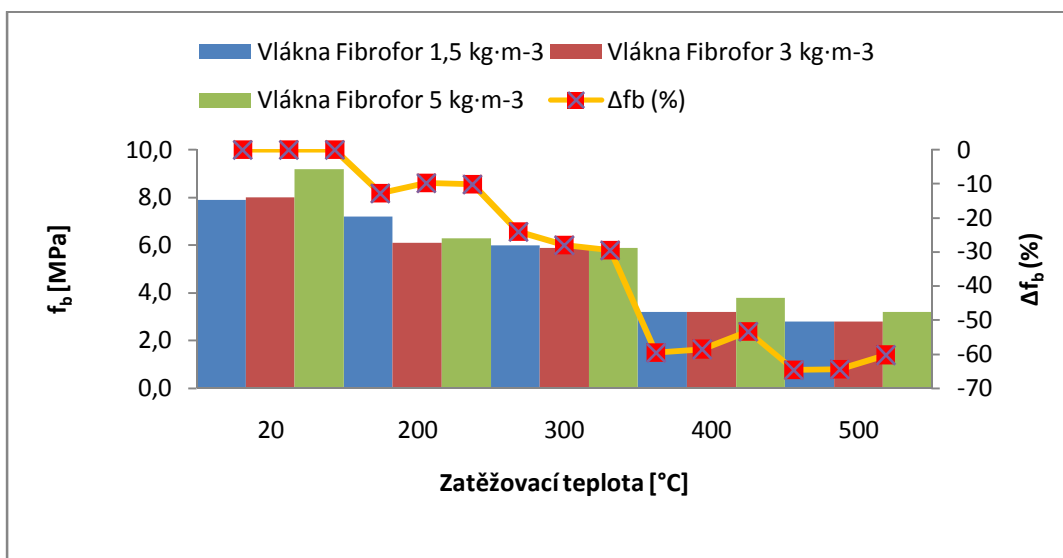
Graf 26 - Srovnání dynamických modulů pružnosti pro různou dávku vláken a teplotu



Dávka vláken $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vykazuje vyšší moduly pružnosti a jejich menší pokles v závislosti na rostoucí teplotě.

Pevnost v tahu ohybem

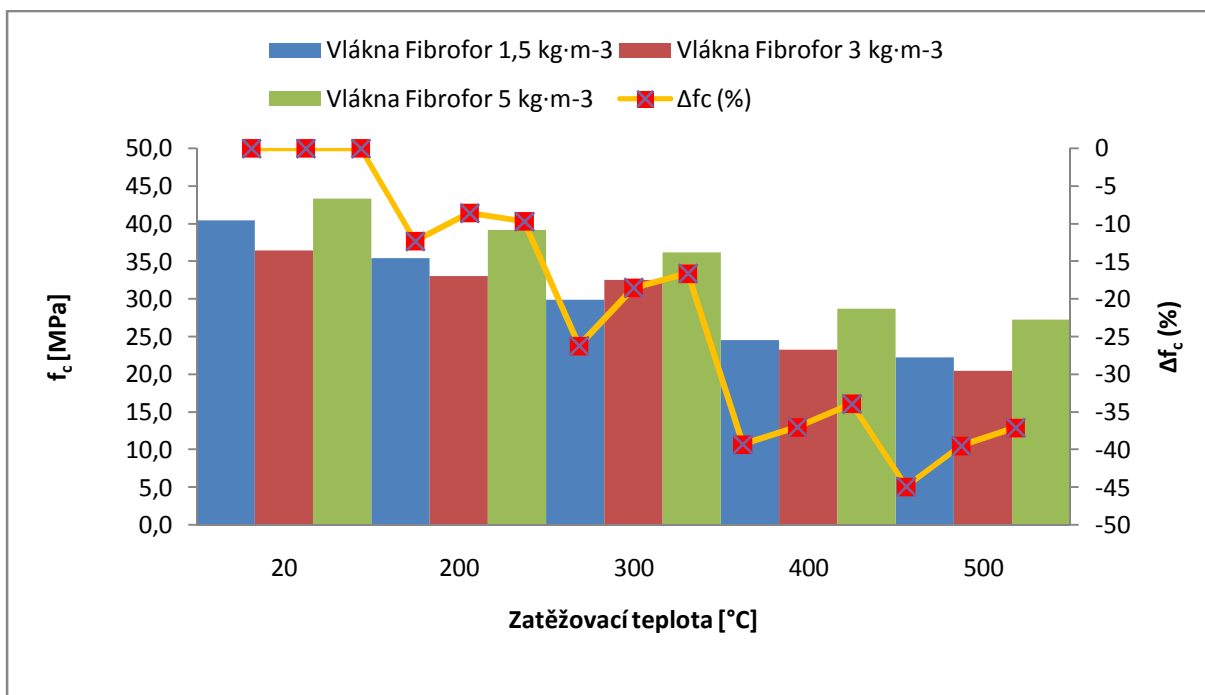
Graf 17-Vliv teploty na pevnost v tahu ohybem v závislosti na dávce polyolefinových vláken



Pozitivní vliv dávky vláken byl prokázán v hodnotě $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ také při zkoušce pevnosti v tahu ohybem.

Pevnost v tlaku

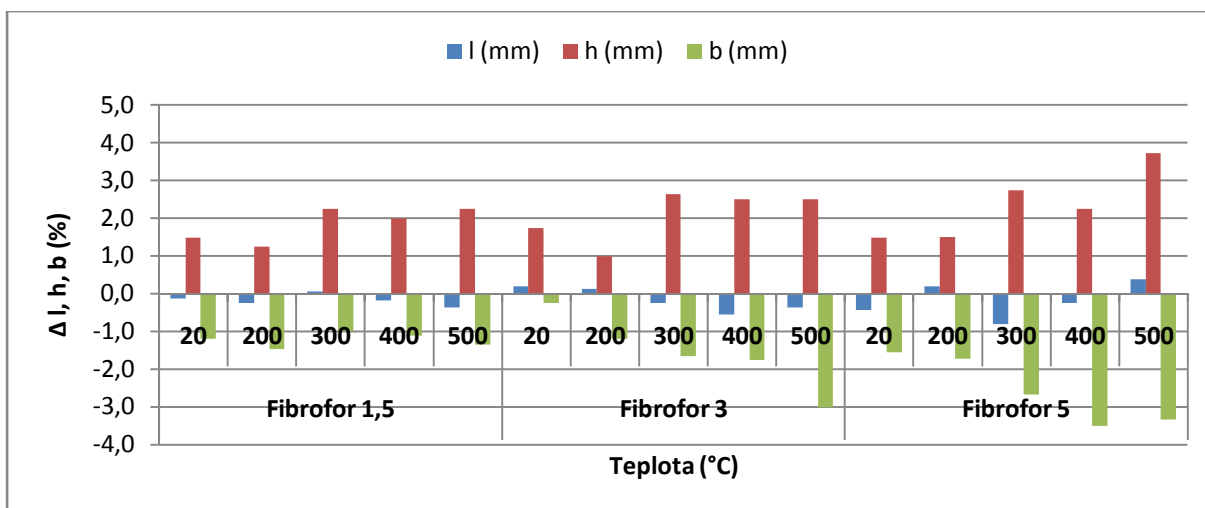
Graf 18- Porovnání pevností v tlaku v závislosti na dávce vláken a rostoucí teplotě



V případě zkoušky pevnosti v tlaku je vliv dávky 5kg·m⁻³ vláken nejpatrnější. Z hlediska zachování statické funkce malty se jedná o velmi příznivý vývoj.

Změna rozměrů zkušebních těles

Graf 19- Procentuální změna rozměrů v důsledku rostoucí teploty



Vlivem vyhořívání vláken za zvýšené teploty již kolem teploty 170 °C dochází také k objemovým změnám a to znamená také výraznější změně rozměrů zkušebních těles.

Shrnutím výsledků všech zkoušek pro stanovení optimální dávky vláken lze shledat množství $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jedná se především o vliv na zachování mechanických pevností, což by v praxi mělo znamenat prodloužení doby únosnosti konstrukce vystavené vysokým teplotám. Vzhledem k maximální teplotě zkoušení $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je třeba ještě zajistit kamenivo odolné vůči extrémním teplotám, což je zmíněno v další etapě grafických vyhodnocení zkoušek.



Obrázek 21- *Vliv rostoucí teploty na poškození zkušebních těles v tlaku za použití polyolefinových vláken (názorná ukázka poškození malty po vyjmutí z lisu) zprava 20; 200; 300; 400; 500 $^{\circ}\text{C}$*

15.3 VLIV POUŽITÉHO KAMENIVA NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI MALT

Návrh receptur pro výběr vhodného kameniva

Pro zkoušení kameniva byla použita normová receptura malty pro zkoušení cementu. Kameniva byla vybrána s ohledem na jejich dostupnost a dle rešerší literatury posouzena jejich vhodnost pro použití do správkových malt odolných vůči vysokým teplotám. Sítovým rozborem byly stanoveny patřičné křivky zrnitosti, které jsou uvedeny v grafu č. 17., ty byly srovnány s ideální křivkou zrnitosti EMPA a posouzeny z hlediska obsahu jemných podílů a snahou bylo přiblížit se k této ideální křivce. Vhodným mísením kameniv bylo dosaženo aproximace k této křivce poměrem mísení kameniva aglopritu frakce (0-1) a (1-2) a amfibolitu frakce (2-4) mm v poměru 1:1. U ostatních kameniv bylo docíleno přiblížení k této křivce. Účelem stanovení křivky zrnitosti je dosažení maximální hutnosti navrhované malty.

Tabulka 20 - *Receptura Živcový písek*

Návrh receptury Živcový písek Bratčice		
Složka	m [kg·m ⁻³]	w* [-]
Cement	586	0,42
Kamenivo (0-4)	1758	
Voda	246	

Tabulka 21 - *Receptura Amfibolit*

Návrh receptury Amfibolit Želešice		
Složka	m [kg·m ⁻³]	w* [-]
Cement	586	0,42
Kamenivo (0-4)	1758	
Voda	246	

Tabulka 22 - *Receptura popílkový agloporit*

Návrh receptury Popílkový agloporit		
Složka	m [kg·m ⁻³]	w* [-]
Cement	369	0,4
Kamenivo (0-4)	1108	
Voda	148	

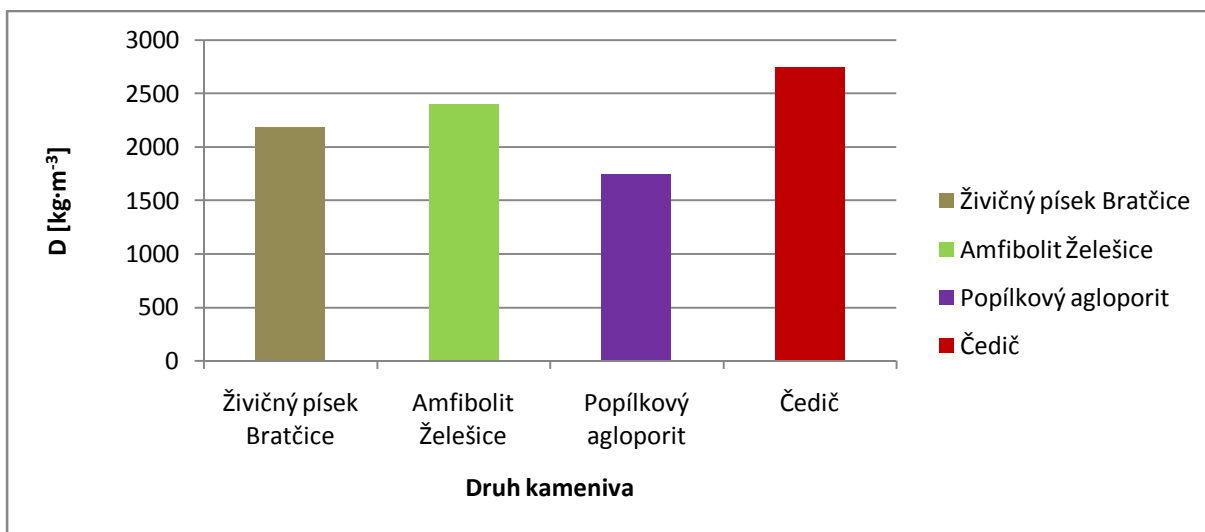
Tabulka 23 - *Receptura Čedič*

Návrh receptury Čedič		
Složka	m [kg·m ⁻³]	w* [-]
Cement	586	0,4
Kamenivo (0-4)	1758	
Voda	234	

*Pozn. Vodní součinitel jednotlivých receptur byl upraven s ohledem na konzistenci a počáteční vlhkosti kameniva. Jedná se zde o konzistence s rozlitem 160 mm. Současně byla také zednickou lžící či špachtlí orientačně posouzena zpracovatelnost malty.

Objemová hmotnost čerstvé malty

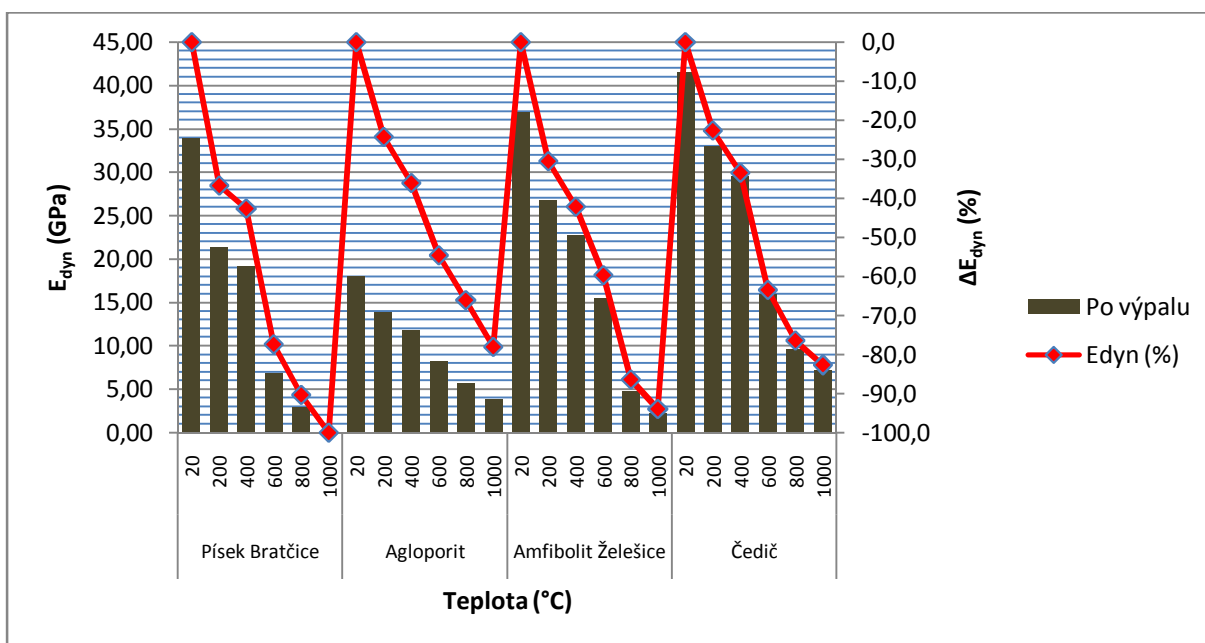
Graf 20-Porovnání objemových hmotností čerstvých malt dle druhu použitého kameniva



Objemové hmotnosti odpovídají druhu použitého kameniva. Nejvyšších objemových hmotností vykazuje čerstvá malta za použití čediče.

Dynamické moduly pružnosti

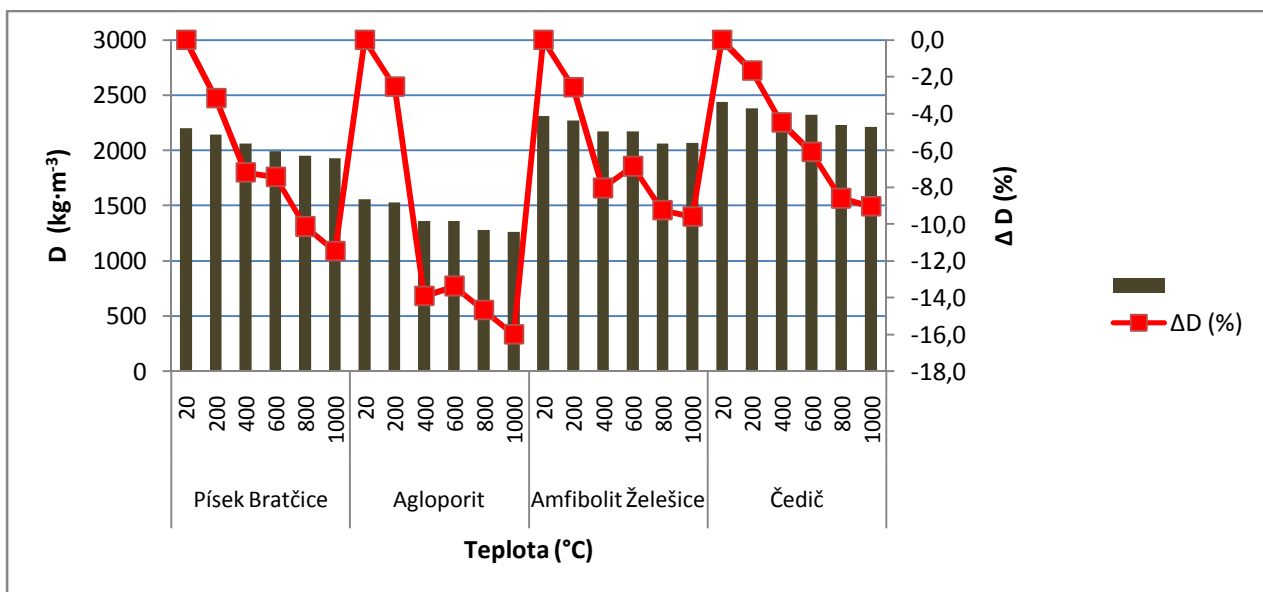
Graf 21- Porovnání hodnot dynamických modulů pružnosti po zatížení vysokými teplotami



Při stanovení dynamických modulů pružnosti se značně projevuje vliv objemové hmotnosti použitého kameniva, jelikož tato veličina je na objemové hmotnosti závislá. Z hlediska použitelnosti se jeví nejlépe kamenivo čedič a amfibolit.

Objemová hmotnost ztvrdlé malty

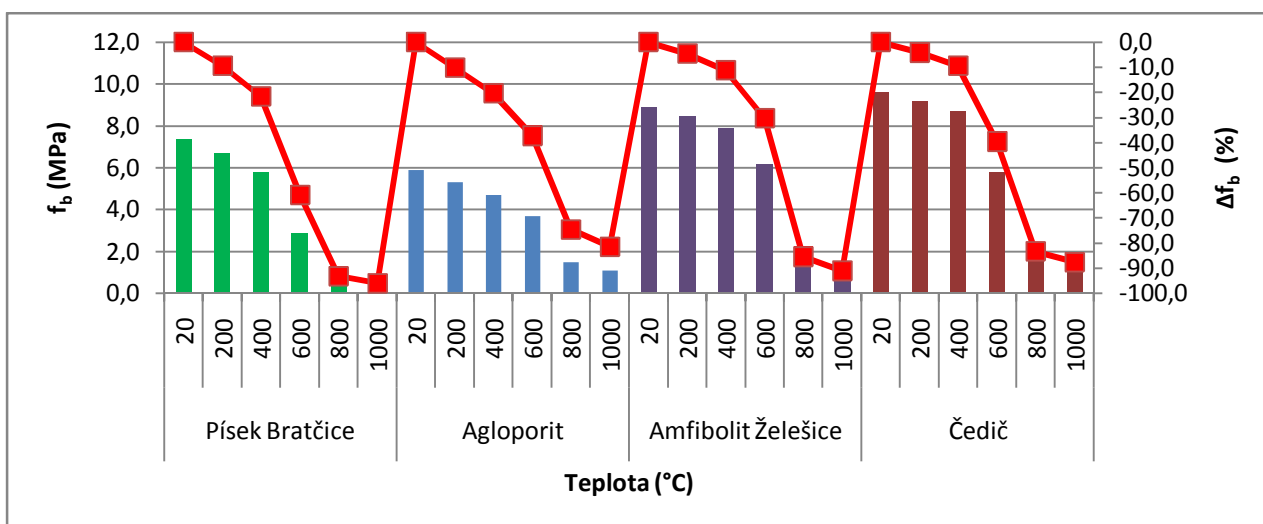
Graf 22- Porovnání objemových hmotností ztvrdlé malty



Objemová hmotnost ztvrdlé malty vykazuje porovnatelné výsledky při použití čediče i amfibolitu. Z hlediska ceny je výhodnější výběr amfibolitu. Procentuální pokles je srovnatelný u obou kameniv.

Pevnost v tahu ohybem

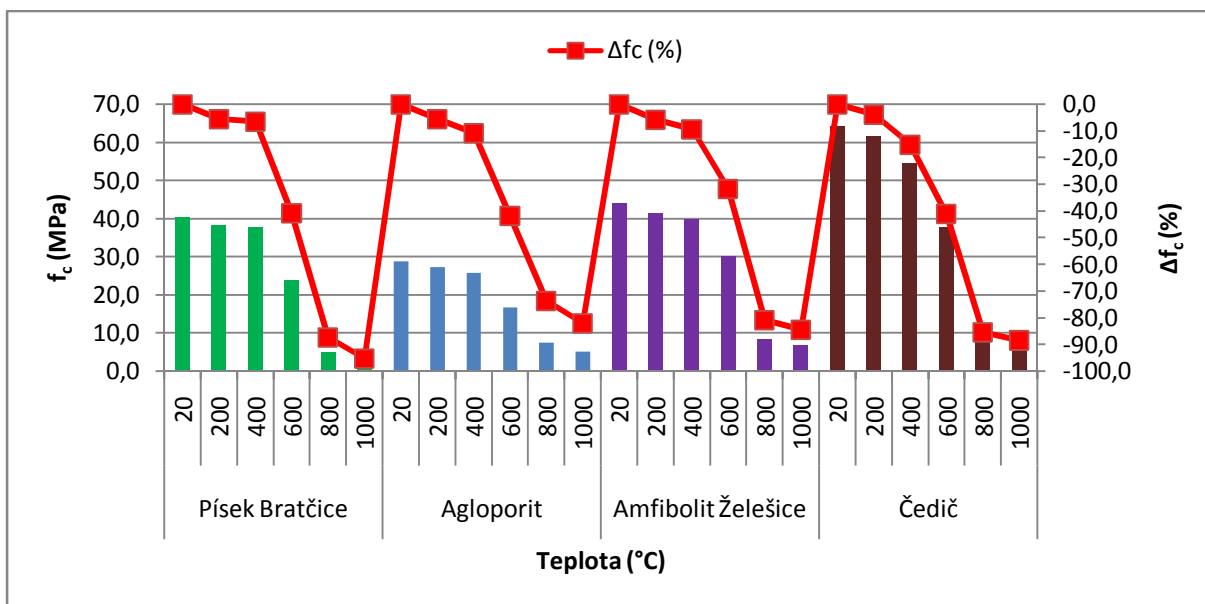
Graf 23- Porovnání pevností v tahu ohybem při zatížení vysokými teplotami



V případě zkoušky pevnosti v tahu ohybem vykazuje kamenivo čedič a amfibolit srovnatelné výsledky. Při této zkoušce se projevila naplno modifikační přeměna křemene u živcového písku Bratčice, kdy došlo k porušení zkušebních těles již při nepatrném zatížení.

Pevnost v tlaku

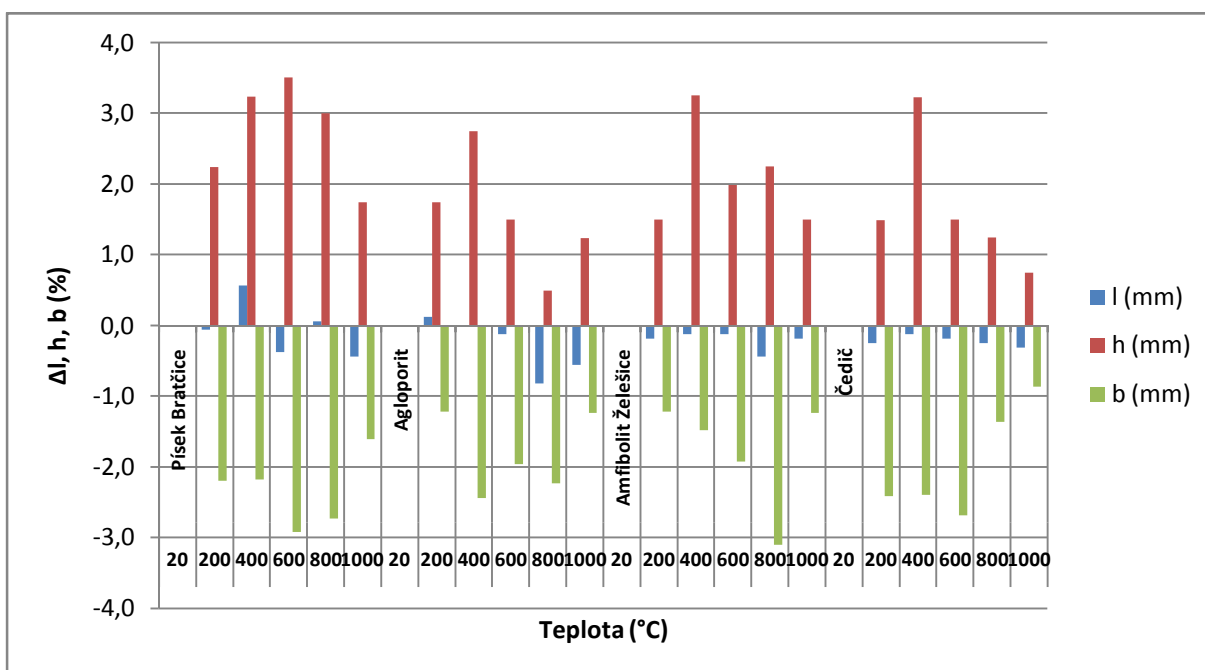
Graf 24-Porovnání pevností v tlaku v závislosti na rostoucí teplotě



Při vyhodnocení zkoušek pevností v tlaku bylo dosaženo obdobných výsledků jako u zkoušek pevností v tahu ohybem. Zde se projeví příznivé vlastnosti agloporitu, jelikož toto kamenivo vzniká samovypálem na aglomeračních roštích, podleho již extrémnímu tepelnému zatížení, což se projevilo nejmenším procentuálním poklesem pevností v tlaku.

Změny rozměrů zkušebních těles způsobené zatížením vysokými teplotami

Graf 25-Porovnání rozměrových dilatací zkušebních těles



Výsledným posouzením vlivu použitého kameniva je prokázáno, že optimální volbou z hlediska vlastností prokázaných zkouškami a odolností vůči vysokým teplotám je kamenivo čedič, amfibolit a také agloporit. Z hlediska výběru dle pořizovací ceny je výhodnější v dalších recepturách uvažovat spíše amfibolit a popílkový agloporit, kterého není díky své nízké objemové hmotnosti potřeba velké množství pro zhotovení malty. U písku se projevila modifikační přeměna křemene a oddělení cementového tmele od kameniva v důsledku objemových změn. V důsledku těchto příčin docházelo v některých případech k totální destrukci zkušebních těles, kdy nebylo možné provádět další zkoušky.

15.4 STANOVENÍ VHODNÉ DÁVKY POJIVA

V této etapě práce jsou již vybrány vhodná kameniva pro návrh receptur. Z hlediska optimálních vlastností prokázaných při předchozích zkouškách byl vybrán amfibolit z lomu Želešice frakce (0-4). Posuzován je vliv dávky hydraulického pojiva, v tomto případě cementu na konečné vlastnosti zkušebních těles. S vyšší dávkou cementu se také mění dávka vody.

Tabulka 24-Návrh receptur pro záměsi s rozdílnou dávkou cementu 3:1

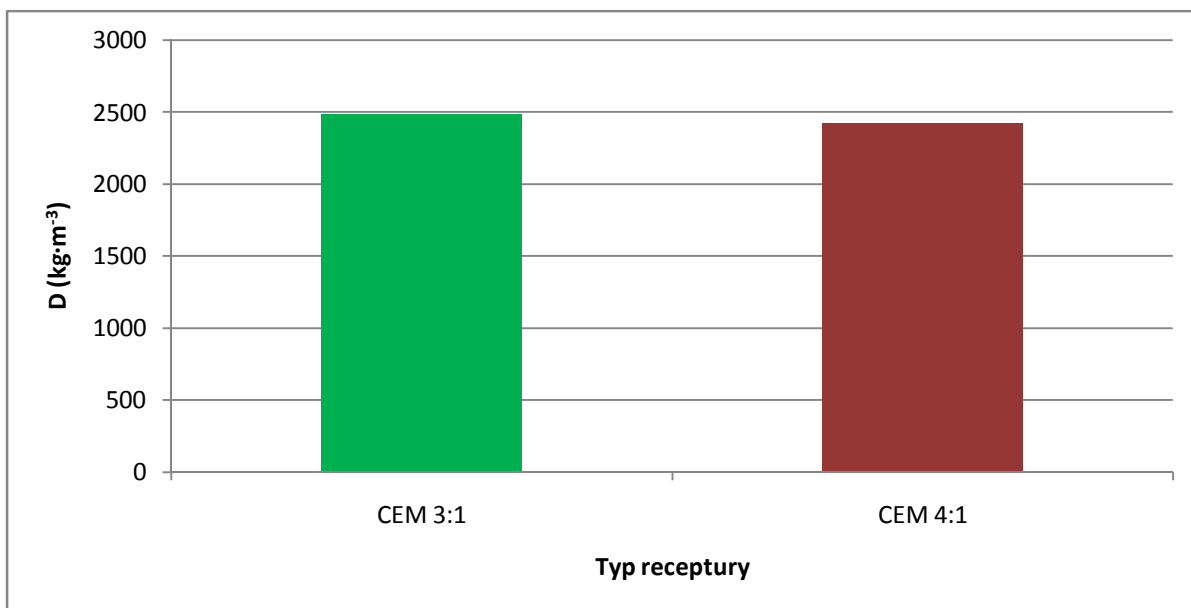
Receptura-Vliv množství cementu (množství 3:1- kamenivo: cement)		
Složka	Dávka na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	586	0,42
Kamenivo- Amfibolit Želešice (0-4)	1758	
Polymerní vlákna	5	
Polymerní přísada (Vinnapas)	18	
Mikrosilika	18	
Voda	246	

Tabulka 25-Návrh receptur pro záměsi s rozdílnou dávkou cementu 4:1

Receptura-Vliv množství cementu (množství 4:1- kamenivo : cement)		
Složka	Dávka na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	469	0,42
Kamenivo Amfibolit Želešice (0-4)	1875	
Polymerní vlákna	5	
Polymerní přísada (Vinnapas)	14	
Mikrosilika	14	
Voda	197	

Objemová hmotnost čerstvé malty

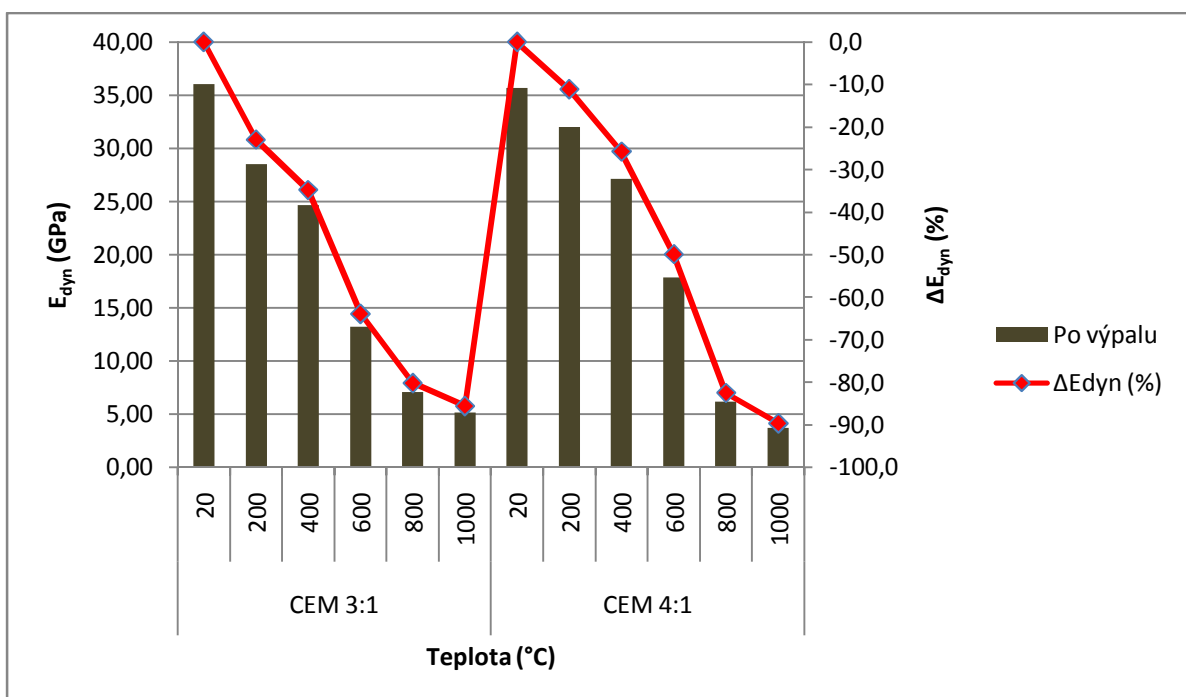
Graf 26-Objemové hmotnost čerstvých malt s různým podílem cementu



U objemové hmotnosti čerstvé malty byl pozorován jen nepatrný vliv množství cementu. U poměru 4:1 je pokles způsoben nižší dávkou pojiva, jelikož měrná hmotnost cementu je přibližně 3100 kg·m⁻³.

Dynamické moduly pružnosti (Rozdílná dávka cementu)

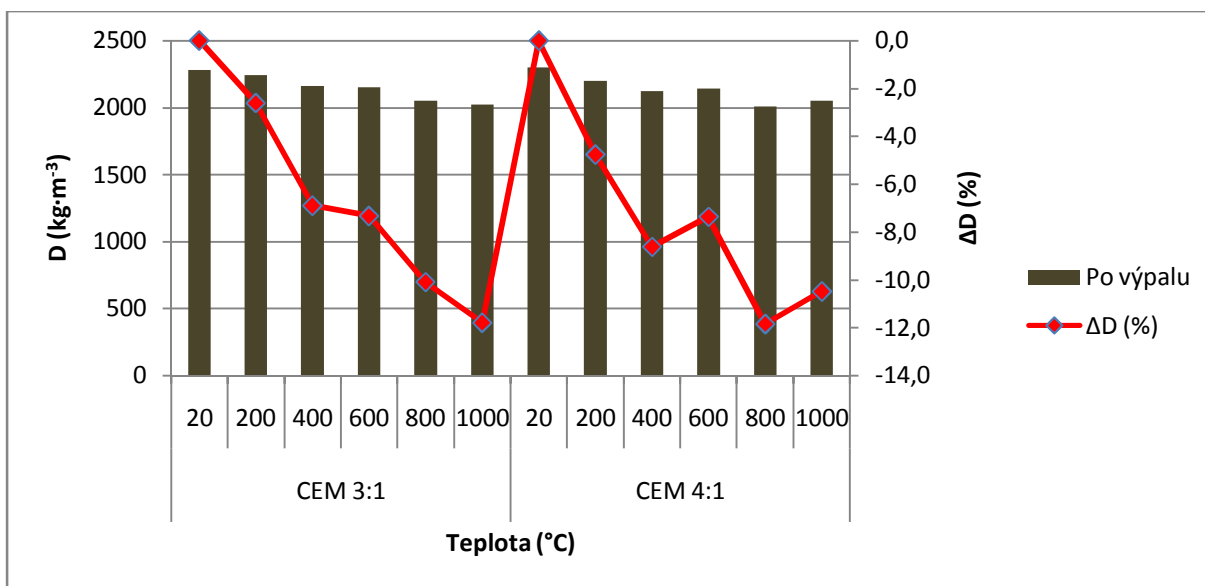
Graf 27- Porovnání vývoje dynamických modulů pružnosti po výpalu



U dynamických modulů pružnosti lze sledovat srovnatelné výsledky. Receptura s vyšším obsahem cementu vykazuje nižší procentuální pokles modulu pružnosti v důsledku zatížení vysokou teplotou.

Objemová hmotnost ztvrdlé malty (Rozdílná dávka cementu)

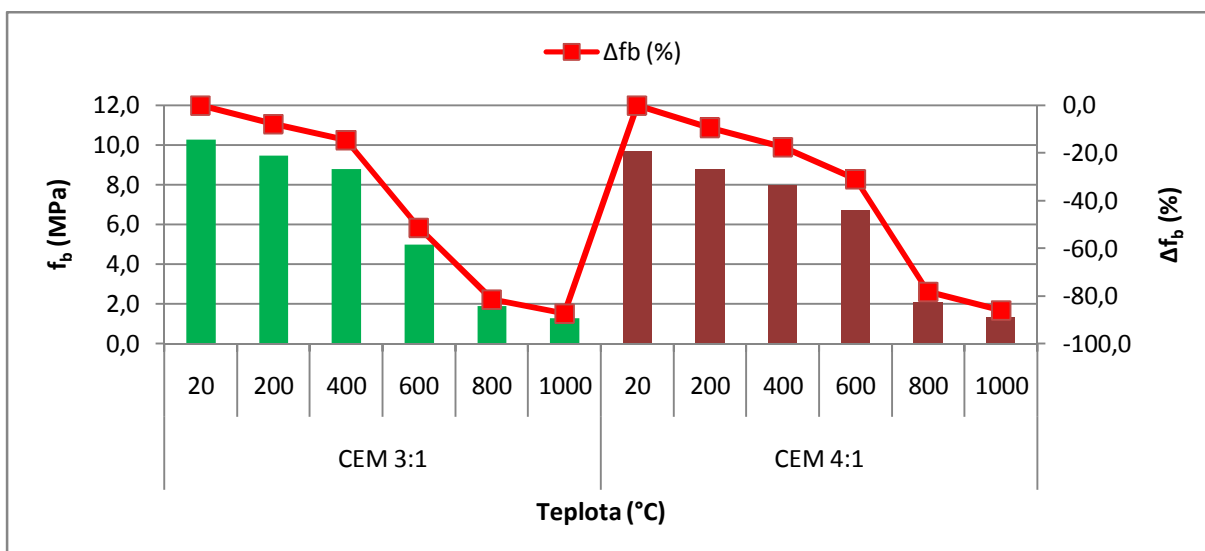
Graf 28- Porovnání objemových hmotností ztvrdlé malty po zatížení vysokou teplotou



Objemová hmotnost ztvrdlé malty vykazuje srovnatelné hodnoty. Při teplotě 1000 °C se zřejmě projevila vyšší dávka kameniva na požární odolnost. Pokles objemové hmotnosti je působen též vyhoříváním vláken.

Pevnost v tahu ohybem

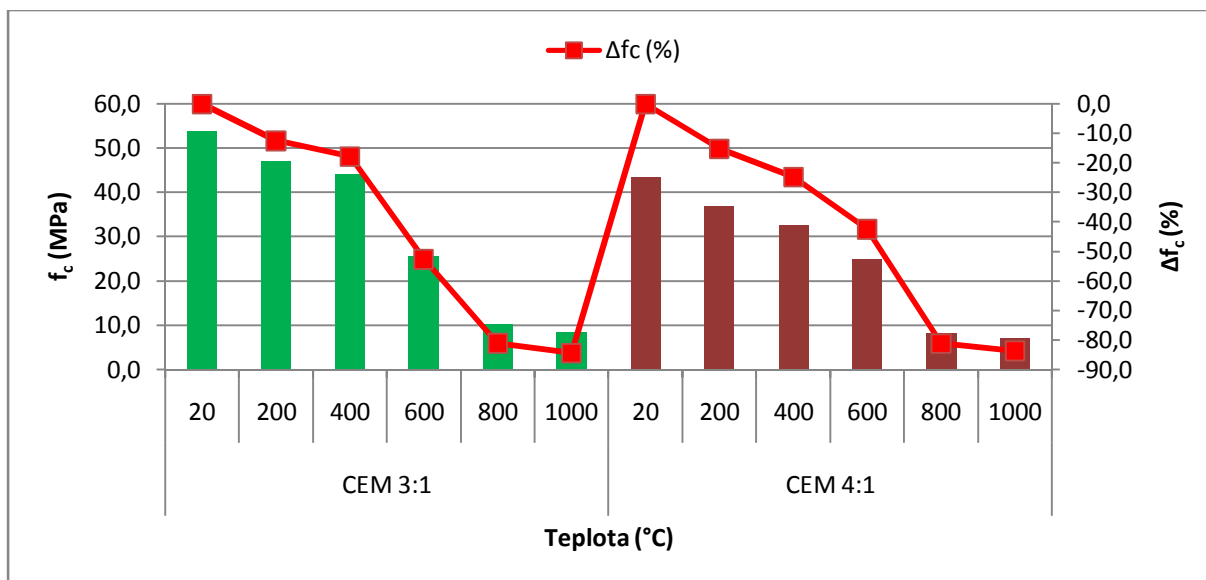
Graf 29- Porovnání pevností v tahu ohybem s rostoucí zatěžovací teplotou



Zvýšení pevnosti v ohybu je způsobeno dávkou vláken. Vliv množství cementu se zde projevuje jen nepatrně. Více se zde projevuje vliv vláken.

Pevnost v tlaku

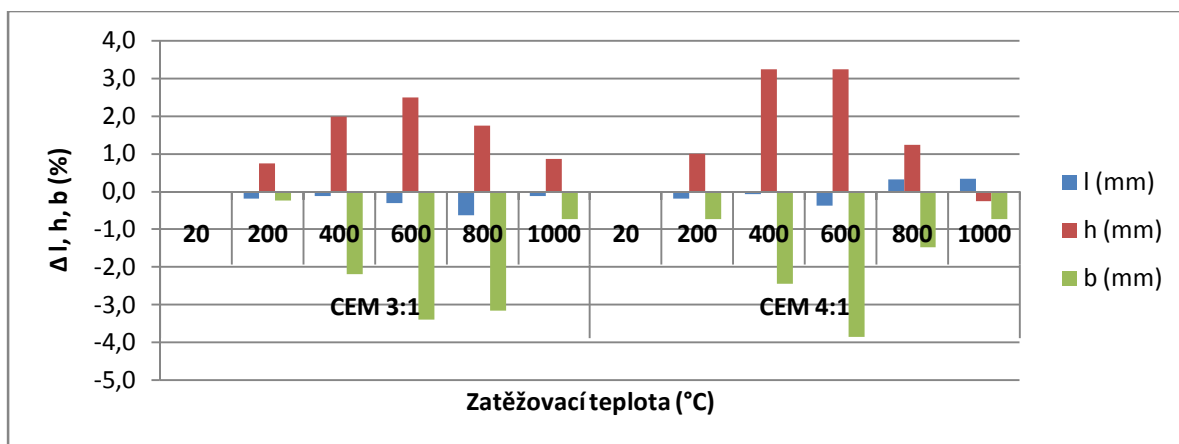
Graf 30- Porovnání pevností v tlaku při zatížení vysokými teplotami



U pevností v tlaku se již projevuje vyšší dávka cementu, která zajišťuje vyšší konečné pevnosti. Do jisté míry zde má vliv i použitá mikrosilika, která je dávkována v závislosti na množství cementu.

Změny rozměrů zkušebních těles způsobené zatížením vysokými teplotami

Graf 31- Procentuální změny rozměrů v důsledku zatížení vysokými teplotami



Při teplotním zatížení se projevuje výrazněji vliv vyššího obsahu kameniva, které má rozdílnou teplotní roztažnost než cementový tmel a dochází k výraznějším dilatacím.

15.5 SPRÁVKOVÉ MALTY S VYŠŠÍ ODOLNOSTÍ VŮČI EXTRÉMNÍM TEPLITÁM

Vyhodnocením všech grafických výstupů a výsledků pro výběr složek k výrobě správkové malty s odolností vůči vysokým teplotám byly navrženy receptury, k jejichž zhotovení byly vybrány optimální komponenty dle předchozích etap. Při míchání malty se postupně uvolňovala voda, která byla předem nasáknuta v popílkovém agloporitu. Složky byly nejprve míchány v suchém stavu, aby se mohla přidat voda podle potřeby pro dosažení ideální konzistence pro snadné zpracování a nanášení malty. Vodní součinitel byl upraven dle vlhkosti popílkového agloporitu. Vzorek nasáknutého agloporitu byl nejprve vysušen při teplotě 100 ± 5 °C a poté zvážen a stanovena vlhkost. Zhutnění zkušebních těles proběhlo na vibračním stole. Malta vizuálně vykazovala hutnou strukturu bez segregace kameniva. Při nabrání malty na lžici lze orientačně usuzovat na „lepivou konzistenci“ malty. Malta vykazuje dobrou přilnavost k podkladu a snadno se nanáší na zvolený povrch, aniž by se odlepovala či dokonce stékala. Konzistence zkouškou rozlitím se pohybuje v rozmezí 160 – 170 mm. Tato konzistence odpovídá plastické maltě. Popsané příznivé vlastnosti byly dosaženy u všech čtyř receptur, které se liší pouze volbou dávky siliky a použitého kameniva nebo jejich poměrů. Po vyzrání malty nebyl zaznamenán ani rozvoj smršťovacích trhlin v důsledku použití optimální dávky vláken.

Tabulka 26 – Receptura AG05S

Receptura-AG05S (5 % mikrosiliky)		
Složka	Dávka na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	480	0,46
Popílkový agloporit (1-4)	1441	
Polymerní vlákna	5	
Polymerní přísada (Vinnapas)	14	
Mikrosilika	24	
Voda	221	

Tabulka 27 – Receptura – AG10S

Receptura – AG10S (10 % mikrosiliky)		
Složka	Dávka na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	480	0,42
Popílkový agloporit (0-1)	750	
Popílkový agloporit (1-4)	693	
Polymerní vlákna	5	
Polymerní přísada (Vinnapas)	17	
Mikrosilika	59	
Voda	202	

Tabulka 28 – Receptura AŽ03S

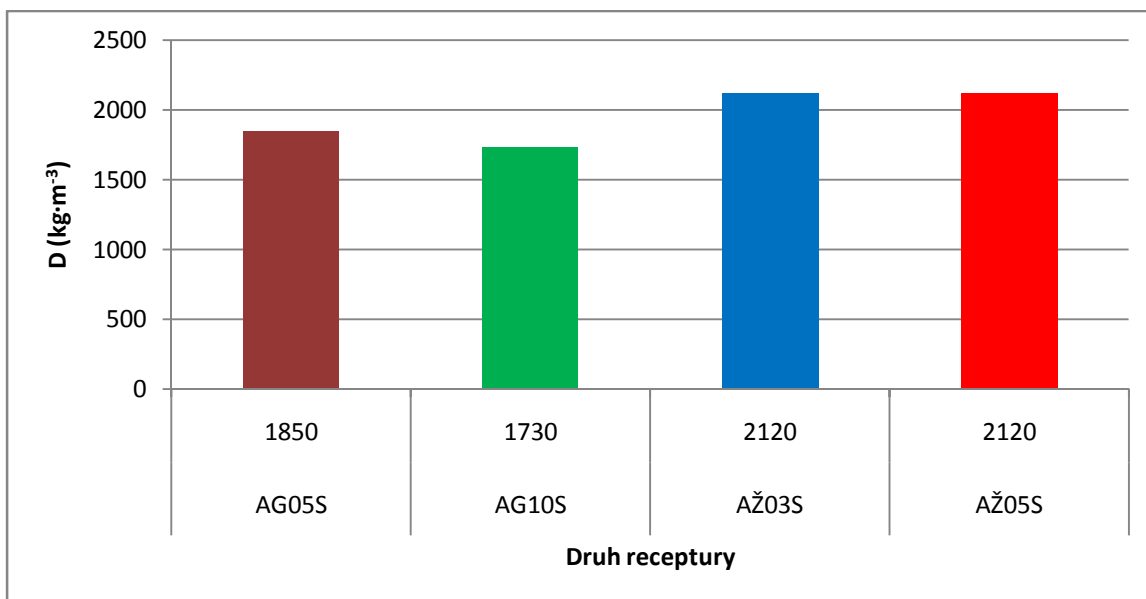
Receptura-AŽ03S (poměr kameniva 1:1)		
Složka	Dávka na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	586	0,43
Popílkový agloporit (0-1)	548	
Popílkový agloporit (1-2)	173	
Amfibolit (2-4)	1109	
Polymerní vlákna (P)	5	
Polymerní přísada (Vinnapas)	18	
Mikrosilika	18	
Voda	252	

Tabulka 29 – Receptura AŽ05S

Receptura-AŽ05S (poměr kameniva 1:1)		
Složka	Dávka na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	586	0,49
Popílkový agloporit (0-1)	548	
Popílkový agloporit (1-2)	173	
Amfibolit (2-4)	1109	
Polymerní vlákna (P)	5	
Polymerní přísada (Vinnapas)	18	
Mikrosilika	29	
Voda	287	

Objemová hmotnost čerstvých správkových malt

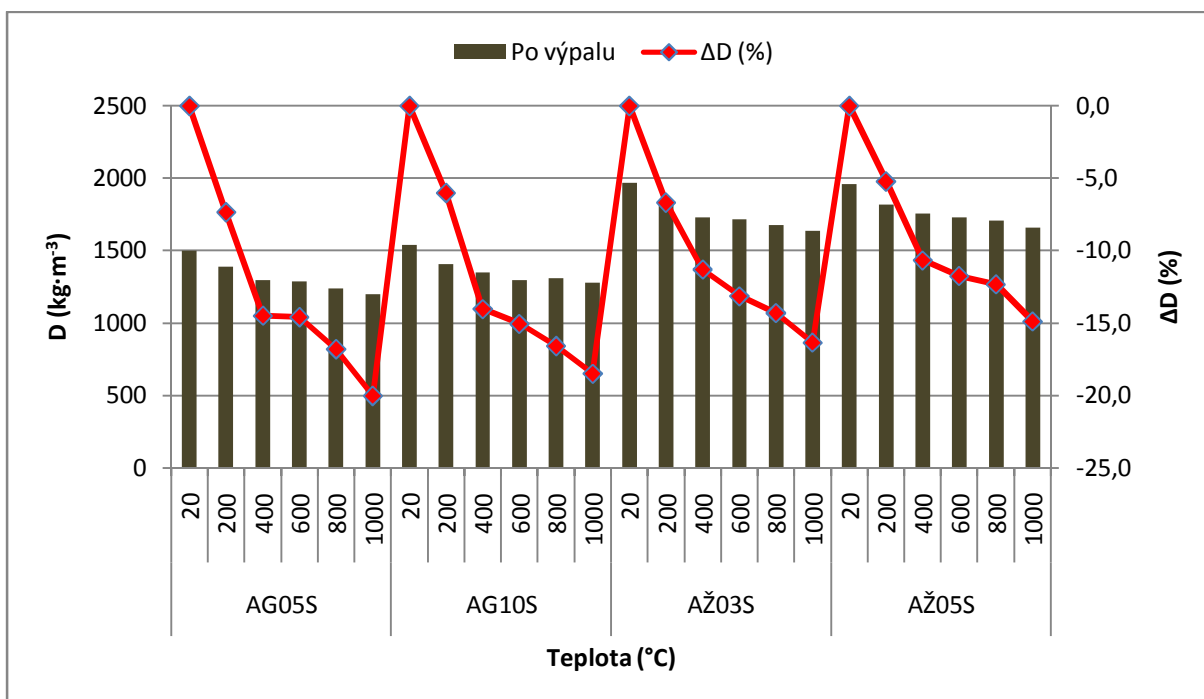
Graf 32- Porovnání objemových hmotností čerstvých malt



Objemová hmotnost čerstvých malt je v závislosti především na použitém kamenivu. Při dávkování Agloporitu a Amfibolitu 1:1 je tak dosaženo vyšší objemové hmotnosti než za použití pórovitého agloporitu.

Objemová hmotnost ztvrdlých správkových malt

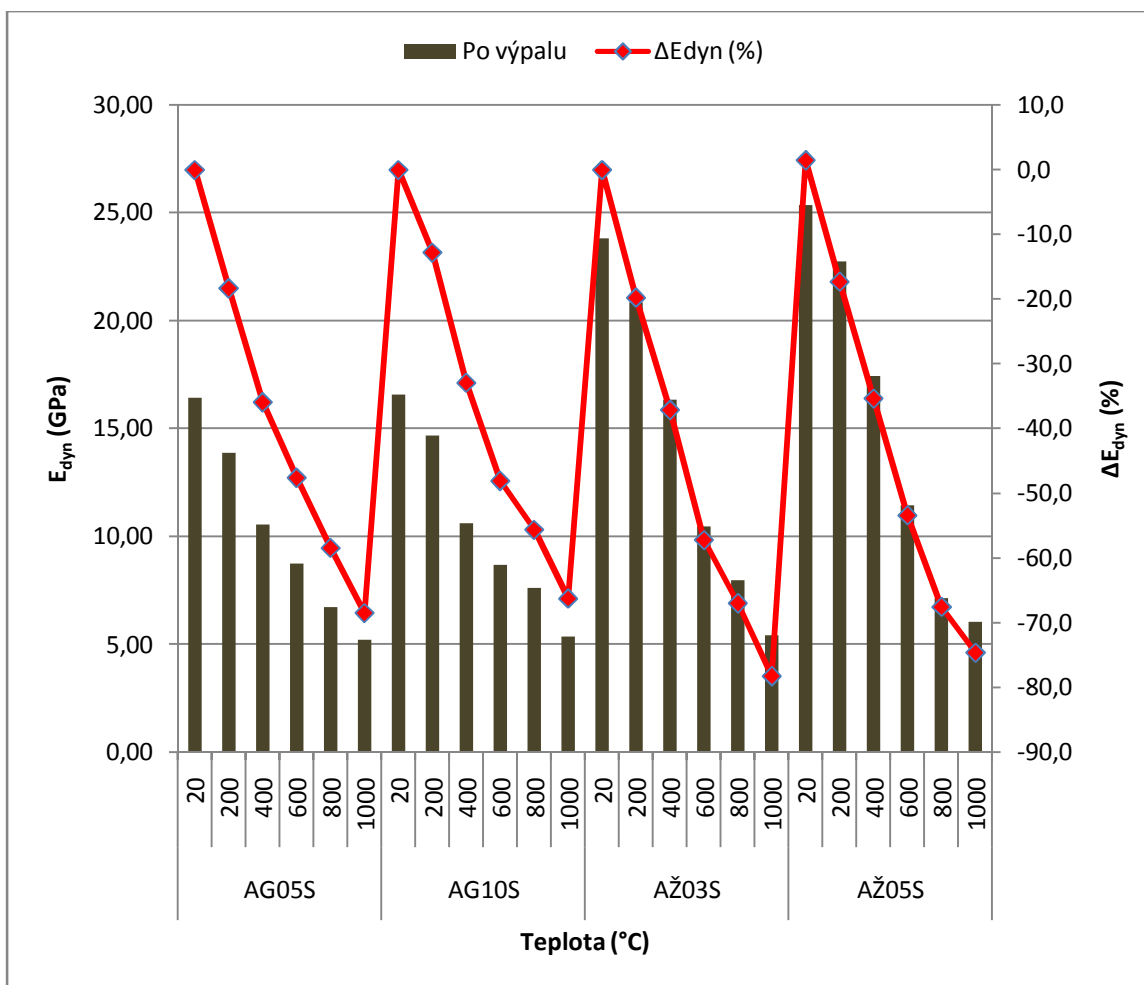
Graf 33- Porovnání objemových hmotností ztvrdlých malt po výpalu



Vliv poklesu objemové hmotnosti vlivem výpalu je srovnatelný v prvních fázích zatěžování vysokou teplotou, kdy se odpařuje voda a posléze se taví polyolefinová vlákna. V dalších fázích zatěžování se lépe projevuje receptura s mísením kameniva.

Dynamické moduly pružnosti

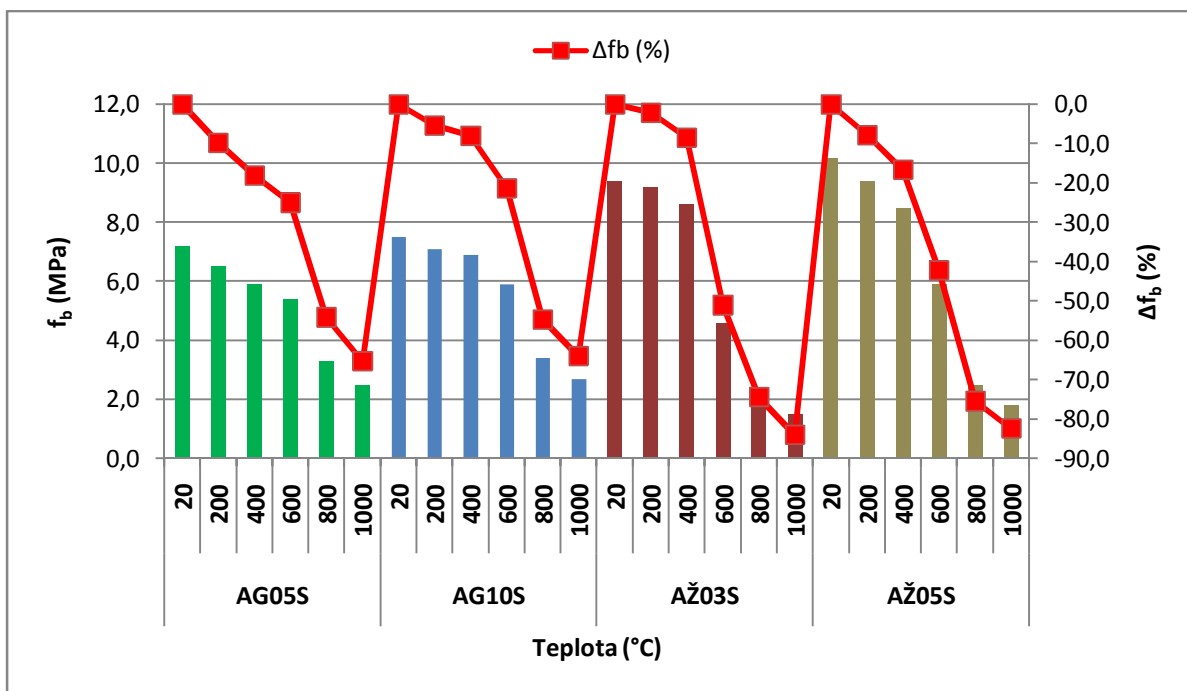
Graf 34-Porovnání dynamických modulů pružnosti v závislosti na vzrůstajících teplotách



Vliv rostoucí teploty na dynamické moduly pružnosti se projevuje spíše na straně malt, které využívají z části amfibolitů. Rozdílné dynamické moduly pružnosti byly způsobeny zřejmě rozdílnými moduly pružnosti kameniva. Z hlediska výběru receptury dosahuje receptura s amfibolitem optimálních vlastností pro použití do správkových malt odolných vůči vysokým teplotám. Stanovení dynamických modulů pružnosti patří k výhodným metodám z hlediska posouzení vlastností výrobku bez nutnosti použít destruktivních zkoušek.

Pevnost v tahu ohybem

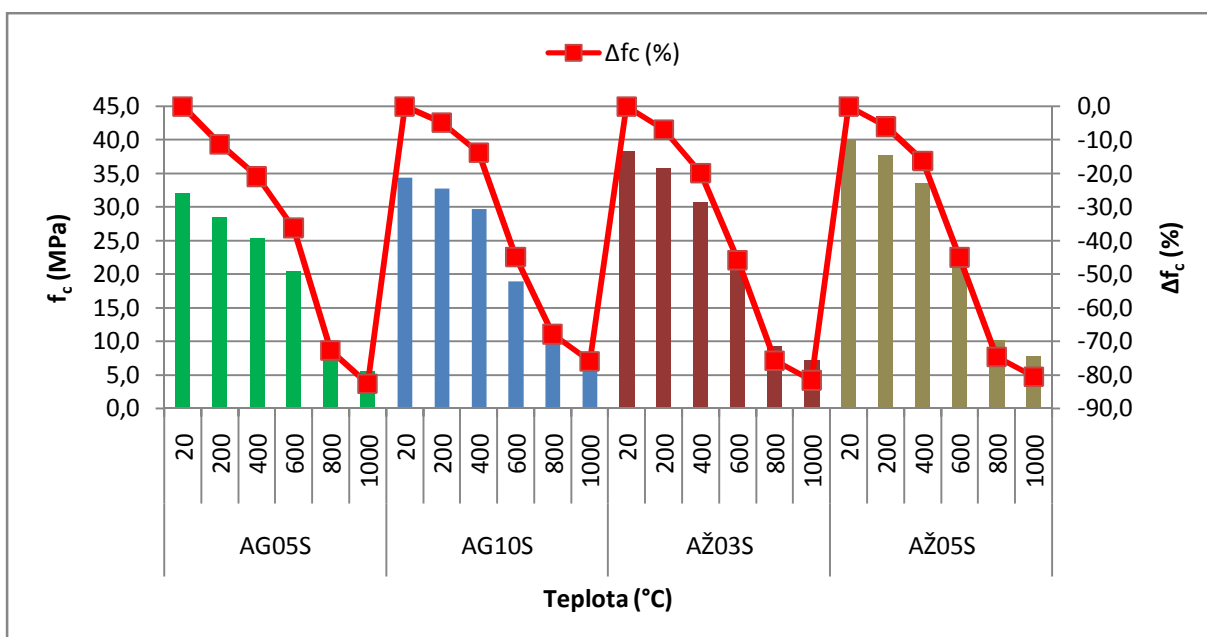
Graf 35- Porovnání pevností v tahu ohybem v závislosti na rostoucí teplotě



Počáteční hodnoty pevností v tahu ohybem dosahovaly poměrně vysokých hodnot, což souvisí mimo jiné s použitými vlákny. Vlivem vzrůstající teploty je sledován rapidnější úbytek pevností u receptury, která využívá amfibolit.

Pevnost v tlaku

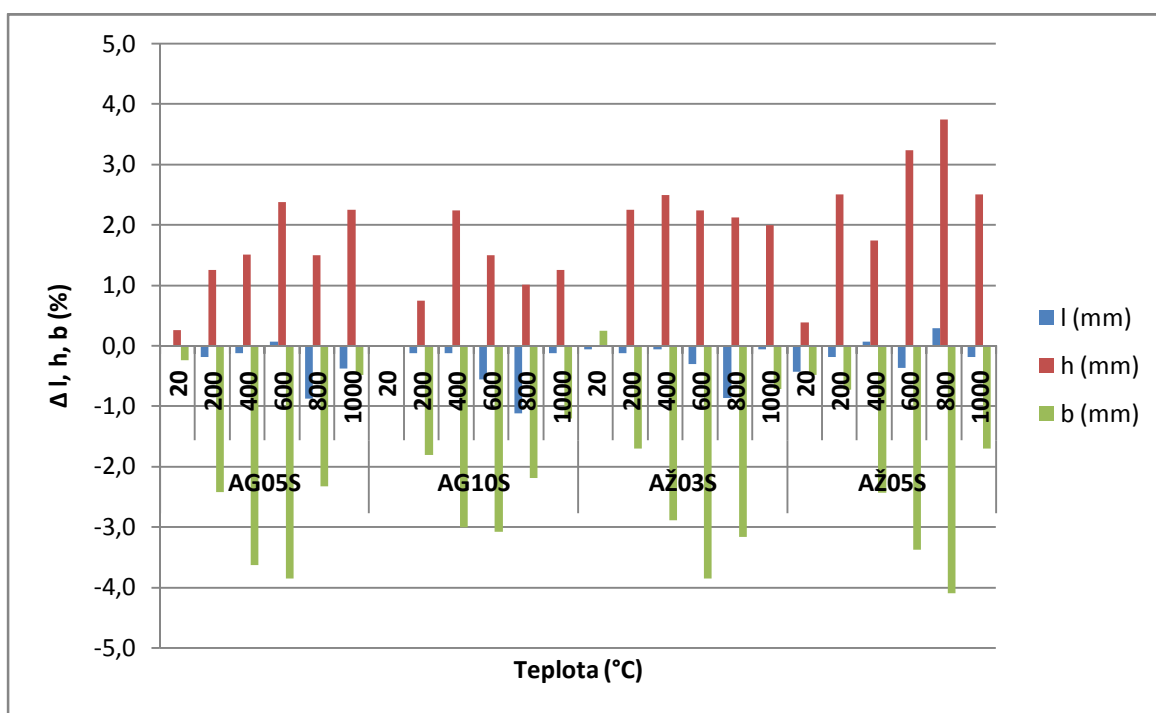
Graf 36- Porovnání pevností v tlaku v závislosti na zatěžovací teplotě



Pevnost v tlaku u receptur správkových malt s odolností vůči vysokým teplotám vykazuje přibližně stejný procentuální pokles pevností v tlaku, což je zapříčiněno dehydratací cementu a jeho objemovými změnami, které mohou dosahovat 0,5 %. Při objemových změnách dochází ke vzniku trhlinek a snížení pevnosti malty. Tato nepříznivá vlastnost se projevuje mezi hodnotami 400 až 600 °C. Velmi záleží také na dávce cementu. Požární odolnost hmoty ovlivňuje také tepelná vodivost kameniva. Hutné kamenivo má zpravidla vyšší tepelnou vodivost než pórovité, z čehož lze usuzovat, že při strmě vzrůstající teplotě může docházet k náhlým teplotním šokům a objemovým změnám ve struktuře malty. Vhodnou kombinací pórovitého a hutného kameniva je dosaženo srovnatelných výsledků při zatěžování vysokými teplotami. U nezatížených zkušebních těles hutné kamenivo přispívá navíc k vyšším pevnostem v tlaku, což je z hlediska požadavků na statickou funkci žádaný efekt.

Změny rozměrů

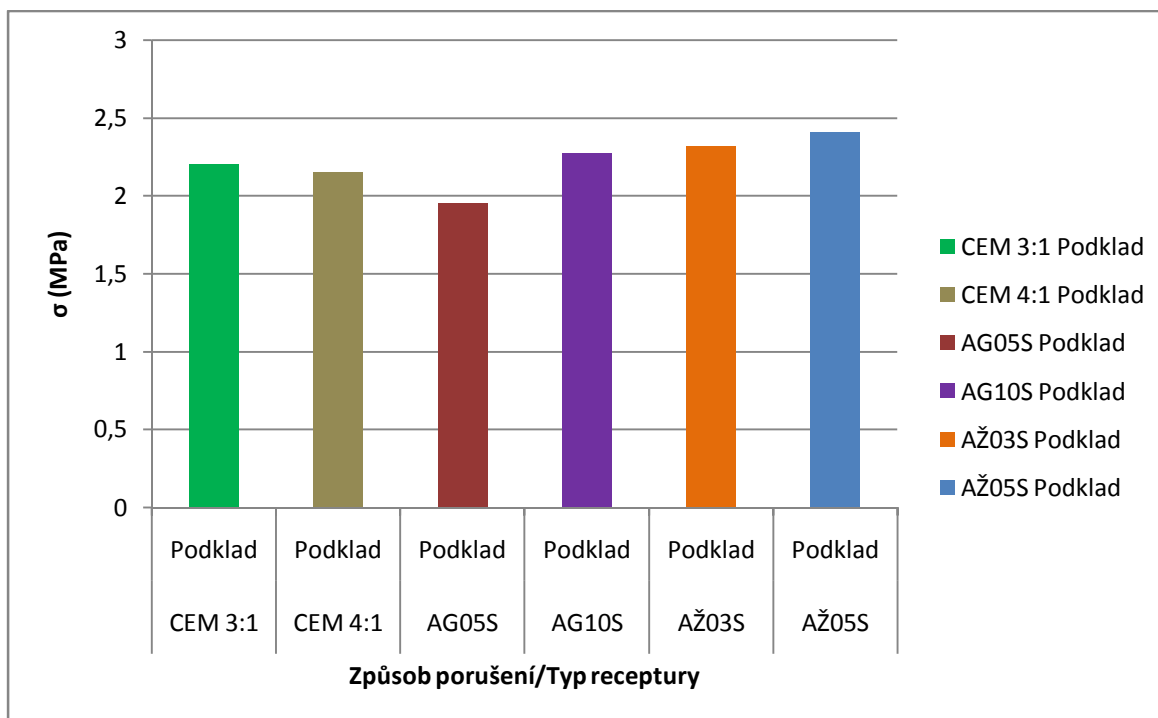
Graf 37-Procentuální změny rozměrů vlivem zatěžovací teploty



K výrazným smrštěním došlo u šířky zkušebních těles. Výška zkušebních těles se vlivem rostoucí teploty měnila v kladném směru, kde byl zaznamenán značný nárůst. Tepelná deformace měla minimální vliv na protažení zkušebního tělesa v podélném směru.

Soudržnost s podkladem

Graf 38- Porovnání soudržnosti s podkladem u správkových malt



Velmi důležitou vlastností správkových malt je jejich hodnota soudržnosti s podkladem. Zde se projevuje vliv dávky polymerní přísady, která tuto vlastnost modifikuje a zlepšuje tak výsledné hodnoty přídržnosti.

Všechny zkoušené správkové malty spadají do třídy R3 nebo R4 uvedené v tabulce č. 7. Malty s obsahem agloporitu a amfibolitu s označením AG10S, AŽ03S a AŽ05S by podle normy spadaly do třídy R3 se statickou funkcí.

Dle dosažených výsledků se projevil kladně poměr mísení pórovitého kameniva popílkového agloporitu s amfibolitem a prokázán byl pozitivní vliv na odolnost vůči vysokým teplotám. Z hlediska zpracovatelnosti malty se projevil pozitivně vliv polymerní přísady, stanovení vhodné křivky zrnitosti kameniva a především i optimální dávka mikrosiliky. Přídavkem siliky byla také modifikována jak počáteční, tak konečná pevnost malt.

Všechna zkušební tělesa byla nafocena a posuzována i vizuálně. Patrné byly i barevné rozdíly v maltách vystavených různým teplotám. U zkušebních těles vystavených teplotám nad 200 °C bylo patrné vyhoření polyolefinových vláken. Ve struktuře vznikly póry, kterými mohla unikat vodní pára a snižovalo se tak napětí v maltě.

16 VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES V PRŮBĚHU ZKOUŠEK



Obrázek 22 – *Fragment zkušebního tělesa při zkoušení vlivu kameniva živcového písku při teplotním zatížení 1000 °C*



Obrázek 23 – *Fragment zkušebního tělesa receptury AŽ05S s obsahem kameniva popílkového agloporitu a amfibolitu v poměru 1:1 a dávkou siliky 3 % z hmotnosti cementu po zatížení teplotou 1000 °C*

Při porovnání zlomku zkušebního tělesa na obr. 22 a 23 je patrný na první pohled rozdíl v celistvosti povrchu po zatížení vysokou teplotou 1000 °C. Zkušební těleso na obr. 22, které bylo vyrobeno bez použití polymerní přísady, vláken a siliky vykazovalo na bocích a hranách chybějící fragmenty malty, což je zřejmě způsobeno zabráněním úniku vodní páry strukturou hmoty a odprýskávání těchto částí tělesa, kdy je z fotografie patrné obnažení kameniva živcového písku na hranách zkušebního tělesa. Výrazné trhliny jsou způsobeny především modifikačními přeměnami křemene, kdy dochází k výrazným objemovým změnám kameniva, pnutí ve struktuře a rozvoji trhlin s následkem ztráty mechanických pevností malty. Výsledkem je ukázka, jak se může projevit nevhodný výběr kameniva na vlastnostech malty po zatížení vysokou teplotou.

Obr. 23 zachycuje zlomek zkušebního tělesa po zatížení teplotou 1000 °C. Povrch vykazuje celistvou strukturu bez výrazného vzniku trhlin. Receptura obsahuje polyolefonová vlákna, polymerní přísadu i siliku, kde je SiO_2 obsaženo v amorfnní formě, tudíž nepodléhá modifikační přeměně křemene. Vláknata projevila pozitivní efekt jak při zrání těles, kdy zabránila vzniku smršťovacích trhlin, tak ve stádiu zatěžování teplotou 1000 °C při jejich vyhoření a umožnění úniku vodní páry, způsobující tlak narušující strukturu malty.



Obrázek 24 – Lomová struktura receptury AŽ03S nezatížené bez teplotní zátěže

Na obrázku č. 24 je patrná struktura malty, kde jsou patrna polyolefinová vlákna, cementový tmel s jemnými podíly agloporitu. Tmavá frakce odpovídá amfibolitu z lomu v Želešicích.



Obrázek 25 – Barevné rozdíly pozorovatelné u receptury na lomových plochách AŽ03S v závislosti na teplotě, zleva 20, 400, 600, 1000 °C



Obrázek 26 – Lomová plocha receptury obsahující pouze kamenivo amfibolit. Sanační malta s poměrem kameniva ku cementu 4 : 1 (zatěžovací teplota 600 °C)

17 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Vliv vybrané polymerní přísady

Polymerní přísada byla dávkována v rozsahu 1 až 5 % z hmotnosti cementu. Zhodnocením výsledků lze zaznamenat, že dávka 5 % z hmotnosti cementu vykazuje v oblasti pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu nejpříznivějších vlastností. Z hlediska spotřeby polymerní přísady se naopak lze zaměřit spíše na dávku 3 %, u které byla zjištěna nejnížší objemová hmotnost, a mechanické pevnosti se příliš nelišily od dávky 5 %, proto byla zvolena dávka 3 %. Tímto výzkumem byla zároveň potvrzena dávka, kterou doporučuje výrobce. Chemická podstata je založena na polyvinylacetátu, jež je hojně využíván v oblasti správkových hmot. Při výrobě zkušebních těles se projevil pozitivně vliv přísady na přilnavost k podkladu, kdy bylo dosaženo dobře zpracovatelné plastické malty. Malta za použití polymerní přísady v množství 3 % z hmotnosti cementu získala mírně „lepivou“ konzistenci, která umožňuje snazší nanášení i na svislé povrchy, aniž by odpadávala nebo naopak stékala z místa nanesení. Výsledky zkoušky soudržnosti s podkladem prokázaly velmi příznivý vliv polymerní přísady od dávky 3 % z hmotnosti cementu. Vyšší dávky tuto vlastnost ovlivnily jen nepatrně, což z ekonomického hlediska postrádá účelnost pro použití vyšší dávky než 3 % z hmotnosti cementu.

Stanovení dávky vláken

Účelem polymerních vláken ve struktuře správkové malty je zamezit šíření smršťovacích trhlin při zrání malty a umožnění odpaření vázané vody, při zatížení vysokou teplotou ze struktury správkové malty, aniž by se mohl projevit efekt explozivního odprýskávání povrchových vrstev. Tato vlastnost se projevila při zkoušení vláken při teplotách 200, 300, 400, 500 °C. Při dávce 5 kg·m⁻³ pevnosti tlaku a v tahu ohybem nevykazovaly příliš výrazné ztráty, čímž je prokázána účelnost použití polyolefinových vláken Fobrofor High Grade a jejich přínos ke zvýšení požární odolnosti. Negativním jevem se stala ta skutečnost, že při dávce 5 kg/m³ dochází k mírnému zhoršení zpracovatelnosti, kdy se ovšem projevuje pouze delší doba míchání celé směsi, která se v tomto případě pohybuje v rozmezí 5 až 10 minut. Jako optimální byla shledána pro následující etapy řešení dávka 5 kg·m⁻³. Pozitivní vliv mají vlákna i na pevnost v tahu ohybem.

Výběr a ověření typu kameniva

Pro výrobu správkové malty byly zvoleny 4 typy kameniva. U všech byl proveden síťový rozbor dle ČSN EN 933-1. Dále byly zjištěny sypné hmotnosti volně sypaného kameniva typu Amfibolit Želešice, popílkový agloporit, živcový písek Bratčice a čedič dle ČSN EN 1097-3. Stanovením křivek zrnitosti byl účel přiblížit se ideální křivce zrnitosti EMPA, kdy bylo třeba použít i mísení různých druhů kameniv dle jejich obsahu jemných podílů, protože některá kameniva byla na tyto podíly „chudá“. Nejblíže se této křivce dle grafu přiblížil poměr mísení kameniv popílkového agloporitu a amfibolituv poměru 1:1. Mísení dávky popílkového agloporitu byla ještě dále upravena na mísení 24 % frakce 1-2 mm a 76 % 0-1 mm. Frakce amfibolitu byla použita 2-4 mm. Při zachování těchto poměrů kameniv je dosaženo nejhutnější struktury správkové malty. Současně je použitím pórovitého kameniva docíleno obsahu pórů, které se pozitivně podílí na teplotní odolnosti cementového kompozitu z hlediska úniku vody. Podle výsledků zkoušek bylo možné modifikovat receptury popř. určit poměr mísení jednotlivých kameniv. Zhotovením receptur s různými druhy kameniva lze prokázat rozdílné vlastnosti a chování těchto kameniv při požáru či zatížení vysokou teplotou. Písek z oblasti Bratčice, který je založen na bázi křemene, obsahuje převážně křemen v krystalické formě, což se projevuje zejména při teplotě 573 °C, kdy dochází k přeměně z modifikace α na modifikaci β , jež je doprovázena značnými objemovými změnami a tím také k destrukci struktury. Tyto změny mohly být sledovány u fragmentů zkušebních těles vystavených teplotě 600 °C a vyšších. Destrukce struktury na rozhraní cementové matrice a kameniva je patrna z fotografií v další etapě této práce zabývající se vizuálním zhodnocením zkušebních těles po zatížení vysokou teplotou. Jedná se o výrazné objemové změny kameniva, kdy při zatížení vysokou teplotou dochází k pnutí ve struktuře malty a následnému poškození struktury, což má za následek ztrátu mechanických pevností. Z grafických vyhodnocení výstupů práce je možné vysledovat značné poklesy mechanických pevností s rostoucí teplotou, kdy nebylo možno měřit ani moduly pružnosti, což vylučuje použitelnost kameniva na bázi krystalického křemene, v tomto případě živcového písku do hmot odolných vůči extrémním teplotám.

Receptury s čedičem se vyznačují nejvyššími pevnostmi, ale s rostoucí teplotou již nejsou v porovnání s ostatními kromě receptury obsahující kamenivo živcový písek Bratčice tak výrazné naopak při uvážení relativních poklesů pevnostních charakteristik bylo u receptur s agloporitem a amfibolitem dosaženo lepších výsledků, kdy např. při 1000 °C došlo u agloporitu poklesu pevnosti v tlaku o 82,5 %, ovšem u čediče o 88,5 % pevnosti.

Tento pokles u receptury obsahující čedič byl zřejmě způsoben jeho vysokou objemovou hmotností, která má vliv na tepelnou vodivost, tudíž mohlo v důsledku zatížení vysokou teplotou dojít k tepelnému šoku a porušení struktury na rozhraní kameniva a cementového tmele.

Z výsledků zkoušek lze vyvodit pozitivní přínos agloporitu pro výrobu správkové malty s odolností proti vysokým teplotám. Při výrobě správkové malty a jejím zrání postupně uvolňuje vodu, což způsobuje tzv. „samoošetřovací efekt“. Nedochází tak k výraznému rozvoji trhlin během zrání malty. Nízká tepelná vodivost je výhodná z hlediska malé náchylnosti k tepelným šokům během vystavení malty vysokým teplotám.

Stanovení optimální dávky cementu

Dávka cementu byla testována již na jedné z vyvíjených sanačních malt. Jednalo se o recepturu s obsahem pouze amfibolitického kameniva. Vliv množství cementu se neprojevil jako rozhodující faktor při vývoji správkové malty odolné vůči vysokým teplotám. Od teplot 600 °C výše lze výsledky pozorovat jako srovnatelné. Nepatrný vliv cementu mohl být pozorován pouze na změně konzistence, kdy při vyšší dávce se prodloužila doba míchání celé směsi. Při vyšší dávce cementu 3:1 bylo možné docílit pevnostních parametrů požadovaných pro třídu R4 dle tabulky č. 7 uvedené v teoretické části práce týkající se požadavků na sanační hmoty.

Vývoj sanačních malt odolných extrémním teplotám

Křemičité úlety Silikafume, které vznikají při výrobě Ferosilicia byly použity pro receptury obsahující kamenivo amfibolit a popílkový agloporit v poměru 1:1. Mikrosilika obsahuje amorfni fázi SiO_2 , tudíž nepodléhá objemovým změnám, které jsou charakteristické pro modifikační přeměny křemene v krystalické formě. Základním účelem přídavku mikrosiliky je dosažení vyšších konečných pevností a vyplnění pórovité struktury malty. Porovnáním s požadovanými základními parametry správkových hmot podle ČSN EN 1504-3 spadají receptury do oblasti správkové malty se statickou funkcí typu R3. Při zpracování správkové malty bylo dosaženo výborné „lepivé“ konzistence a rozlití 160 mm. Malta přilnula k zednické lžíci a dobře přilnula také k podkladu.

Optimálním řešením je receptura obsahující 3 % mikrosiliky a 5 % mikrosiliky s poměrem kameniv Amfibolitu a Agloporitu 1:1. Vliv 5 % mikrosiliky je v tomto případě nepatrný, což je možné vysledovat z výsledků práce a hodnot uvedených v grafech.

ZÁVĚR

Záměrem diplomové práce byl vývoj sanační malty s vyšší odolností vůči extrémním teplotám. Dle zadání práce bylo v první řadě třeba provést teoretický průzkum zejména z hlediska dostupných produktů tohoto typu a dále pak zahraničních výzkumných článků a studií zabývajících se obdobnou tematikou. Následně byly experimentálně ověřeny získané poznatky při návrhu receptur včetně posouzení jejich základních charakteristik při expozici v prostředí o teplotě až do 1000 °C.

Bylo zjištěno, že tuzemský trh nabízí různé druhy správkových hmot, z nichž některé jsou použitelné pouze v interiérech. Na trhu s těmito produkty je prostor pro vývoj nových hmot s odolností vůči vysokým teplotám. Správková malta, která má dominantní zastoupení na českém trhu je MC Nafufill 250 KM. V zahraničí se jedná především o malty používané jako protipožární izolace prostupů. Pro rozsáhlejší opravy je využívána správková malta Sicacrete F, která obsahuje kamenivo Vermikulit, který ve formě destiček dokáže zvětšit svůj objem až dvacetkrát a umožnit tak únik vodní páry.

Oblastí vývoje správkových malt se zabývá celá řada zahraničních vědeckých týmů, kde jsou vyvíjeny hmoty na bázi geopolymérů, různých druhů lehčených kameniv, jako jsou pyrophilit, perlit, vermikulit a jiná. Výstupy těchto výzkumů poukazují na možnost využití alternativních surovin. Výrobou správkových malt za použití geopolymérů lze zamezit přebytkovému úniku oxidu uhličitého do ovzduší, což při současné světové situaci, týkající se skleníkového efektu může znamenat velký přínos pro životní prostředí.

Shrnutím poznatků v oblasti vývoje správkových malt s odolností vůči vysokým teplotám včetně orientačního posouzení ekonomické stránky bylo shledáno jako potenciálně vhodné použití kameniv, které již podlehly tepelnému zatížení a současně umožňují spotřebu vedlejších produktů - popílkový agloporit v kombinaci s hutným kamenivem na bázi amfibolů. Vláknina byla vybrána ve spolupráci s INFRAM a.s. Konkrétně se jednalo o vlákna na bázi polyolefinu, Fibrofor High Grade s optimální zjištěnou dávkou $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Výběr vláken a stanovení jejich vhodné dávky výrazně napomáhá snížení tlaku vodní páry v mikrostruktuře hmoty a zamezení tak explozivnímu odprýskávání malty při vystavení vysokým teplotám.

V rámci experimentální části této práce byly vyvinuty tři typy správkových malt. Proměnnou složkou všech tří receptur bylo především kamenivo a dávka mikrosiliky.

V první řadě se jednalo o správkovou hmotu s obsahem kameniva pouze na bázi amfibolů, kdy bylo při vhodně zvolené dávce pojiva docíleno hmoty s parametry odpovídajícími dle ČSN EN 1504-3 třídě R4. Při snížení dávky cementového pojiva bylo docíleno malty s parametry třídy R3. Tímto by bylo možné dosáhnout výrazné ekonomické úspory. Ostatní receptury byly testovány již pouze s vyšší dávkou pojiva. Dále se jednalo o recepturu s obsahem výhradně popílkového agloporitu, kdy bylo možné vyrobit maltu odpovídající třídě R3. Posledním vyvinutým typem správkové hmoty byla receptura s kombinací agloporitu a kameniva na bázi amfibolitů, zde byly stanoveny parametry taktéž odpovídající třídě R3, ovšem z hlediska pevnosti v tlaku by bylo možné vhodnou úpravou pravděpodobně docílit i třídy R4. Z hlediska uvažení kombinace všech parametrů, tedy i včetně zpracovatelnosti (přilnavosti v čerstvém stavu, nanášení atd.) lze nejlépe hodnotit receptury obsahující kombinaci popílkového agloporitu frakce 0-2 mm a amfibolitů frakce 2-4 mm. Z hlediska využití v praxi, lze při určitých podmínkách aplikace malt shledat jako úskalí nutnost saturace pórovitého kameniva v dostatečném časovém předstihu ještě před mísením jednotlivých složek.

Parametry správkové malty s obsahem amfibolitu a poměrem kameniva k cementu 3:1 jsou srovnatelné s hodnotami vyráběné malty MC Nafufill 250 KM v porovnání s technickými listy této běžně vyráběné požárně odolné sanační malty. Hodnota pevnosti v tlaku MC Nafufill 250 KM ve stáří 28 dní je 55 MPa. Receptura CEM 3:1 vykazovala hodnotu 53,8 MPa, což je srovnatelná hodnota. Dynamický modul pružnosti byl vyšší než u MC Nafufill 250 KM, kde je v technických listech uvedena hodnota 32 GPa. Receptura CEM 3:1 vykazovala hodnotu 36 GPa. Podstatný rozdíl v běžně vyráběné maltě a nově vyvinuté je v použité frakci kameniva. MC Nafufill 250 KM obsahuje nejvyšší frakci 2 mm, jedná se o jemnozrnnou maltu. Receptura CEM 3:1 obsahuje frakci o velikosti maximálního zrna 4 mm. Porovnávána byla pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem a dynamický modul pružnosti. Pevnost v tlaku vyvinuté malty je nižší, což lze modifikovat např. vyšší dávkou mikropříměsí. Ostatní parametry jsou srovnatelné s běžně vyráběnou maltou od MC Bauchemie.

Z hlediska ekonomického je výroba vyvinuté správkové malty odolné vůči vysokým teplotám méně náročná z důvodu dostupnosti surovin a jejich přepravy z lokalit v ČR a jejich dostatečnými zásobami. Výzkumem byly stanoveny optimální dávky polymerní přísady, mikropříměsí a vláken, aby nedocházelo k zbytečnému předimenzování, které by nemělo na výsledné vlastnosti vliv nebo jen nepatrný a zvyšovaly se tak zbytečně náklady na výrobu.

Ekologický aspekt výroby této malty zahrnuje jak těžbu surovin, tak náročnost na jejich přepravu a následnou výrobu. Z tohoto hlediska nabízí vyvinutá malta velký přínos pro životní prostředí. Využívá kameniv dostupných v dané lokalitě. Navíc popílkový agloporit je vyráběn z vedlejších energetických produktů. Snižuje se tak zatížení ovzduší dopravou i náročnou těžbou surovin.

Všechny tři vyvinuté receptury lze doporučit pro navazující výzkum zabývající se případnou další optimalizací směsi – úpravy dávky některých složek či křivek zrnitosti kameniv. Dále se jeví jako podstatné ověření a posouzení ostatních parametrů malt v návaznosti na požadavek ČSN EN 1504-3 (tabulka č. 7) – mrazuvzdornost, stanovení chloridů, náporové skrápění atd.

POUŽITÉ ZDROJE

LITERATURA

- [1] BYDŽOVSKÝ, J., *Technologie sanace*, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební v Brně, 2007
- [2] HELA, R., *Technologie betonu*, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005
- [3] DROCHYTKA, R., DOHNÁLEK, J., BYDŽOVSKÝ, J., PUMPR, V., DUFKA, A., DOHNÁLEK, P., *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III*. Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012. ISBN 978-80-260-2210-7. (CS)
- [4] PYTLÍK, P., *Technologie betonu*. VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [5] HELA, R., *Technologie betonu II*, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební 2007
- [6] ANAGNOSTOU, G., EHRBAR, H., *WorldTunnelCongress 2013 Geneva Underground – the way to the future!*, Taylor & Francis Group, London 2013. ISBN 978-1-138-00094-0.

ODBORNÉ ČLÁNKY

- [7] SERDAR, A., Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice [online], [Fire Safety Journal 43 (2008) 610–617]. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>
- [8] SERDAR, A., BÜLENT, B., Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars [online], [Cement and Concrete Research 37 (2007) 988–995]. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>
- [9] JONG-PIL, W., SEK-WON, CH., SANG-WOO, L., CHANG-II, J., SU-J., Mix proportion and properties of fire-resistant wet-mixed high-strength polypropylene fiber-reinforced sprayed polymer cement composites [online], [Composite Structures 92 (2010) 2166–2172 Contents lists]. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>

[10] JONG-PIL, W., HEE-BYOUNG, K., SU-JIN, L., SANG-WOO, L., JOO-WON, K., Thermal characteristics of high-strength polymer–cement composites with lightweight aggregates and polypropylene fiber [online], [Construction and Building Materials 25 (2011) 3810–3819]. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>

[11] SE JIN CHOI., SOO-HWAN, K., SU-JIN, L., ROSA, W., JONG-PIL, W., Mix proportion of eco-friendly fireproof high-strength concrete [online], [Construction and Building Materials 38 (2013) 181–187]. Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com>

[12] VAN DEN BOSSCHE, B., P., Fire resisting concrete [online]. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>

NORMY

[13] ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky, Český normalizační institut 2000

[14] ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010

INTERNET

[15] <http://www.bruggcontec.com>

[16] www.pozarniodolnost.cz

[17] www.betontks.cz

[18] www.tvstav.cz

[19] www.mc-bauchemie.cz

[20] www.mc-bauchemie.sk

[21] www.caprocb.cz

[22] www.basf-cc.sk

[23] www.sto.cz

[24] www.sika.com

[25] www.pyroplex.com

[26] <http://www.izolace-info.cz>

[27] <http://www.dap.com>

- [28] <http://sti.fmpdata.net>
- [29] www.hermes-technologie.com
- [30] www.geologie.vsb.cz
- [31] <http://www.absbilina.cz>
- [32] <http://www.incon-f.cz>
- [33] <http://www.stavmachem.cz>
- [34] Technické listy FibroforHigh Grade
- [35] <http://www.wacker.com>
- [36] <http://www.bauton.cz>
- [37] www.cmbeton.cz
- [38] <http://stavba.tzb-info.cz>
- [39] <http://www.konceptcb.cz>
- [40] <http://www.vscht.cz>
- [41] <http://www.earch.cz>
- [42] <http://www.heidelbergcement.com>
- [43] <http://books.google.cz>
- [44] <http://www.geology.cz>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – <i>Shrnutí vlastností nechráněných konstrukčních materiálů vystavených požáru</i> [17]	11
Tabulka 2 – <i>Požadavky na požární bezpečnost ve vztahu k betonu</i> [17].....	11
Tabulka 3 – <i>Tři hlavní kritéria požární ochrany podle Eurokódu 2, části 1-2.</i> [17]	12
Tabulka 4 – <i>Technické hodnoty MC Nafufill 250 KM</i> [19]	16
Tabulka 5 – <i>Parametry StoCrete TS 100</i> [23]	17
Tabulka 6 - <i>Technické údaje EMACO S88</i> [22]	18
Tabulka 7 – <i>Požadované základní parametry správkových hmot podle ČSN EN 1504-3</i> [3]	26
Tabulka 8 – <i>Fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti cementu a strusky (GGBFS)</i> [7].....	30
Tabulka 9 – <i>Chemické složení cementu a GGBFS</i> [7]	31
Tabulka 10 – <i>Fyzikální a chemické vlastnosti pemzy</i> [7]	31
Tabulka 11 – <i>Návrh směsí</i> [7].....	31
Tabulka 12 – <i>Výsledné pevnosti v tlaku všech směsí</i> [7].....	32
Tabulka 13 - <i>Výsledné pevnosti v tahu za ohybu všech směsí</i> [7].....	32
Tabulka 14 - <i>Fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti popílku</i> [8]	36
Tabulka 15 - <i>Návrh směsí</i> [8]	36

Tabulka 16 – Hodnoty rozlití (ČSN EN 1015-3).....	55
Tabulka 17 – Stanovení sypné hmotnosti.....	56
Tabulka 18- <i>Receptura malty</i>	69
Tabulka 19- <i>Receptura malty pro stanovení optimální dávky polyolefinových vláken</i>	72
Tabulka 20 - <i>Receptura Živcový písek</i>	76
Tabulka 21 - <i>Receptura Amfibolit</i>	76
Tabulka 22 - <i>Receptura popílkový agloporit</i>	76
Tabulka 23 - <i>Receptura Čedič</i>	76
Tabulka 24- <i>Návrh receptur pro záměsi s rozdílnou dávkou cementu 3:1</i>	80
Tabulka 25- <i>Návrh receptur pro záměsi s rozdílnou dávkou cementu 4:1</i>	80
Tabulka 26 – <i>Receptura AG05S</i>	84
Tabulka 27 – <i>Receptura – AG10S</i>	85
Tabulka 28 – <i>Receptura AŽ03S</i>	85

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – <i>Normová teplotní křivka [13]</i>	15
Graf 2 – <i>Požární křivky dle různých kritérií[24]</i>	20
Graf 3 – <i>Relativní zbytková pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu FC a SC malt [7]</i>	33
Graf 4 – <i>Relativní zbytková pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu FC a SC malt [7]</i>	33
Graf 5 - <i>RTG difrakční analýza GGBFS0 SC malty při 20 °C a 900 °C [7]</i>	34
Graf 6 - <i>RTG difrakční analýza GGBFS60 SC malty při 20 °C, 300 °C, 600 °C a 900 °C [7]</i>	34
Graf 7 – <i>Relativní zbytková pevnost v ohybu malt chlazených vzduchem[8]</i>	37
Graf 8 – <i>Relativní zbytková pevnost v tlaku malt chlazených vzduchem[8]</i>	37
Graf 9 – <i>Relativní zbytková pevnost v tlaku malt chlazených vodou[8]</i>	37
Graf 10 – <i>Relativní zbytková pevnost v ohybu malt chlazených vodou[8]</i>	37
Graf 11 – <i>RTG difrakční analýza cementového tmele (60 % FA) při 20 °C</i>	38
Graf 12 – <i>RTG difrakční analýza cementového tmele (60 % FA) při 900 °C</i>	38
Graf 13 – <i>Předběžný experimentální plán [9]</i>	39
Graf 14 – <i>Termogravimetrická analýza polymer-cementového kompozitu s různými lehkými kamenivý [10]</i>	41
Graf 15 – <i>Sledování vnitřní teploty [11]</i>	43
Graf 16 – <i>Teplotní křivky zaznamenané během zkoušky v malém měřítku [6]</i>	45
Graf 17- <i>Vliv teploty na pevnost v tahu ohybem v závislosti na dávce polyolefinových vláken</i>	73
Graf 18- <i>Porovnání pevností v tlaku v závislosti na dávce vláken a rostoucí teplotě</i>	74
Graf 19- <i>Procentuální změna rozměrů v důsledku rostoucí teploty</i>	74

Graf 20-Porovnání objemových hmotností čerstvých malt dle druhu použitého kameniva.....	77
Graf 21- Porovnání hodnot dynamických modulů pružnosti po zatížení vysokými teplotami .	77
Graf 22- Porovnání objemových hmotností ztvrdlé malty.....	78
Graf 23-Porovnání pevností v tahu ohybem při zatížení vysokými teplotami	78
Graf 24-Porovnání pevností v tlaku v závislosti na rostoucí teplotě	79
Graf 25-Porovnání rozměrových dilatací zkušebních těles.....	79
Graf 26-Objemové hmotnost čerstvých malt s různým podílem cementu	81
Graf 27- Porovnání vývoje dynamických modulů pružnosti po výpalu	81
Graf 28- Porovnání objemových hmotností ztvrdlé malty po zatížení vysokou teplotou	82
Graf 29-Porovnání pevností v tahu ohybem s rostoucí zatěžovací teplotou	82
Graf 30- Porovnání pevností v tlaku při zatížení vysokými teplotami	83
Graf 31-Procentuální změny rozměrů v důsledku zatížení vysokými teplotami	83
Graf 32- Porovnání objemových hmotností čerstvých malt	86
Graf 33- Porovnání objemových hmotností ztvrdlých malt po výpalu.....	86
Graf 34-Porovnání dynamických modulů pružnosti v závislosti na vzrůstajících teplotách....	87
Graf 35- Porovnání pevností v tahu ohybem v závislosti na rostoucí teplotě	88
Graf 36-Porovnání pevností v tlaku v závislosti na zatěžovací teplotě.....	88
Graf 37-Procentuální změny rozměrů vlivem zatěžovací teploty	89
Graf 38- Porovnání soudržnosti s podkladem u správkových malt	90

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- Příklad betonových prvků po požáru. Odštěpení betonu je jasně patrné [17].....	12
Obrázek 2 – Postup návrhu požární odolnosti konstrukcí[17].....	13
Obrázek 3 – Budova byla požárem zcela zničena, IECA, Španělsko[17]	13
Obrázek 4- Požár v budově Windsor Tower, Madrid [17].....	13
Obrázek 5 – Příklad systémů použití sanační malty Sicacrete [24]	19
Obrázek 6-Technické řešení prostupu potrubí betonovým stropem a stěnou[28]	20
Obrázek 7-Řešení průchodu vzduchotechniky podlahou pomocí protipožární malty [25].....	21
Obrázek 8 – Mokřý způsob nanášení správkové hmoty stříkáním [29]	26
Obrázek 9 – Nanášení inhibitoru koroze na před upravený povrch betonové konstrukce [41]	28
Obrázek 10 – SEM analýza pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu GGBFS0 a GGBFS60 při teplotě 900 °C; a) Cementový tmel; b) ITZ. [7]	35

Obrázek 11- <i>Typický vzor porušení polymer-cementového kompozitu po zkoušce požární odolnosti</i> [9].....	40
Obrázek 12 – <i>a) Perlit, b) Vermikulit, c)Pyrophyllit</i>	41
Obrázek 13 – <i>Fotografie vláknobetonu. Byly použity různé super-plastifikátory. Některé z nich zvýšily obsah vzduchu až na 3,6 %. Při použití jiných typů plastifikátorů činil obsah vzduchu na 1,5 až 2%.</i> [12]	44
Obrázek 14 – <i>Zatěžování prvku v peci</i> [6].....	45
Obrázek 15 - <i>Schematické znázornění postupu řešení DP</i>	48
Obrázek 16- <i>Pevnost v tahu ohybem zkušebního tělesa (160x40x40 mm)</i>	64
Obrázek 17- <i>Vyhovující způsoby porušení zkušebních těles</i>	65
Obrázek 18 – <i>Ukázka destruktivní zkoušky porušení pevnosti zkušebního tělesa tlakem</i>	66
Obrázek 19 – <i>Ukázka typického porušení zkušebního tělesa tlakem</i>	66
Obrázek 20 - <i>Ukázka odtrhové zkoušky</i> [39].....	68
Obrázek 21- <i>Vliv rostoucí teploty na poškození zkušebních těles v tlaku za použití polyolefinových vláken (názorná ukázka poškození malty po vyjmutí z lisu) zprava 20; 200; 300; 400; 500 °C</i>	75
Obrázek 22 – <i>Fragment zkušebního tělesa při zkoušení vlivu kameniva živcového písku při teplotním zatížení 1000 °C</i>	91
Obrázek 23 – <i>Fragment zkušebního tělesa receptury AŽ05S s obsahem kameniva popílkového agloporitu a amfibolitu v poměru 1:1 a dávkou siliky 3 % z hmotnosti cementu po zatížení teplotou 1000 °C</i>	91
Obrázek 24 – <i>Lomová plocha s patrnou ukázkou stopy po vyhořelém vlákně při teplotě 1000 °C receptury AŽ05S</i>	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 25 – <i>Lomová struktura receptury AŽ03S nezatížené bez teplotní zátěže</i>	92
Obrázek 26 – <i>Barevné rozdíly pozorovatelné u receptury na lomových plochách AŽ03S v závislosti na teplotě, zleva 20, 400, 600, 1000 °C</i>	93

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ISO: International Standard Organization.....	13
PCC: Polymercementová malta	14
FC: Fast cooled.....	32
SC: Slow cooled.....	32

SEM:Rastrovací elektronový mikroskop.....	35
PVAc:Polyvinylacetát.....	49
ρ_b : Sypná hmotnost.....	56
T: Teplota.....	59
t: Teplota.....	59
f_c : Pevnost v tlaku.....	70
f_b : Pevnost v tahu ohybem	71
E_{dyn} : Dynamický modul pružnosti.....	71

SEZNAM PŘÍLOH

Titulní list

Originál zadání DP

Abstrakt v českém a anglickém jazyce, klíčová slova v českém a anglickém jazyce

Bibliografická citace VŠKP

Prohlášení autora o původnosti práce

Poděkování

Popisný soubor práce

Shoda elektronické a tištěné formy práce