

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT
A DÍLCŮ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

VÝZKUM A VÝVOJ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S VYŠŠÍ REZISTENCÍ VŮČI PŮSOBENÍ VYŠŠÍCH TEPLOT

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF COMPOSITE MATERIALS WITH HIGHER RESISTANCE TO
HIGH TEMPERATURES

DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JAROSLAV VÁLEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2014

Abstrakt

Co se týče požárního hlediska, má beton řadu výhodných vlastností. Je nehořlavý a má nízkou tepelnou vodivost. Avšak betonové konstrukce, které nejsou navrhovány s odolností proti požáru, vykazují po ohřevu výrazné poškození. Především se jedná o explozivní odprýskávání, jehož následkem je oslabení průřezu dané železobetonové konstrukce a vystavení ocelové výztuže teplotám, které jsou vyšší než kritická teplota výztuže.

Možných opatření na zabránění nebo zmírnění následků teplotního zatížení betonů je používáno jen několik. Způsoby ochrany lze rozdělit na dva systémy, aktivní a pasivní. Aktivní systémy mají zajistit co možná největší pokles působících teplot. Pasivní systémy již přímo odolávají působícím vysokým teplotám a ohni. Mezi pasivní systémy se řadí i vlastní návrh složení betonu s cílem zajistit vyšší odolnost vůči působení vysokých teplot.

Část práce je věnována souhrnným rešerším věnovaným problematice betonových a železobetonových konstrukcí při zatížení vysokými teplotami a účinky požáru. Cílem práce je definování požadavků na složky kompozitního materiálu s cementovou maticí a jeho návrh pro zajištění co možná největší odolností vůči působení vysokých teplot, resp. přímému ohni.

Klíčová slova

Cementový kompozit, rozptýlená výztuž, vysoké teploty, teplotní zatížení, teplotní křivka, explozivní odprýskávání, porucha, trhлина.

Abstract

Concrete has many advantageous properties as regards resistance to fire. It is non-flammable and it has a low thermal conductivity. However, concrete structures, which are not designed for resistance against fire, show significant damage after heating. In particular, the explosive flaking with the consequence of weakening the reinforced concrete cross-section and exposing the steel reinforcement to the temperatures higher than critical temperature of reinforcement.

There are only a few possible measures of preventing or mitigating the effects temperature load used. Ways of protection can be divided into two systems: active and passive. Active systems are designed to ensure the greatest possible reduction of temperatures the concrete is exposed to. Passive systems directly resist to high temperatures and fire. Design of composition of concrete with the aim of higher resistance to exposition to high temperatures belongs among the passive systems.

A part of the work focuses on summary searches of the problems of concrete and reinforced concrete structures exposed to high temperatures and fire. The goal of the work is defining requirements for cement matrix based composite material and its design ensuring the highest possible resistance to high temperatures or direct fire.

Keywords

Cementitious composites, fiber reinforcement, high temperatures, thermal load, the curves of temperature-time exposure, explosive spalling, defect, crack.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÁLEK, J., *Výzkum a vývoj kompozitních materiálů s vyšší rezistencí vůči působení vyšších teplot: disertační práce*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Brno, 2014, 188 s, Vedoucí disertační práce: Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování:

Rád bych poděkoval školitelce Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení a podporu při řešení disertační práce. Dále bych rád poděkoval kolektivu Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, který přispěl cennými radami a připomínkami při zpracování této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé ženě a rodičům za jejich velkou psychickou podporu projevenou nejen při dokončování této práce.

OBSAH:

1.	ÚVOD.....	- 10 -
2.	SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ ODBORNÉ PROBLEMATIKY	- 12 -
2.1	Nutnost řešení problematiky	- 12 -
2.2	Základní pojmy a názvosloví.....	- 14 -
2.3	Normové podklady	- 17 -
2.3.1	ČSN EN 1992-1-2 Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru	- 17 -
2.3.1.1	Tlačený beton	- 17 -
2.3.1.2	Pevnost v tahu	- 19 -
2.3.1.3	Betonářská ocel	- 19 -
2.3.1.4	Teplotní prodloužení	- 20 -
2.3.1.5	Tepelná vodivost	- 21 -
2.3.1.6	Explozivní odštěpování	- 21 -
2.3.2	ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru	- 22 -
2.3.3	ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky	- 22 -
2.3.4	ČSN 73 0821 Požární bezpečnost staveb – Požární odolnost stavebních konstrukcí	- 23 -
2.3.5	ČSN EN 13823 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu	- 23 -
2.4	Základní požadavky a způsob zajištění požární bezpečnosti staveb.....	- 23 -
2.5	Prokazování požárně technických vlastností stavebních hmot a konstrukcí	- 25 -
2.5.1	Stupeň hořlavosti stavebních hmot	- 25 -
2.5.2	Třídy reakce na oheň dle ČSN EN 13501-1.....	- 25 -
2.6	Teplotní křivky požární odolnosti	- 27 -
2.6.1	Návrh teplotních křivek	- 28 -
2.7	Diagnostika a sanace železobetonových konstrukcí po požáru	- 29 -
2.8	Působení vysokých teplot na betony.....	- 32 -
2.8.1	Vliv vysokých teplot a ohně na běžné cementové betony	- 32 -
2.8.1.1	Změna pevnosti v tlaku	- 33 -
2.8.1.2	Změna pevnosti v tahu	- 35 -
2.8.1.3	Změna modulu pružnosti.....	- 36 -
2.8.1.4	Změna tepelné vodivosti	- 38 -
2.8.1.5	Tepelná deformace, tepelná deformace při zatížení a přechodná tepelná deformace betonu	- 38 -
2.8.1.6	Vliv vlhkosti.....	- 39 -
2.8.1.7	Vliv vodního součinitele	- 39 -
2.8.2	Vliv provozního zatížení.....	- 40 -
2.8.3	Vliv vysokých teplot a ohně na speciální betony.....	- 41 -

2.8.4	Explozivní odprýskávání.....	- 42 -
2.8.4.1	Mechanismus explozivního odprýskávání	- 43 -
2.9	Vliv vysokých teplot na složky betonu.....	- 46 -
2.9.1	Vliv vysokých teplot na cementovou pastu	- 46 -
2.9.1.1	Transport vody	- 46 -
2.9.1.2	Fázové změny.....	- 47 -
2.9.2	Vliv vysokých teplot na kamenivo.....	- 50 -
2.9.3	Spolupůsobení cementového tmele a kameniva v průběhu zahřívání.....	- 53 -
2.9.4	Vliv vysokých teplot na ocelovou výztuž.....	- 55 -
2.9.5	Vliv krytí výztuže betonem na odolnost proti požáru.....	- 56 -
2.10	Doporučený výběr jednotlivých složek cementového kompozitu.....	- 57 -
2.10.1	Pojivo.....	- 57 -
2.10.1.1	Hlinitanový cement	- 58 -
2.10.2	Plnivo.....	- 59 -
2.10.3	Příměsí.....	- 59 -
2.10.4	Rozptýlená výztuž	- 60 -
2.10.4.1	Polypropylenová vlákna.....	- 60 -
2.10.4.2	Ocelová vlákna.....	- 62 -
3.	CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	- 63 -
4.	METODICKÉ POSTUPY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ.....	- 64 -
4.1	Etapa I – Výběr vhodného kameniva, sestavení testování odolnosti.....	- 64 -
4.1.1	Přehled přípravy vzorku kameniva a návaznost jednotlivých zkoušek.....	- 66 -
4.2	Etapa II – Výběr vhodných vláken a ověření jejich účinnosti	- 67 -
4.2.1	Etapa II – část A.....	- 67 -
4.2.2	Etapa II – část B.....	- 68 -
4.3	Etapa III – Vývoj betonu s cementovou matricí s vyšší odolností vůči vysokým teplotám.....	- 69 -
4.3.1	Etapa III – část A	- 69 -
4.3.2	Etapa III – část B.....	- 69 -
4.3.3	Etapa III – část C.....	- 70 -
4.4	Etapa IV – Zatížení přímým plamenem.....	- 71 -
4.5	Přehled prováděných zkoušek	- 73 -
4.5.1	Přehled prováděných zkoušek kameniva	- 73 -
4.5.1.1	Pevnost stlačením ve válci	- 73 -
4.5.1.2	Objemová hmotnost zrn, nasákavost.....	- 73 -
4.5.1.3	Mikroskopické pozorování.....	- 73 -
4.5.1.4	Makroskopické pozorování.....	- 73 -
4.5.1.5	Úbytek hmotnosti	- 74 -
4.5.1.6	Omezený síťový rozbor	- 74 -
4.5.1.7	RTG difrakční analýza	- 75 -
4.5.2	Přehled prováděných zkoušek čerstvých směsí	- 75 -

4.5.2.1	Stanovení konzistence	- 75 -
4.5.2.2	Objemová hmotnost čerstvého betonu	- 75 -
4.5.2.3	Množství vzduchu v čerstvém betonu	- 75 -
4.5.3	Přehled prováděných zkoušek kompozitních materiálů s cementovou matricí	- 75 -
4.5.3.1	Pevnost v tlaku	- 75 -
4.5.3.2	Pevnost v tahu ohybem, pevnost v tahu za ohybu	- 76 -
4.5.3.3	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu	- 76 -
4.5.3.4	Pevnost betonu v příčném tahu	- 76 -
4.5.3.5	Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev	- 76 -
4.5.3.6	Statický modul pružnosti betonu	- 76 -
4.5.3.7	Dynamický modul pružnosti betonu	- 77 -
4.5.3.8	Rychlost šíření vln pomocí ultrazvuku	- 77 -
4.5.3.9	Nasákavost, vlhkost betonu	- 77 -
4.5.3.10	Množství, velikost a distribuce vzduchových pórů	- 77 -
4.5.3.11	Rozsah porušení povrchu vzorků	- 78 -
4.5.3.12	Mikroskopické pozorování	- 78 -
5.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	- 79 -
5.1	Základní parametry použitých materiálů	- 79 -
5.1.1	Pojiva	- 79 -
5.1.1.1	Cementy ze závodu Mokrý (Českomoravský cement a.s.)	- 79 -
5.1.1.2	Cementy ze závodu Holcim (Prachovice, Holcim a.s., člen koncernu)	- 79 -
5.1.2	Plniva	- 80 -
5.1.2.1	Kamenivo z lokality Žabčice	- 80 -
5.1.2.2	Kamenivo z lokality Náklo	- 80 -
5.1.2.3	Kamenivo z lokality Bílčice	- 81 -
5.1.2.4	Kamenivo z lokality Olbramovice	- 81 -
5.1.2.5	Kamenivo Liapor	- 82 -
5.1.3	Příměsi	- 83 -
5.1.3.1	Popílek Dětmárovice	- 83 -
5.1.4	Přísady	- 83 -
5.1.4.1	Superplastifikátor Mapefluid N200	- 83 -
5.1.4.2	Plastifikátor ChrysoPlast 760	- 83 -
5.1.4.3	Plastifikátor ChrysoPlast 460	- 83 -
5.1.4.4	Superplastifikátor ChrysoFluid Optima 206	- 84 -
5.1.4.5	Provzdušňovací přísada Chryso Air A	- 84 -
5.1.5	Rozptýlená výztuž	- 84 -
5.1.5.1	Polypropylenová vlákna	- 84 -
5.1.5.2	Vlákna na bázi celulózy	- 84 -
5.1.5.3	Skleněná vlákna	- 85 -
5.1.5.4	Ocelová vlákna	- 85 -

5.2	Složení jednotlivých směsí	- 86 -
5.3	Výsledky a vyhodnocení jednotlivých etap řešení	- 87 -
5.3.1	Etapa I	- 87 -
5.3.1.1	Pevnost stlačením ve válci a úbytek hmotnosti	- 88 -
5.3.1.2	Omezený síťový rozbor	- 90 -
5.3.1.3	Objemová hmotnost zrn, nasákavost	- 91 -
5.3.1.4	Makroskopické a mikroskopické pozorování	- 93 -
5.3.1.5	RTG difrakční analýza	- 98 -
5.3.2	Etapa II – část A	- 109 -
5.3.3	Etapa II – část B	- 119 -
5.3.4	Etapa III – část A	- 125 -
5.3.5	Etapa III – část B	- 135 -
5.3.6	Etapa III – část C	- 140 -
5.3.7	Etapa IV	- 143 -
6.	DISKUZE VÝSLEDKŮ	- 155 -
6.1	Etapa I – Výběr vhodného kameniva, sestavení testování odolnosti	- 155 -
6.1.1	Stanovení pevnosti stlačením ve válci	- 155 -
6.1.2	Úbytek hmotnosti	- 155 -
6.1.3	Omezený síťový rozbor	- 156 -
6.1.4	Objemová hmotnost zrn	- 156 -
6.1.5	Nasákavost	- 156 -
6.1.6	Makroskopické a mikroskopické pozorování	- 157 -
6.1.7	RTG difrakční analýza	- 157 -
6.1.8	Celkové shrnutí etapy I	- 159 -
6.2	Etapa II – Výběr vhodných vláken a ověření jejich účinnosti	- 160 -
6.2.1	Etapa II – část A	- 160 -
6.2.1.1	Fyzikálně – mechanické vlastnosti	- 160 -
6.2.1.2	Ověření chování polypropylenových vláken	- 161 -
6.2.1.3	Celkové shrnutí etapy II – část A	- 162 -
6.2.2	Etapa II – část B	- 162 -
6.2.2.1	Fyzikálně – mechanické vlastnosti	- 162 -
6.2.2.2	Sledování a fotodokumentace poruch	- 163 -
6.2.2.3	Celkové shrnutí etapy II – část B	- 163 -
6.3	Etapa III – Vývoj betonu s cementovou maticí s vyšší odolností vůči vysokým teplotám ...	- 164 -
6.3.1	Etapa III – část A	- 164 -
6.3.1.1	Pevnostní charakteristiky	- 164 -
6.3.1.2	Nedestruktivní zkoušky	- 165 -
6.3.1.3	Celkové shrnutí etapy III – část A	- 165 -
6.3.2	Etapa III – část B	- 165 -
6.3.2.1	Pevnostní charakteristiky	- 166 -

6.3.2.2	Nedestruktivní zkoušky	- 166 -
6.3.2.3	Celkové shrnutí etapy III – část B	- 167 -
6.3.3	Etapa III – část C	- 167 -
6.3.3.1	Celkové shrnutí etapy III – část C	- 168 -
6.4	Etapa IV – Zatížení přímým plamenem	- 168 -
6.4.1	Dosahované teploty	- 168 -
6.4.2	Vlhkosti	- 169 -
6.4.3	Porušení vzorků	- 169 -
6.4.4	Celkové shrnutí etapy IV	- 171 -
7.	ZÁVĚR	- 172 -
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	- 174 -
	SEZNAM TABULEK:	- 179 -
	SEZNAM OBRÁZKŮ:	- 181 -
	SEZNAM GRAFŮ:	- 186 -

1. ÚVOD

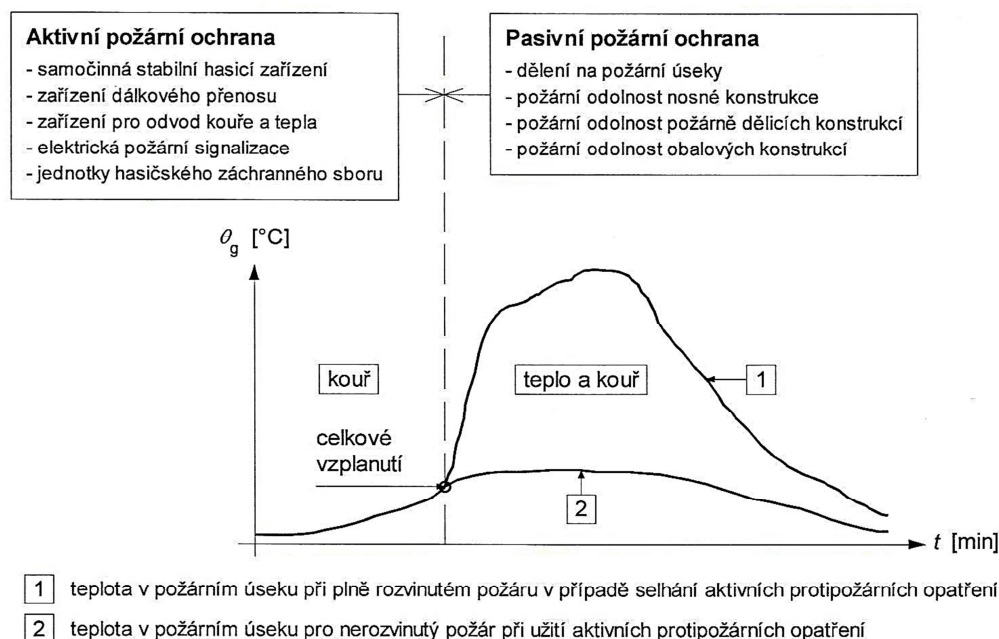
Problém odolnosti betonových konstrukcí vůči vysokým teplotám se stal aktuální zejména v souvislosti se stále častějšími nehodami, především nákladních automobilů, v silničních tunelech s následkem požáru. Již samotný objem paliva nákladního automobilu je zdrojem velké energie. Situace je o to závažnější, pokud automobil přepravuje hořlavé látky, a to nejen palivo, chemikálie, ale i látky zpracovávané v potravinářském průmyslu, jako tuky a oleje. Statistiky udávají intenzitu požáru od 5 MW (požár 1 – 2 osobních automobilů) až do 200 MW (požár nákladního automobilu přepravujícího kyslík nebo benzín). Následkem požáru dochází k intenzivnímu teplotnímu zatížení tunelového ostění, které je převážně betonové, kde teploty výrazně převyšují 1 000 °C, údajně i více než 1 350 °C. Vnitřní část tunelového betonového ostění je při vzniklém požáru vystavena teplotnímu zatížení v různé intenzitě v závislosti na vzdálenosti od vzniklého požáru. Následkem teplotního zatížení dochází vlivem expanze vodní páry v betonu k popraskání betonového povrchu a k odprýskání povrchových vrstev betonu (explosivní odprýskávání, tzv. „explosive spalling“) a tím znehodnocení betonové konstrukce.

V současné době je navíc zřejmé, na základě vyhodnocení skutečných požárů, které probíhaly v otevřených prostorách, že je nutné uvažovat o řešení odolnosti konstrukcí vůči vysokým teplotám nejenom u konstrukcí silničních a železničních tunelů, ale i na pozemních komunikacích z betonového krytu, ve výškových budovách betonové konstrukce, nebo v případě zahraničních oblastí na konstrukcích betonových vrtných plošin.

Co se týče požárního hlediska, má beton řadu výhodných vlastností. Je nehořlavý a má nízkou tepelnou vodivost. Avšak betonové konstrukce, které nejsou navrhovány s odolností proti požáru, vykazují po ohřevu výrazné poškození. Především se jedná o explosivní odprýskávání způsobené kombinací vzrůstajícího tlaku ve vnitřních pórech a vnitřních tlakových napětí vznikajících roztažností materiálů od rostoucí teploty. Následkem je oslabení průřezu dané železobetonové konstrukce a vystavení ocelové výztuže teplotám, které jsou vyšší než kritická hodnota.

Možných opatření na zabránění nebo zmírnění následků teplotního zatížení betonů je ve světě známo a používáno jen několik. Způsoby ochrany lze rozdělit na dva systémy, aktivní a pasivní. Aktivní systémy mají zapříčinit co možná největší pokles působících teplot, aby bylo omezeno působení vysokých teplot na povrchy betonových konstrukcí. Jsou to tedy nejrůznější sestavy rozstřikovačů vody a jiných hasících médií. Nevýhodou těchto systémů je do jisté míry omezená funkčnost a případný možný vznik toxické mlhoviny. Pasivní systémy již přímo odolávají působícím vysokým teplotám a ohni. Jedná se především o systémy tepelných bariér. Nejčastěji to jsou tepelně odolné nátěry, izolační obkladové panely, nebo stříkané malty, které jsou nejrůzněji modifikovány s cílem zvýšení odolnosti vůči vysokým teplotám. Mezi pasivní systémy ochrany betonových konstrukcí vůči vysokým teplotám se řadí vlastní návrh tepelně odolné směsi a tedy i použití syntetických vláken přímo do betonové konstrukce. Tento způsob ochrany má několik výhod. Především je to snadná

aplikace syntetických vláken do čerstvé směsi již při výstavbě betonové konstrukce, čímž odpadají dlouhé časové prodlevy při instalaci aktivních systémů tepelné ochrany, příp. systémů tepelných bariér po odbednění betonových konstrukcí.



Obr. č. 1: Aktivní a pasivní požární ochrana [14]

Aby nedošlo k výraznému porušení železobetonové konstrukce, je nutné dodržet následující podmínky:

- zabránit explozivnímu odprýskávání povrchových vrstev betonu
- omezit působící teplotu na beton pod 300 °C – nedojde ke snížení konstrukční pevnosti betonu
- omezit působící teplotu na ocelovou výztuž pod 450 °C – nedojde ke snížení konstrukční pevnosti ocelové výztuže

Co se týče běžných cementových betonů, je nejdůležitějším faktorem, který může ovlivnit odolnost teplotně zatěžovaného betonu, typ použitého kameniva. Jsou známa rozdílná schémata chování kameniva různého mineralogického složení při teplotním zatěžování. Otázkou zůstává reálné chování kameniva v cementovém kompozitu při použití různých zatěžovacích křivek. Vedle vlastností samotného kameniva jako tepelná roztažnost hraje roli také tvar zrna kameniva a další specifické vlastnosti. I další složky cementového betonu mají vliv na odolnost vůči vysokým teplotám, především pak pojivová složka. U tohoto komponentu cementového betonu však není výrazná možnost jeho výběru, příp. modifikace ku prospěchu zvýšení odolnosti cementového kompozitu vůči vysokým teplotám. V tomto důsledku se některé výzkumy zabývající se zvyšováním odolnosti betonových konstrukcí vůči vysokým teplotám, příp. požáru, ubírají směrem možnosti aplikace alternativního pojiva na bázi alkalické aktivace z toho důvodu, že tyto materiály neobsahují portlandit – $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

2. SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ ODBORNÉ PROBLEMATIKY

2.1 Nutnost řešení problematiky

V říjnu 2010 byl The Geneva Association představen dokument World Fire Statistics shromažďující mezinárodní údaje o požárech v budovách. Studie má zpracované údaje z více jak dvaceti rozvinutých států a vyplývá z ní, že průměrný počet úmrtí při požárech byl 1 člověk na 100 000 obyvatel a přímé ztráty způsobené požáry dosáhly průměrně 0,14 % hrubého národního produktu (viz Tab. č. 1).

Tab. č. 1: Mezinárodní statistická data ohledně požárů v letech 2005 – 2007 [36]

země	přímé ztráty způsobené požárem (% HDP)	počet úmrtí na 100 000 obyvatel	náklady na protipožární opatření staveb (% HDP)	náklady na pojištění proti požáru (% HDP)
Singapur	0,05	0,19 (04-06)*	0,31	0,02
Česká republika	0,07	1,41	0,19	N
Polsko	0,07	1,57	N	N
Slovinsko	0,07 (02-04)*	1,09 (02-04)*	0,16 (02-04)*	0,06 (02-04)*
Austrálie	0,08	0,53	0,37 (05)*	N
USA	0,10	1,23	0,39	0,13
Nový Zéland	0,11	0,72	0,24	0,08 (04)*
Maďarsko	0,12 (86-88)*	1,82	0,42 (87-88)*	0,01 (87-88)*
Japonsko	0,12	1,67	0,14	0,08
Španělsko	0,12 (84)*	0,58	N	0,05 (86)*
Německo	0,13	0,68 (04-06)	N	0,04
Velká Británie	0,13	0,82	0,22	0,11
Nizozemsko	0,15	0,46	0,30	0,04 (87-88)*
Finsko	0,16	1,93	N	0,03
Kanada	0,17 (99-01)*	1,15 (00-02)*	0,32	0,06 (91)*
Itálie	0,17	0,44 (06-07)*	0,35	0,05
Švédsko	0,17	1,11	0,19	0,04
Francie	0,19	1,02	0,18	0,07
Dánsko	0,20	1,38	0,26	0,09
Norsko	0,22 (03-05)*	1,27 (03-05)*	0,36 (03-05)*	0,10 (03-05)*
Švýcarsko	0,23 (89)*	0,36	0,29 (89)*	N
Belgie	0,24 (98-00)*	1,21 (04)*	0,29 (98-00)*	0,23 (99-00)*
Rakousko	0,26 (98-00)*	0,42	N	0,14 (79-80)*

* – k dispozici pouze údaje ze staršího období, které je uvedeno v závorce za hodnotou

N – neuvedeno, údaje nejsou k dispozici

Rozvoj tunelového stavitelství dosahuje značného rozmachu a to jak v oblasti silniční a železniční dopravy tak i v oblasti městské dopravy v podobě metra (viz Tab. č. 3). Nelze tedy zanedbat případný vznik požáru ani v těchto konstrukcích, kde navíc v případě poškození dochází k výrazným ekonomickým ztrátám (viz Tab. č. 2) a bohužel i ke ztrátám na životech.

Přehled významných požárů v tunelech betonové konstrukce:

- Great Belt Tunnel (Dánsko, 1994)
- Channel Tunnel (Anglie – Francie, 1996)
- Mont Blanc (Itálie – Francie, 1999)
- Tauern (Rakousko, 1999)
- Kaprun (Rakousko, 2000)
- Gothard (Itálie – Švýcarsko, 2001)
- Seoul (Korea, 2005)
- Frejus Tunnel (Francie, 2005)

Tab. č. 2: Vyčíslení ztrát po požárech ve vybraných tunelech [38]

tunel	ztráta z příjmů [mil Euro]	kalkulace oprav [mil Euro]	celkem [mil Euro]
Channel Tunnel	204	49	253
Mont Blanc Tunnel	203	189	392
Tauern Tunnel	20	8,5	28,5

Tab. č. 3: Přehled rozsahu existujících tunelů v Evropě k roku 2003 [39]

země	délka [km]		
	silniční	železniční	metro
Itálie	340	734	106
Francie	133	256	304
Švýcarsko	162	366	-
Německo	69	382	367
Rakousko	177	246	-
Norsko	522	126	119
Španělsko	58	110	837
Anglie	13	114	519

2.2 Základní pojmy a názvosloví

Zvýšená teplota

Teplota, která vyvodí v betonovém prvku dlouhodobě teplotu nejvýše 250 °C. [9]

Vyšší teplota

Teplota, která vyvodí v betonovém prvku dlouhodobě teplotu vyšší než 250 °C. [9]

Žhnutí

Vydávání světla bez plamenů, spojené s hořením materiálu. [11]

Požár

Pro účely požární ochrany se požárem rozumí každé nežádoucí hoření, při kterém došlo k usmrcení či zranění osob nebo zvířat, anebo ke škodám na materiálních hodnotách. Za požár se považuje i nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata nebo materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy. [48]

Lokální požár

Požár, kterého se účastní pouze omezená plocha požárního zatížení v požárním úseku. [35]

Návrhový požár

Pravděpodobný rozvoj a průběh požáru v požárním úseku nebo v objektu, na který je dimenzováno požární zabezpečení požárního úseku nebo objektu; zahrnuje etapu rozvoje požáru (zpravidla od okamžiku tepelného výkonu 1 kW), etapu plně rozvinutého požáru (zpravidla od okamžiku, kdy se požár rozšíří po celé ploše místnosti, v několika místnostech či v celém požárním úseku, popř. kdy teploty v hořícím prostoru přesáhnou 500 °C až 600 °C – flashover) a etapu dohořívání – chladnutí (zpravidla od okamžiku, kdy teploty plynů v hořícím prostoru začnou klesat); výpočtové požární zatížení se vztahuje ke druhé etapě požáru; druhá etapa požáru se může projevat zónově i v jednom požárním úseku. [47]

Plně rozvinutý požár

Stav požáru, kdy na všech hořlavých materiálech v posuzovaném prostoru probíhá hoření. [35]

Zdokonalený model požáru

Návrhový požár, který vychází z principu zachování hmoty a energie. [35]

Tepelná zatížení

Zatížení konstrukce vyjádřená čistým tepelným tokem na prvky. [35]

Požární zatížení

Součet tepelné energie uvolňované hořením všech hořlavých materiálů v prostoru (obsah budovy a prvky konstrukce). [35]

Požární scénář

Kvalitativní vyjádření průběhu požáru v čase, udávající klíčové události, které charakterizují požár a odlišují jej od jiných možných požárů. Obvykle definuje vznícení a průběh rozvoje požáru, plně rozvinuté stádium, stádium dohořívání, spolu s prostředím v budově a zařízením, které mají vliv na průběh požáru. [35]

Křivka vnějšího požáru

Nominální teplotní křivka, určená pro vnější stranu dělicích vnějších stěn, které mohou být vystaveny účinkům požáru z různých částí fasády, tzn. přímo z vnitřku příslušného požárního úseku, nebo z úseku ležícího pod nebo sousedícího s příslušnou vnější stěnou. [35]

Křivka uhlovodíkového požáru

Nominální teplotní křivka pro vyjádření účinků požáru uhlovodíkového druhu. [35]

Normová teplotní křivka

Nominální křivka definovaná v EN 13501-2 pro vyjádření modelu plně rozvinutého požáru v úseku. [35]

Ekvivalentní doba vystavení účinkům požáru

Doba působení požáru podle normové teplotní křivky, která má podle předpokladu stejný tepelný účinek jako skutečný požár v požárním úseku. [35]

Požární nebezpečí

Požárním nebezpečím se rozumí pravděpodobnost vzniku požáru nebo výbuchu s následným požárem. [13]

Požární riziko

Rozsah a intenzita případného požáru v posuzovaném stavebním objektu nebo jeho části; je určena výpočtovým požárním zatížením. [47]

Požární odolnost

Požární odolnost je doba v minutách, během níž je konstrukce schopna odolávat teplotám vzniklým při požáru, aniž by ztratila svou funkci. Udává se třídou požární odolnosti podle ČSN 73 0810. [8]

Doplňující značky k EN 1992-1-1

R 30, R 60 třída požární odolnosti pro kritérium únosnosti – pro 30 minut, 60 minut, ...vystavení účinku normového požáru

E 30, E 60 třída požární odolnosti pro kritérium celistvosti – pro 30 minut, 60 minut, ...vystavení účinku normového požáru

I 30, I 60 třída požární odolnosti pro tepelně izolační kritérium – pro 30 minut, 60 minut, ...vystavení účinku normového požáru [12]

Normová požární odolnost

Schopnost konstrukce nebo její části (obvykle pouze prvků) plnit požadované funkce (nosnou, nebo dělicí funkci) při vystavení teple podle normové teplotní křivky, při stanovené kombinaci zatížení a po stanovenou dobu. [35]

Požární bezpečnost

Požární bezpečností se rozumí souhrn organizačních, stavebních a technických opatření k zabránění vzniku požáru nebo výbuchu s následným požárem k ochraně osob, zvířat a majetku v případě vzniku požáru a k zamezení jeho šíření. [13]

Požární bezpečnost stavebních objektů

Schopnost stavebních objektů bránit v případě požáru ztrátám na životech a zdraví osob, popř. zvířat a ztrátám majetku. Dosahuje se jí vhodným urbanistickým začleněním objektu, jeho dispozičním, konstrukčním a materiálovým řešením nebo požárně bezpečnostními zařízeními a opatřeními. [47]

Požární bezpečnost staveb se sleduje na úrovni územního plánování, při projektování a provádění stavby a během užívání stavby. Souvisí se zákonem o požární ochraně č. 133/1985 Sb, dle kterého definuje preventivní opatření k:

- zabránění vzniku požáru
- zamezení rozšíření požáru
- zabezpečení evakuace osob a materiálu
- zajištění rychlého hasebného zásahu [2]

Požární úsek

Prostor v budově, sahající přes jedno nebo více podlaží, uzavřený požárně dělicími prvky tak, že je po příslušnou dobu zabráněno šíření požáru mimo tento požární úsek. [35]

Požární stěna

Požární stěna je stěna oddělující dva prostory (obecně dvě pozemní stavby), která je navržena s takovou požární odolností a stabilitou konstrukce, případně i odolností vůči vodorovnému zatížení, aby v případě požáru a porušení konstrukce na jedné straně stěny bylo zabráněno šíření požáru za tuto stěnu. [12]

Ochranné vrstvy

Materiál nebo kombinace materiálů nanášených na nosný prvek pro zvýšení jeho požární odolnosti. [12]

Odprýskávání betonu

Oddělování vrstev nebo jednotlivých částí betonu z povrchu konstrukčního prvku při vystavení vysokým a rychle rostoucím teplotám. [14]

Kritická teplota výztuže

Teplota výztuže, při které se očekává porušení prvku při požární situaci (kritérium R) při dané úrovni napětí v oceli. [12]

Kritická teplota oceli má hodnotu $\theta_{cr} = 500$ °C, u předpínací výztuže se předpokládá kritická teplota pro pruty 400 °C a pro dráty a lana 350 °C. [12]

Součinitel hoření

Součinitel hoření představuje účinnost hoření a nabývá hodnot 1 při úplném shoření až po hodnotu 0 při úplném zabránění hoření. [35]

2.3 Normové podklady

2.3.1 ČSN EN 1992-1-2 Navrhování betonových konstrukcí – Část 1 – 2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru

Tato norma dává návod pro zajištění požární odolnosti betonových konstrukcí výhradně pasivními prvky, tj. vlastní odolností konstrukce. Hlavním úkolem návrhu je zabránit předčasnému kolapsu konstrukce a omezit šíření požáru. Norma EN 1992-1-2 platí pro konstrukce nebo jejich prvky navržené podle EN 1992-1-1, ale neplatí pro předpjaté konstrukce s vnější předpínací výztuží a skořepinové konstrukce. Metody uvedené v této normě je možné použít až do třídy betonu C 90/105 a lehký beton až do třídy pevnosti LC 55/60 s tím, že pro třídu vyšší než C 50/60 jsou v normě uvedena doplňující pravidla.

EN 1992-1-2 popisuje zásady, požadavky a pravidla pro navrhování konstrukce pozemních staveb vystavených účinkům požáru včetně následujících hledisek: požadavky na bezpečnost, postupy navrhování a návrhové pomůcky. [12]

2.3.1.1 Tlačený beton

Hodnoty materiálových vlastností se musí považovat za charakteristické hodnoty a lze je použít pro jednoduché a pro zpřesněné výpočetní metody. Pevnostní a deformační vlastnosti jednoose namáhaného betonu při zvýšených teplotách lze získat z Tab. č. 4, kde tyto parametry lze použít pro obyčejný beton s křemičitým nebo vápencovým (min 80 % hmotnosti vápencové kamenivo) kamenivem.

Tab. č. 4: Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu s křemičitým nebo vápencovým kamenivem při zvýšených teplotách [12]

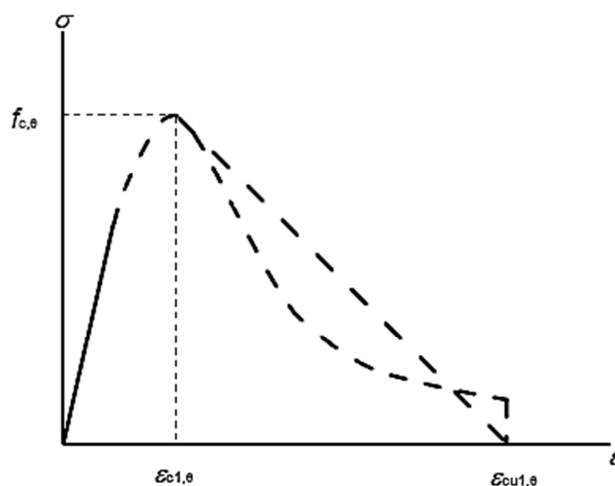
beton	křemičité kamenivo			vápencové kamenivo		
	teplota θ [°C]	$f_{c,\theta} / f_{ck}$ [-]	$\varepsilon_{c1,\theta}$ [-]	$\varepsilon_{cu1,\theta}$ [-]	$f_{c,\theta} / f_{ck}$ [-]	$\varepsilon_{c1,\theta}$ [-]
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	-	-	0,00	-	-

f_{ck} pevnost betonu v tlaku

$f_{c,\theta}$ pevnost betonu v tlaku při dané teplotě

$\varepsilon_{c1,\theta}$ poměrné přetvoření odpovídající $f_{c,\theta}$

$\varepsilon_{cu1,\theta}$ poměrné přetvoření odpovídající $f_{c,\theta}$ sestupné větve



Obr. č. 2: Matematický model pro pracovní diagram betonu v tlaku při zvýšených teplotách [12]

2.3.1.2 Pevnost v tahu

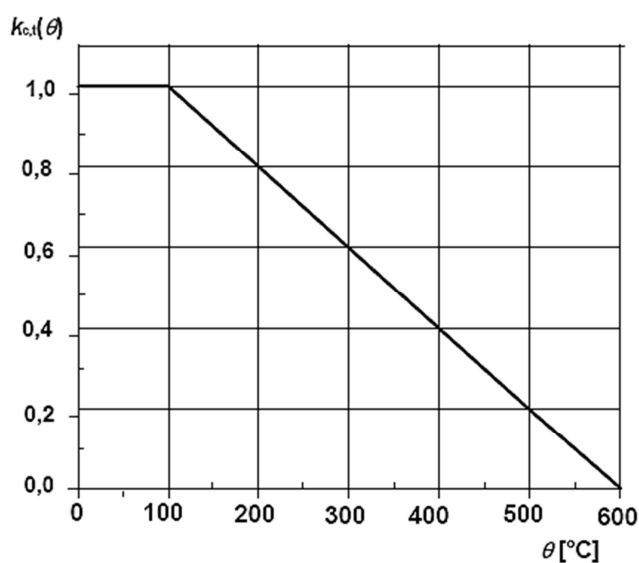
Pevnost betonu v tahu nemá být obvykle uvažována, je-li pro výpočetní modely třeba, lze využít následujícího. Bere se v úvahu charakteristická pevnost betonu v tahu snižená součinitelem $k_{c,t}(\theta)$.

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t} \quad (2.1) \quad [12]$$

Pro součinitel se uvažují následující hodnoty:

$$\begin{aligned} k_{c,t}(\theta) &= 1,0 && \text{pro } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ k_{c,t}(\theta) &= 1,0 - 1,0 (\theta - 100)/500 && \text{pro } 100 \text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 600 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad [12]$$

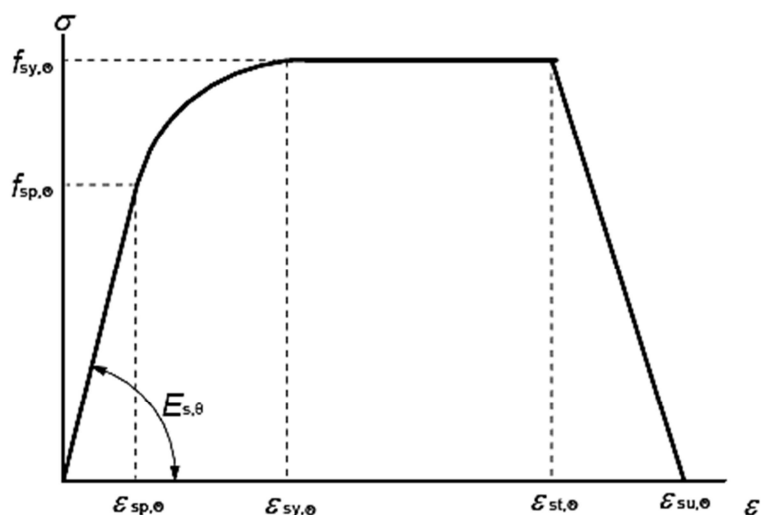
$f_{ck,t}$	pevnost betonu v tahu
$f_{ck,t}(\theta)$	pevnost betonu v tahu při dané teplotě
$k_{c,t}(\theta)$	součinitel



Obr. č. 3: Součinitel $k_{c,t}(\theta)$ pro redukci pevnosti betonu v tahu při zvýšených teplotách [12]

2.3.1.3 Betonářská ocel

Pevnostní a deformační charakteristiky oceli do betonu při zvýšených teplotách se stanoví z pracovního diagramu uvedeného na Obr. č. 4.



Obr. č. 4: Pracovní diagram betonářské a předpínací oceli při zvýšených teplotách (pro předpínací ocel se index „s“ zamění za index „p“) [12]

$E_{s,\theta}$	sklon v lineárně pružné oblasti
$f_{sp,\theta}$	mez úměrnosti
$f_{sy,\theta}$	maximální napětí

2.3.1.4 Teplotní prodloužení

Teplotní poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_c(\theta)$ lze stanovit následovně ve vztahu k délce při teplotě 20 °C pro:

křemičité kamenivo:

$$\varepsilon_c(\theta) = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2,3 \times 10^{-11} \theta^3 \quad \text{pro } 20 \text{ °C} \leq \theta \leq 700 \text{ °C} \quad (2.2)$$

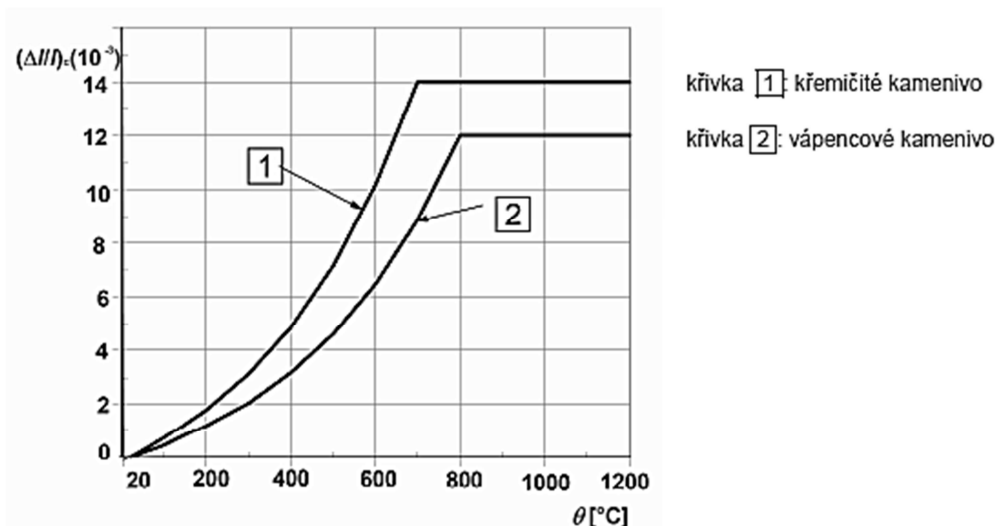
$$\varepsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3} \quad \text{pro } 700 \text{ °C} < \theta \leq 1\,200 \text{ °C} \quad (2.3) \quad [12]$$

vápencové kamenivo:

$$\varepsilon_c(\theta) = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1,4 \times 10^{-11} \theta^3 \quad \text{pro } 20 \text{ °C} \leq \theta \leq 805 \text{ °C} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_c(\theta) = 12 \times 10^{-3} \quad \text{pro } 805 \text{ °C} < \theta \leq 1\,200 \text{ °C} \quad (2.5) \quad [12]$$

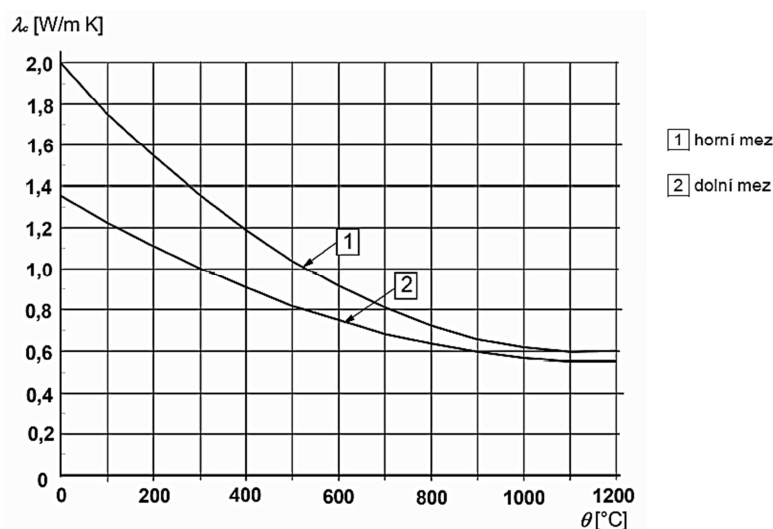
kde θ je teplota betonu (°C).



Obr. č. 5: Celkové teplotní prodloužení betonu [12]

2.3.1.5 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost λ_c betonu se pohybuje v oblasti mezi horní a dolní mezí (Obr. č. 6).



Obr. č. 6: Tepelná vodivost betonu [12]

2.3.1.6 Explosivní odštěpování

Pokud je vlhkost betonu menší než k % hmotnosti nelze předpokládat, že dojde k explozivnímu odštěpování. Pokud je vlhkost betonu vyšší než k % hmotnosti, má se přesněji posoudit množství vlhkosti, typ kameniva, propustnost betonu a rychlost zahřívání.

POZNÁMKA: Hodnotu k , která se použije v příslušném státě, lze nalézt v národní příloze. Doporučená hodnota je 3. Doporučená hodnota k se pro ČR nemění. [12]

2.3.2 ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru

Norma popisuje tepelné a mechanické zatížení pro návrh pozemních staveb vystavených účinkům požáru. Součástí jsou následující hlediska:

- požadavky na bezpečnost
- postupy navrhování
- návrhové pomůcky

Norma se zabývá tepelnými a mechanickými zatíženími konstrukcí, které jsou vystaveny účinkům požáru. Její použití by mělo korespondovat s normami pro navrhování konstrukcí na účinky požáru. Součástí normy je popis tepelných zatížení a to jak nominálních, tak fyzikálně podložených tepelných zatížení. Modely pro fyzikálně podložená tepelná zatížení jsou uvedeny v přílohách normy. Norma se nezabývá hodnocením poškození konstrukce po požáru.

2.3.3 ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky

Stanovením požární odolnosti se posuzuje chování vzorku stavební konstrukce, který je vystaven definovaným podmínkám ohřívání a tlaku. Metoda popsána v normě udává prostředky pro vymezení schopnosti zkoušeného prvku odolat působení vysokých teplot tím, že jsou dána kritéria, pomocí nichž lze vyhodnotit mimo další funkce nosnost, zabránění průniku ohně (celistvost) a tepelný přenos (izolace).

Reprezentativní vzorek zkoušeného prvku je vystaven definovanému režimu ohřívání a na základě kritérií popsaných v normě je zkušební vzorek monitorován. Požární odolnost zkoušeného prvku je dána dobou, po kterou jsou splněna příslušná kritéria. Získané doby jsou kritériem, zda je zkoušený prvek vyhovující při požáru, ale je nutno zmínit, že tyto doby nemají přímý vztah k trvání skutečného požáru.

Tab. č. 5: Normová teplotní křivka [11]

čas [min]	teplota v peci [°C]	čas [min]	teplota v peci [°C]
0	20	90	1 006
5	576	120	1 049
10	678	150	1 082
15	738	180	1 110
20	781	210	1 133
30	842	240	1 153
45	902	300	1 186
60	945	360	1 214

2.3.4 ČSN 73 0821 Požární bezpečnost staveb – Požární odolnost stavebních konstrukcí

Tato norma stanoví hodnoty požární odolnosti některých stavebních konstrukcí, dále jejich klasifikační zařazení a také hodnocení druhu konstrukčních částí (dílů a prvků). Normou je stanovena požární odolnost těch stavebních konstrukcí, na něž nelze použít Eurokódy a pro něž nejsou zpracovávány harmonizované EN. [10]

2.3.5 ČSN EN 13823 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu

Tato norma předkládá zkušební metodu pro stanovení reakce na oheň stavebních výrobků kromě podlahových krytin a kromě výrobků, které jsou uvedeny v tabulce 1 této normy. Byla zpracována, aby se stanovilo chování v podstatě plošných prvků v požáru.

Zkušební těleso, složené ze dvou svislých křídel tvořících pravoúhlý roh je vystaveno plamenům hořáku umístěného v základně rohu („hlavní (primární) hořák“). Plameny vytvořené spalováním propanu pronikajícího přes pískové lože poskytující tepelný výkon $(30,7 \pm 2,0)$ kW. Chování zkušební tělesa se hodnotí po dobu 20 minut. Sledují se následující parametry: tepelný výkon, vývin kouře, boční (horizontální) šíření plamene, odpadávající plamenně hořící kapky a částice. [16]

2.4 Základní požadavky a způsob zajištění požární bezpečnosti staveb

Většina členských států Evropského společenství přijala v roce 1991 Směrnicí Rady 89/106/EEC, o sblížení zákonů a dalších právních a správních předpisů členských států, které se týkají výrobků. Tuto Směrnicí doplňují interpretační dokumenty, které jsou tříděny podle základních požadavků na stavby a výrobky, kterými jsou:

- mechanická odolnost a stabilita;
- požární bezpečnost;
- zdravotní a ekologická bezpečnost;
- uživatelská bezpečnost;
- ochrana proti hluku;
- úspora energie a ochrana tepla.

Úkolem navrhovaných projektových opatření je:

- zaručení únosnosti a stability nosných konstrukcí, celistvosti a izolace požárně dělících konstrukcí po určitou dobu;
- zajištění bezpečného úniku osob, popř. evakuaci zvířat a majetku (dispoziční řešení, vhodný návrh komunikací v objektu);

- zamezení šíření požáru uvnitř objektu (dělení objektu na menší celky – požární úseky, vybavování aktivními zařízeními požární ochrany);
- zabránění přenosu požáru z hořícího objektu na okolní objekt (zajištění dostatečných odstupů, odraz v urbanistickém řešení);
- umožnění účinného protipožárního zásahu zasahujícími jednotkám požární ochrany (návrh přístupových komunikací a nástupních ploch, budování vnitřních a vnějších zásahových cest, zajištění přístupu k vodě pro hasební účely).

Požární bezpečnost stavebního objektu je zajištěna jednak pasivní požární ochranou, tj. správně navrženými stavebními konstrukcemi, a jednak tzv. aktivními prostředky požární ochrany. Tyto jsou představovány technickými požárně bezpečnostními zařízeními. Jsou to zařízení elektrické požární signalizace, samočinné hasicí zařízení a zařízení pro odvod kouře a tepla. Svou roli zde hraje i blízkost profesionálních záchranných a zásahových jednotek.

Pasivní zabezpečení je zajištěno situačním a dispozičním řešením a návrhem stavebních konstrukcí a zaručuje:

- stabilitu objektu;
- dělení na požární úseky;
- bezpečné únikové cesty;
- omezení šíření požáru na sousední objekty. [13]

Aktivní zabezpečení představují požárně bezpečnostní zařízení a opatření a zaručují:

- detekci požáru;
- vyhlášení poplachu;
- ovládní dalších zařízení pomocí EPS;
- účinný zásah jednotek;
- samočinné hašení;
- odvedení tepla a kouře;
- podmínky pro evakuaci;
- snížení rozsahu škod. [13]

2.5 Prokazování požárně technických vlastností stavebních hmot a konstrukcí

Při prokazování skutečných požárně technických vlastností stavebních hmot a výrobků jde zejména o:

- stupeň hořlavosti stavebních hmot nebo reakce stavebních výrobků na oheň;
- šíření plamene po povrchu stavebních hmot;
- hodnocení odkapávání hmot z podhledů stropů a střech;
- hodnocení podlahovin a textilií. [13]

Stavební konstrukce jsou hodnoceny především z hlediska dosažené požární odolnosti. U střešních pláštěů je někdy ověřována i jejich schopnost šířit požár. Pokud jsou zjištěny vlastnosti stavebních hmot a konstrukcí, které nesplňují požadavky na ně kladené, je nutné zvolit adekvátní způsob nápravy. Ten spočívá buď ve výměně stavební konstrukce anebo použitého materiálu, příp. v návrhu vhodné protipožární ochrany a užití prostředků pro zlepšení vlastností použitých stavebních hmot. Většinou se požárně technické vlastnosti stavebních hmot a konstrukcí prokazují požárními zkouškami v akreditovaných zkušebnách.

2.5.1 Stupeň hořlavosti stavebních hmot

V ČR se do 31. 12. 2003 stavební hmoty zatřídily a označovaly následujícími stupni hořlavosti:

- A nehořlavé;
- B nepadno hořlavé;
- C1 těžce hořlavé;
- C2 středně hořlavé;
- C3 lehce hořlavé. [13]

O zatřídění tuhé stavební hmoty do příslušného stupně hořlavosti bylo rozhodnuto na základě výsledků zkoušky provedené dle ČSN 73 0862. Dle této metody byl testován soubor pěti vzorků po dobu dvaceti minut za předepsaných teplotních podmínek. Mimo této normy se používala také ČSN 73 0861, jejímž výsledkem je rozřídění stavebních hmot na nehořlavé a hořlavé.

2.5.2 Třídy reakce na oheň dle ČSN EN 13501-1

Od 1. 1. 2004 je ČSN 73 0862 zrušena. Stavební výrobky jsou zkoušeny na reakci na oheň dle souboru pěti evropských norem:

- ČSN EN 13238 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Postupy kondicionování a obecná pravidla pro výběr podkladů;
- ČSN EN 13823 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu;
- ČSN EN ISO 1182 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Zkouška nehořlavosti;
- ČSN EN ISO 1716 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stanovení spalného tepla;
- ČSN EN ISO 11925-2 Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene;
- ČSN EN ISO 9239-1 Zkoušení reakce podlahových krytin na oheň – Část 1: Stanovení chování při hoření užitím zdroje sálavého tepla.

Zatřídění stavebních výrobků dle reakce na oheň se provádí podle evropské normy ČSN EN 13501-1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň.

Při hodnocení splnění požadavků na třídy reakce na oheň u stavebních výrobků je rozhodující zatřídění výrobků podle ČSN EN 13501-1 včetně změny Z1. Mezi jednotlivými třídami reakce na oheň a referenčními požárními situacemi platí pro stavební výrobky následující vztahy:

- **Třída A1:** Výrobky třídy A1 nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stadiu; z toho důvodu jsou automaticky považovány za vyhovující všem požadavkům pro nižší třídy.
- **Třída A2:** Výrobky sice vyhovují stejným kritériím EN 13823 jako pro třídu B, ale navíc nebudou za podmínek plně rozvinutého požáru významně přispívat ke kalorickému zatížení, a tím ani k dalšímu růstu požáru.
- **Třída B:** Jako u třídy C, ale s přísnějšími požadavky.
- **Třída C:** Jako u třídy D, ale navíc při tepelném působení jednotlivého hořícího předmětu vykazují omezené rozšíření plamene.
- **Třída D:** Výrobky vyhovující kritériím pro třídu E a jsou schopné odolávat působení malého plamene po delší časový interval bez jeho významného rozšíření. Kromě toho jsou též schopny odolávat působení tepla od jednotlivého hořícího předmětu za podstatného zpoždění a omezení uvolňování tepla.
- **Třída E:** Výrobky jsou schopné odolávat působení malého plamene po krátký časový interval bez významného rozšíření plamene.
- **Třída F:** Výrobky, které nelze zařadit do žádné z předchozích tříd. [49]

Do třídy A1 spadají výrobky, které nepřispívají k požáru. Evropskou komisí byl vydán seznam materiálů spadajících do této třídy, kam patří různé druhy betonu (i s různými příměsemi a přísadami, mimo zabudované tepelné izolace). Beton jednoznačně spadá do třídy A1, protože jeho minerální složky jsou zaručeně nehořlavé.

Doplňkové hodnocení podle:

vývoje kouře pro třídy reakce na oheň A2, B, C a D:

- s3** – žádné omezení množství kouře není požadováno;
- s2** – celkové množství kouře a poměrné zvýšení množství kouře jsou omezeny;
- s1** – přísnější kritéria než pro s2.

plamenně hořících kapek/částic pro třídy reakce na oheň A2, B, C, D a E:

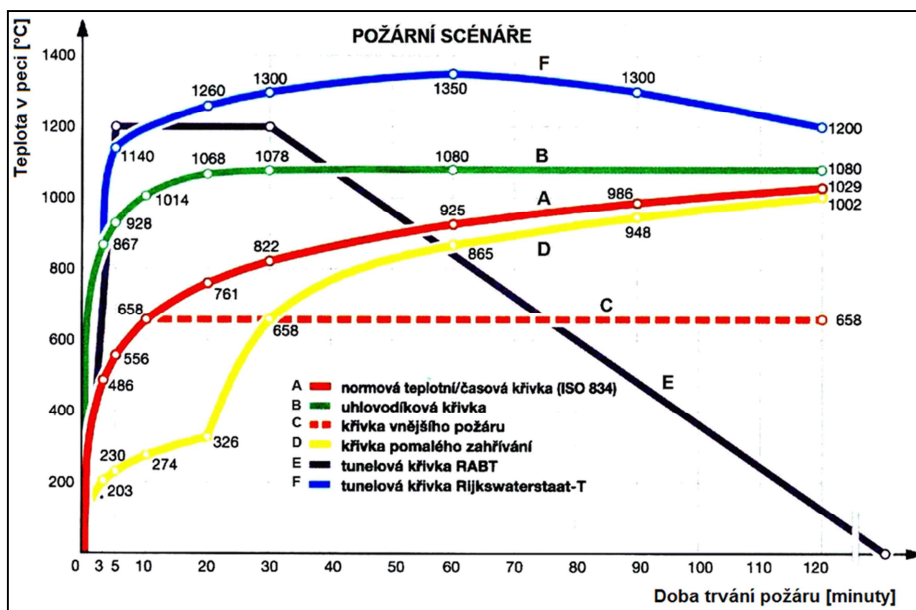
- d2** – bez omezení;
- d1** – žádné kapky/částice plamenně hořící déle než udávaný časový interval;
- d0** – žádné plamenně hořící kapky/částice. [49]

Pokud v normách řady ČSN 73 08xx není jmenovitě uveden požadavek doplňkového hodnocení podle vývoje kouře s1, s2, s3 (ČSN EN 13501-1: 2003) či podle plamenně hořících kapek/částic d0, d1, d2 (ČSN EN 13501-1: 2003), nebere se při posuzování na tyto doplňkové požadavky zřetel. [13]

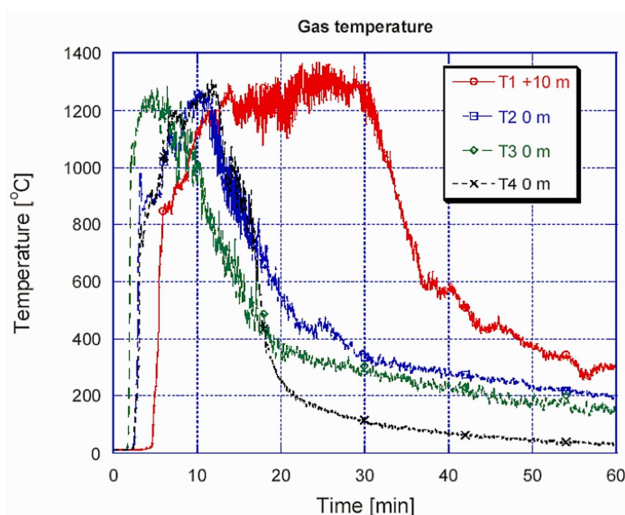
2.6 Teplotní křivky požární odolnosti

Jedinou momentálně platnou normou v ČR na zkoušení požární odolnosti je ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. Tato norma stanoví základní požadavky pro určení požární odolnosti různých prvků stavebních konstrukcí vystavených normovým podmínkám působení požáru včetně betonových prvků. Zkoušení požární odolnosti je již specifikováno na konkrétní stavební prvek výsledné konstrukce, nikoli na samostatný stavební materiál. Platná a účinná metodika na ověření odolnosti stavebního materiálu vůči požáru a vysokým teplotám tedy chybí.

Otázka výběru teploty a doby expozice zkušebních betonů ve vysokých teplotách je důležitá a sestaveno je několik teplotních křivek. Jedná se o tyto teplotní křivky: normová teplotní/časová křivka dle ISO 834, uhlovodíková křivka, křivka vnějšího požáru, křivka pomalého zahřívání, tunelová křivka RABT, tunelová křivka Rijkswaterstaat. Pro zkoušení teplotního zatížení betonů používaných pro silniční tunely, podle evropských norem, se nejčastěji používá „nejpřísnější“ teplotní zatížení křivkou RWS, která odpovídá velkému požáru nákladního automobilu. Ta je definována jako požár trvající 120 minut se strmým nárůstem teploty, kdy maximální teploty 1 350 °C je dosaženo po 50 minutách. Mezi časem 10 – 120 minut teploty neklesnou pod 1 200 °C. Tato křivka úzce koresponduje s teplotami zaznamenanými při zkušebních požárech různých materiálů v tunelu (viz Obr. č. 8)



Obr. č. 7: Požární scénáře [2]



T1 – dřevěné a plastové palety
 T2 – dřevěné palety a matrace
 T3 – nábytek
 T4 – plastové lahve a lepenkové krabice

Obr. č. 8: Dosažené hodnoty při zkoušení různých požárů [6]

2.6.1 Návrh teplotních křivek

Dle normy ČSN EN 1991-1-2 je možné vývoj požáru modelovat s různou úrovní přesnosti a obtížnosti. Nejjednodušší možností je použití tzv. nominálních teplotních křivek. Tyto definují teplotu plynů v daném požárním úseku pouze jako funkci času a trvání požáru.

V normě ČSN EN 1991-1-2 jsou uvedeny následující nominální teplotní křivky:

- Normová teplotní křivka (často označována jako křivka ISO nebo ISO 834), která je dána rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 345 \times \log_{10}(8 \times t + 1) \quad (2.6) \quad [35]$$

kde θ_g je teplota plynů v požárním úseku ve [°C] a t je čas trvání požáru v [min]. Tato křivka odpovídá tzv. celulóзовému hoření (hoření dřeva, papíru, oděvů apod.) a její použití je velmi časté. Vztahuje se k ní většina dostupných výsledků zkoušek a výpočtů. Účinky požárů definovaných jinými křivkami se obvykle převádějí právě na účinek požáru podle normové teplotní křivky. [14]

- Křivka vnějšího požáru, která je dána vztahem:

$$\theta_g = 20 + 660 \times (1 - 0,687 \times e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \times e^{-3,8 \cdot t}) \quad (2.7) \quad [35]$$

kde θ_g je teplota plynů v požárním úseku ve [°C] a t je čas trvání požáru v [min]. Tato křivka se vztahuje k požárům působícím na vnější líce obvodových stěn. [14]

- Uhlovodíková křivka, která je dána vztahem:

$$\theta_g = 20 + 1080 \times (1 - 0,325 \times e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \times e^{-2,5 \cdot t}) \quad (2.8) \quad [35]$$

kde θ_g je teplota plynů v požárním úseku ve [°C] a t je čas trvání požáru v [min]. Tato křivka popisuje hoření ropy a ropných produktů (uplatní se např. pro simulaci požárů v garážích apod.). [14]

Kromě výše uvedených křivek, definovaných v normě ČSN EN 1991-1-2, jsou v odborné literatuře popsány také některé další nominální teplotní křivky – např.

- Křivka pomalého zahřívání:

$$\theta_g = 20 + 154 \times t^{0,25} \quad \text{pro } 0 < t < 21 \quad (2.9)$$

$$\theta_g = 20 + 345 \times \log_{10} [8 \times (t - 20) + 1] \quad \text{pro } t > 21 \quad (2.10)$$

Tato křivka se uplatní např. při modelování požáru v dutinách zdvojených podlah nebo podhledů. [14]

2.7 Diagnostika a sanace železobetonových konstrukcí po požáru

U betonových konstrukcí vystavených vysokým teplotám, resp. požáru, může dojít k rozsáhlému poškození konstrukce a následně až ke kolapsu. Na rozsah a míru porušení betonové konstrukce jsou rozhodující maximální dosažené teploty a doba tepelné expozice.

Tyto rozhodující parametry však většinou po požáru nejsou známy, proto je nutná diagnostika zasažené železobetonové konstrukce. Na základě provedené diagnostiky se určí rozsah poškození vyšetřované konstrukce a navrhne se způsob opravy konstrukce – sanace. Rychlost a účelnost sanace poškozené konstrukce a následné obnovení provozu je důležitým hlediskem pro minimalizaci ekonomických ztrát v důsledku požáru. Opravit danou konstrukci zasaženou požárem je samozřejmě výrazně ekonomicky výhodnější než případná demolice a opětovná výstavba.



Obr. č. 9: Ukázka porušení betonové konstrukce po požáru [37]



Obr. č. 10: Oprava betonové konstrukce pomocí torkretu – nástřik betonu [37]

Při monitorování stavu železobetonové konstrukce po zasažení požárem se prostřednictvím stavebně technického průzkumu sledují následující charakteristiky:

Fyzikálně – mechanické parametry betonu:

- pevnost betonu v tlaku – destruktivně na jádrových vývrtech, nedestruktivně pomocí Schmidtova tvrdoměru
- pevnost betonu v prostém tahu – destruktivně na jádrových vývrtech
- pevnost v tahu povrchových vrstev betonu – odtrhovou zkouškou na konstrukci
- modul pružnosti – nedestruktivně ultrazvukovou impulzovou metodou na konstrukci, destruktivně na jádrových vývrtech

Fyzikálně – chemické analýzy:

- rentgenová difrakční analýza – kvalitativní analýza, cílem je stanovení mineralogického složení
- diferenční termická analýza – kvantitativní analýza, cílem je kvantifikovat obsah fází tvořících matrici betonu

Z fyzikálně-mechanických vlastností lze pevnost v tahu povrchových vrstev betonu označit za nejdůležitější. Působení vysokých teplot totiž mnohem výrazněji ovlivňuje tahové pevnosti betonu oproti tlakovým. Důvodem je vznik mikrotrhlin v cementové matici a především vznik poruch v oblasti tranzitní zóny kameniva. Stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu se však omezuje pouze na povrch hodnocené konstrukce, proto je vhodné tento parametr doplnit stanovením pevnosti betonu v prostém tahu na odebraných jádrových vývrtech. Důležitou součástí souboru zkoušek prováděných v rámci stavebně technického průzkumu betonové konstrukce zasažené požárem jsou fyzikálně – chemické analýzy, které významně doplňují získané fyzikálně – mechanické parametry. Pomocí fyzikálně – chemických metod by měla být zjištěna míra narušení cementové matrice betonu, resp. stav kameniva v betonu. Na základě mineralogického rozboru cementové matrice betonu lze například blíže specifikovat teplotu, která působila na konstrukci a predikovat tak změnu pevnostních parametrů konstrukce.

Důležité je také sledovat stav ocelové výztuže konstrukce, především té, která byla přímo vystavena působení vysokých teplot po odprýsknutí krycí vrstvy betonu. Zjišťuje se změna jejich vlastností (pevnost v tahu, mez pevnosti v kluzu) oproti deklarovaným vlastnostem.

Tab. č. 6: Vliv teploty na poškození betonu [41]

teplota	barevné změny	změny stavu konstrukce a teploty	stav betonu
0 – 290 °C	žádná	bez poškození	bez poškození
290 – 590 °C	růžová až červená	povrchové trhliny – 300 °C hluboké trhliny – 550 °C	zdravý, ale pevnost výrazně snížena
590 – 950 °C	šedobílá	odprýskávání – max. 25 % povrchu nosné konstrukce vystaveno požáru – 800 °C	neúnosný a drobný
950 °C a více	žlutohnědá	rozsáhlé odprýskání krycí vrstvy	neúnosný a drobný

Pro zkoumání poškození betonu existuje více postupů. Jedním z nich je stanovení barevných změn v betonu v různých hloubkách od povrchu zasaženého požárem, tzn. vysokou teplotou, která vyvolává chemické změny v betonu spojené s barevnými změnami. Podle Vrátného a Procházky [42] můžeme stanovením hloubky již nezbarvené části betonu určit isothermu pro 300 °C. K dosažení této hloubky lze použít kladívko s majzlíkem, nebo vrtačky s jádrovým vrtákem malého průměru. Při použití druhé možnosti vznikající jemný prach lze využít pro termickou analýzu a vyvrtaná jádra pro rtuťovou porozimetrii. Přímo na stavbě lze využít také další diagnostické metody, jako jsou například Schmidtovo kladívko a jemu podobné přístroje (např. vrtačka upravená pro měření odporu při vrtání tzv. „drilling-resistance test machine“), ultrazvukové metody a zkoušky odebraných zkušebních těles (válcové, krychelné), kterými lze přímo či nepřímo určit základní parametry zkoušené konstrukce (pevnost v tahu a v tlaku, modul pružnosti atd.). [41]

2.8 Působení vysokých teplot na betony

2.8.1 Vliv vysokých teplot a ohně na běžné cementové betony

Odolnost železobetonové konstrukce vůči vysokým teplotám může být definována jako schopnost uchovat v případě požáru svoji původní funkci, udržet svou únosnost, ochránit výztuž v konstrukci a blízké okolí ochránit před toxickými plyny. Působení vysokých teplot na vlastnosti betonu je komplexní děj a je závislý na několika aspektech:

- složení betonu (vodní součinitel, typ a obsah kameniva, typ cementu ...);
- hutnosti a homogenitě betonu;
- intenzitě teplotního zatížení betonové konstrukce během požáru.

Základní otázky ohledně teplotního vlivu na beton zahrnují komplexní identifikaci změn, k nimž dochází v cementové matici, ale také transportních jevů. Analýza se komplikuje skutečností, že cementový beton je kompozit mimo jiné složený ze dvou podstatně odlišných složek – cementového tmelu a kameniva. Navíc různé druhy kameniva se také liší svým mineralogickým složením. Když jsou jednotlivé minerály zahřívány, jsou také charakterizovány metamorfními přeměnami, které jsou typické a také rozdílné pro každý minerál. V konečném efektu z mnoha probíhajících změn, ke kterým dochází v zahříváném betonu, jsou výsledné změny fyzikálních, tepelných a mechanických vlastností betonu.

Působení vysokých teplot na beton má za následek postupné zhoršení jeho kvality. Dochází ke zhroucení struktury cementového tmelu a tím pádem také ke ztrátě nosné funkce. Bezpečnost nebo trvanlivost konstrukcí je pak závislá na tom, jakou pevnost má beton po dobu trvání žáru anebo jak se jeho pevnost změní žářem a ochlazováním (hasícími zákroky). Směrodatná je rychlost zahřívání betonu a dosažené maximální teploty a doba jejich působení. V první řadě lze očekávat, že zahřátím betonové konstrukce dojde k poklesu pevností (v tlaku i v tahu). Změny budou rozdílné podle složení cementu a pevných složek, podle intenzity žáru a doby jeho působení. Rozdíly v pevnosti v tlaku, ke kterým dochází za zvýšených teplot, vyplývají ze změn, ke kterým dochází v betonu v průběhu zahřívání.

Změny probíhající v betonové struktuře při působení vysokých teplot:

100 °C – 300 °C:

- uvolnění volné vody ve struktuře betonu;
- může dojít k povrchovému poškození ve formě mikrotrhlinek;
- může dojít ke zvýšení pevnosti v tlaku (tzv. kvazizpevnění), ale mírnému snížení pevnosti v tahu a modulu pružnosti.

300 °C – 1 200 °C:

- explozivní odprýskávání povrchových vrstev betonu;
- výrazné snížení pevností a narušení struktury betonu ve formě trhlin;
- výrazné snížení modulu pružnosti;
- nárůst dotvarování betonu.

nad 1 200 °C:

- totální pokles pevností a rozpad struktury betonu;
- tavení betonové struktury.

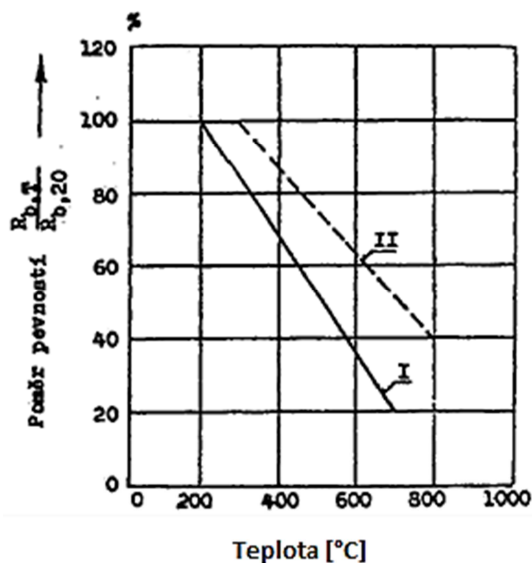
Tab. č. 7: Přehled změn, ke kterým dochází v mikrostruktuře betonu při zahřívání [32]

rozsah teplot	změny v mikrostruktuře betonu
20 – 200 °C	Pomalá ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. 80 °C – 150 °C dehydratace ettringitu 150 °C – 170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Počátek dehydratace CSH gelu. Ztráta fyzikálně vázané vody.
300 – 400 °C	Praskání křemičitého kameniva (350 °C). Kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody.
400 – 500 °C	Rozklad portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
500 – 600 °C	Přeměna křemene z fáze β na α (573 °C) v kamenivu a písku.
600 – 800 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta\text{-C}_2\text{S}$.
800 – 1 000 °C	840 °C – rozklad dolomitického vápence 930 °C – 960 °C – rozklad kalcitu – $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ Začátek vzniku keramické vazby, která nahrazuje hydraulické vazby, doprovázeno uvolňováním oxidu uhličitého.
1 000 – 1 200 °C	Tvorba Wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). 1 050 °C – tavení čediče
1 300 °C	Celkový rozklad betonu, tavení některých složek.

2.8.1.1 Změna pevnosti v tlaku

Dle [2] pro závislost pevnosti v tlaku na teplotě pro nevyztužené betony platí:

- zatížené vzorky vykazují menší úbytek pevnosti než vzorky nezatížené;
- ztráta pevnosti u betonů s nižším obsahem cementu je menší než u betonů s vyšším obsahem cementu;
- zatímco poměr cementu a kameniva se výrazně podílí na ztrátě pevnosti, vodní součinitel a původní pevnost mají zanedbatelný vliv;
- ztráta pevnosti je u lehkých betonů menší než u betonů hutných (viz Obr. č. 11). [2]

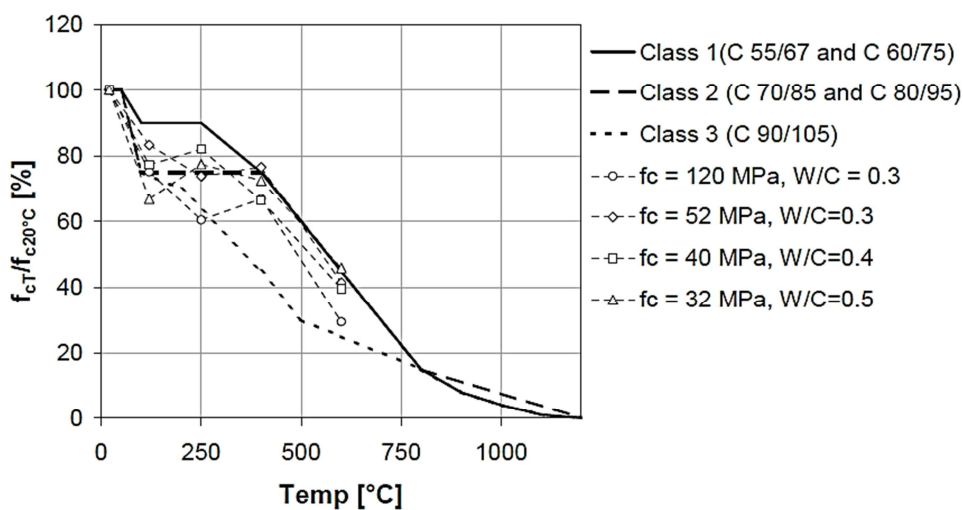


Obr. č. 11: Ztráta pevnosti betonu v tlaku v závislosti na teplotě [22]

I – hutný beton

II – lehký beton

Metoda, která se nejčastěji používá pro modelování vlivu teploty na pevnost v tlaku, zahrnuje stanovení ukazatele po zahřátí materiálu na teplotu T s ohledem na získané hodnoty pevnosti v tlaku stanovené při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozbor křivek zobrazených na Obr. č. 12 ukazuje, že poměrná pevnost v tlaku je klesající pro většinu testovaných betonů už po zahřátí na $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Následně je možné pozorovat částečné navrácení pevnosti okolo $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dalším výsledkem zahřívání je postupné snižování pevnosti, což je mimo jiné způsobeno: dehydratací CSH gelu, rozkladem portlanditu a narušením tranzitního přechodového pásma v důsledku rozdílu tepelného přetvoření cementového tmelu a kameniva.



Obr. č. 12: Poměrné pevnosti v tlaku v závislosti na teplotě (třídy 1 až 3 podle Eurokódu 2) a výsledky betonů s vápencovým kamenivem a různým vodním součinitelem [32]

Tzv. „kvazizpevnění“, ke kterému dochází při teplotách mezi 100 – 300 °C lze vysvětlit několika příčinami. Při těchto teplotách dochází k urychlení hydratačních procesů, nejvýrazněji u mladého nevyzrálého betonu, které je způsobeno zvýšením pohyblivosti molekul vody a také zvýšenou rozpustností portlanditu ve vodě. Jednou z dalších teorií je zpevnění betonové struktury snížením vlhkosti – částečným vysušením. Proč k tomu to jevu dochází, však není ještě zcela osvětleno a vědecky podloženo.

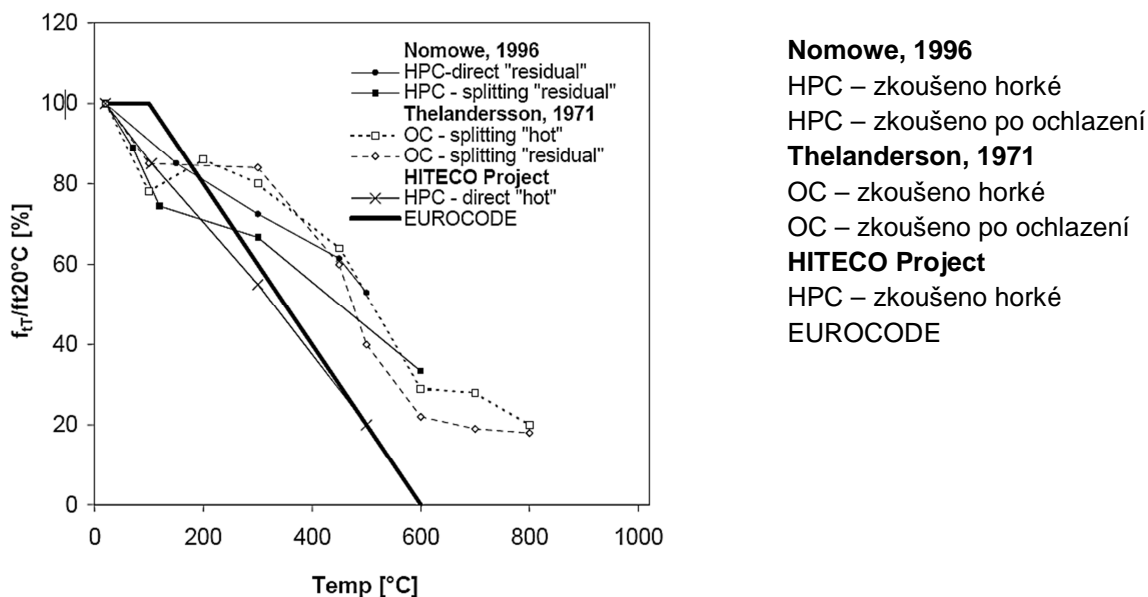
Jednou z možností je, že molekuly vody respektive OH⁻ ionty, které jsou součástí C-S-H gelu pravděpodobně nějakým způsobem narušují existující vazby, například tak, že se váží na Si⁴⁺, tvoří hydroxylové skupiny Si-OH a saturují tak vazebnou schopnost křemíku. [44]

Další možnost je, že molekuly vody tvoří monomolekulární film, který odděluje vrstvy C-S-H gelu a narušuje van der Waalsovy vazby mezi těmito vrstvami. [45]

2.8.1.2 Změna pevnosti v tahu

Výsledky změn pevnosti v tahu nejsou prezentovány tak často, jako výsledky týkající se pevnosti v tlaku. To je způsobeno technickými problémy při měření okamžitého napětí ještě zahřátých vzorků. Dalším problémem ke změření tohoto parametru je vliv vyrovnání vnitřní teploty. Z těchto důvodů je většina výsledků vztahujících se k pevnosti v tahu získána až po ochlazení materiálu.

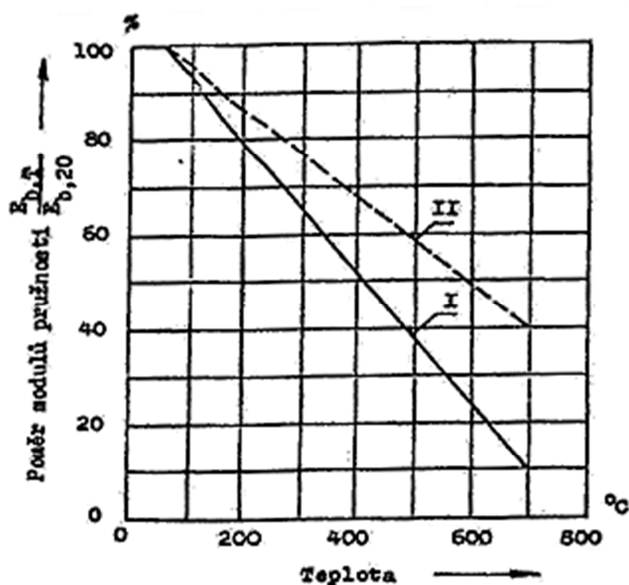
Seznámení se změnami pevnosti v tahu v závislosti na teplotě je velmi důležité z hlediska pochopení procesu odprýskávání. To proto, že tento typ porušení se objevuje až když vzniklé vnitřní napětí, které je především představováno tlakem vnitřní páry a přítomným teplotním deformačním gradientem, překročí hodnotu tahové pevnosti betonu. Obr. č. 13 prezentuje vliv změn poměrů tahových pevností, které byly získány pomocí různých technik: odděleně, přímé testování horkých vzorků a přímým tahem po ochlazení. Navíc Obr. č. 13 ukazuje diagram, který prezentuje změny pevnosti v tahu v závislosti na teplotě, které jsou doporučené podle Eurocodu 2. Počínaje teplotou 100 °C Eurocode 2 očekává pokles pevnosti v tahu 10 % na každých 50 °C.



Obr. č. 13: Výsledky poměrů pevností v tahu získané z různých výzkumných pracovišť a doporučené dle Eurokódu 2 [32]

2.8.1.3 Změna modulu pružnosti

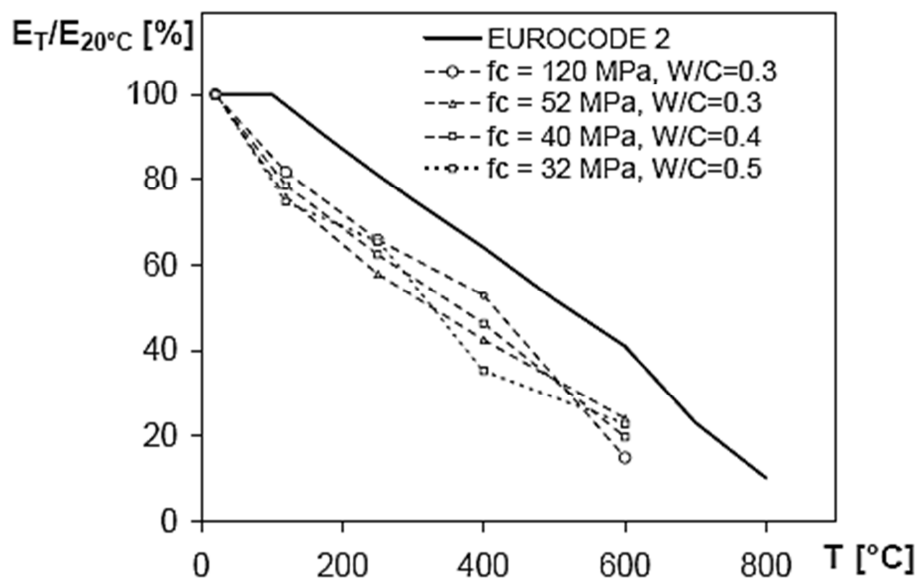
Vliv vysokých teplot na změnu hodnoty modulu pružnosti je podobný jako u změny pevnosti v tlaku. Na rozdíl od druhu cementu, který má minimální vliv na změnu modulu, druh kameniva se na změně modulu betonu podílí významně. Příkladem je Obr. č. 14, kde betony s křemičitým kamenivem vykazují výrazný pokles modulu pružnosti, kdežto u betonů s lehkým kamenivem dochází k velmi nízkému poklesu hodnot modulu pružnosti.



Obr. č. 14: Modul pružnosti betonů v závislosti na teplotě [22]

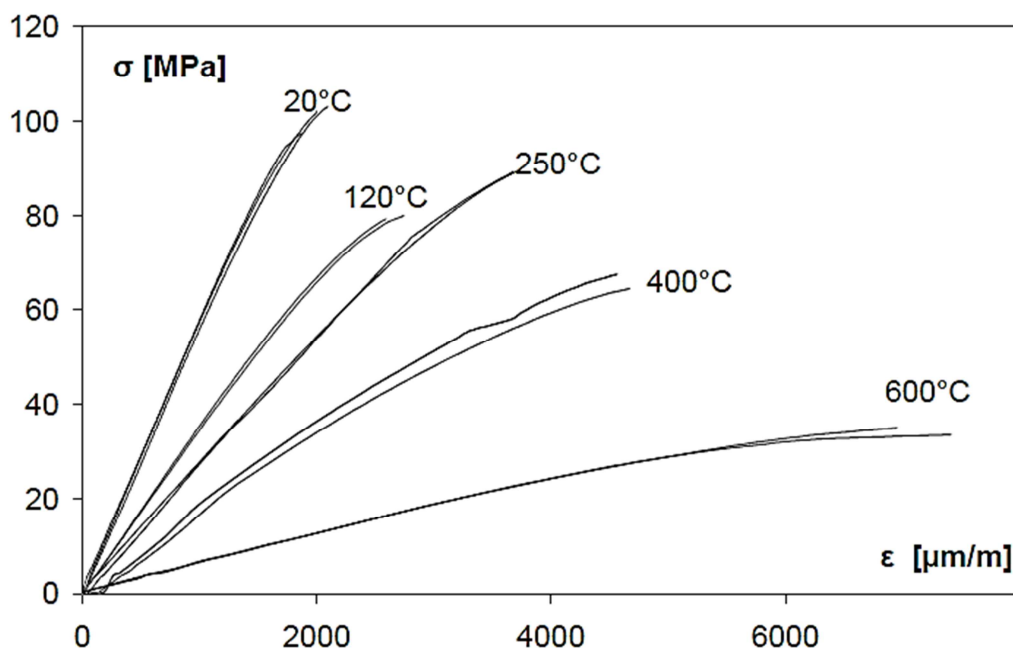
I – hutný beton

II – lehký beton



Obr. č. 15: Změny poměru modulů pružnosti v závislosti na teplotě, hodnoty byly měřeny na betonech z vápencového kameniva s různým vodním součinitelem [32]

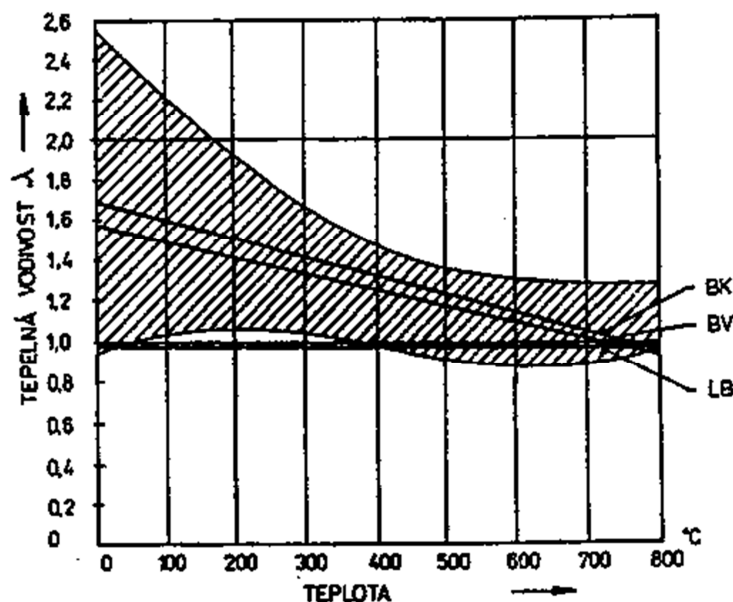
Na Obr. č. 16 jsou zobrazeny deformační křivky pro betony zahřáté na různé úrovně. Moduly pružnosti zahřátých betonů jsou velmi podobné (Obr. č. 15) pro všechny vodní součinitele. Zdá se tedy, že vliv vodního součinitele na změnu modulu pružnosti zahříváných betonů je minimální. Nicméně všechny výsledky jsou nižší, než je doporučeno v Eurocode 2.



Obr. č. 16: Diagramy $\sigma - \epsilon$ pro betony s pevností v tlaku 100 N/mm^2 (vodní součinitel 0,4), získané při teplotách 120°C , 250°C , 400°C a 600°C [33]

2.8.1.4 Změna tepelné vodivosti

Tepelná vodivost betonu se mění v závislosti na jeho vlastnostech, jako je teplota, vlhkost nebo hutnost. Nejlépe teplo vedou betony vlhké, s vyšším obsahem cementu a hutné betony s příměsemi. Na Obr. č. 17 potom můžeme vidět, že tepelná vodivost betonů z lehkých, suchých a pórovitých betonů je podstatně menší.



Obr. č. 17: Tepelná vodivost betonů v závislosti na teplotě (vyšrafovaná plocha vyznačuje rozptyl zahraničních měření pro hutné betony) [22]

BK – hutný beton s křemičitým kamenivem

BV – hutný beton s vápencovým kamenivem

LB – lehký beton s keramzitovým kamenivem

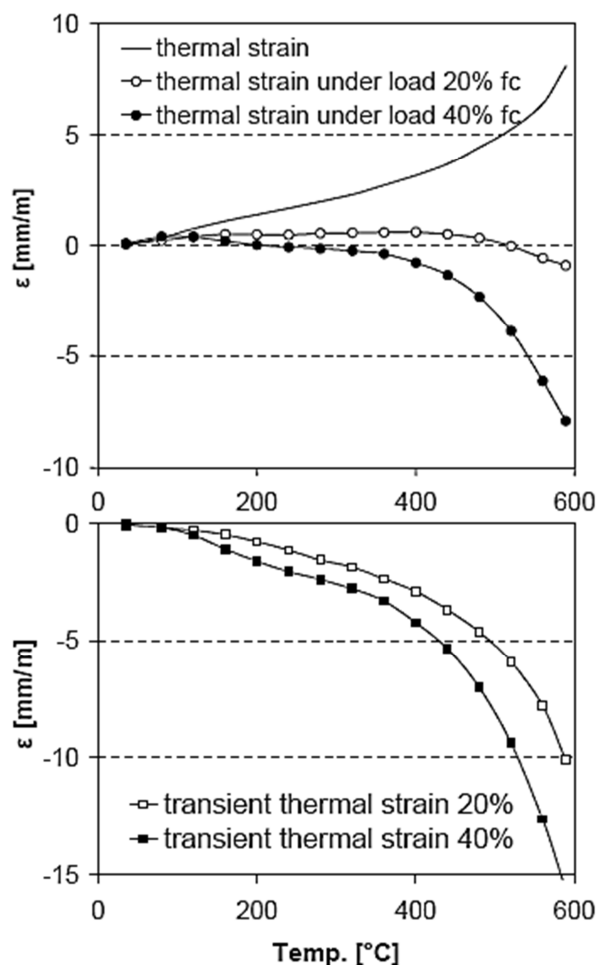
2.8.1.5 Tepelná deformace, tepelná deformace při zatížení a přechodná tepelná deformace betonu

Přechodná tepelná deformace se objeví během nestacionárního zahřívání betonu při zatížení. Podle směrnice Eurocode 2 [12] se přetvoření v betonovém prvku (ε), který je současně vystaven mechanickému a tepelnému zatížení, rovná:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{tr} \quad (2.11) [12]$$

kde ε_s je okamžitá deformace závislá na napětí, ε_{th} je tepelná deformace, ε_{tr} je přechodná tepelná deformace.

Tepelná deformace (ε_{th}) a tepelná deformace při zatížení (ε), které jsou naměřeny, umožňují stanovení přechodné tepelné deformace (ε_{tr}). Příklady křivek tepelné deformace, tepelné deformace při zatížení tlakem a přechodné tepelné deformace jsou uvedeny na Obr. č. 18. V dolním grafu se křivka přechodné tepelné deformace získá odečtením hodnoty tepelné deformace od tepelné deformace při zatížení.



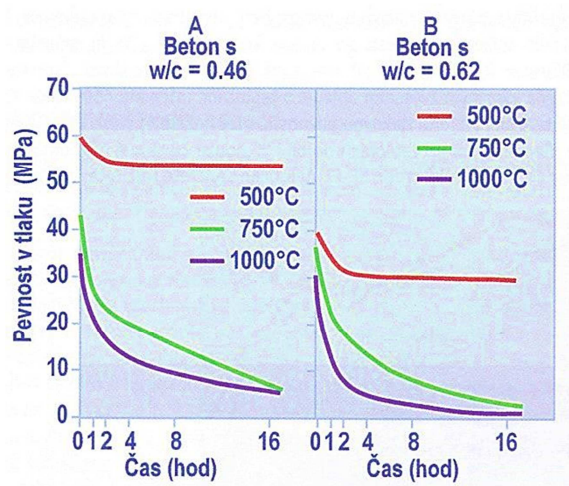
Obr. č. 18: Tepelná deformace, tepelná deformace při zatížení a přechodná tepelná deformace HPC betonu [34]

2.8.1.6 Vliv vlhkosti

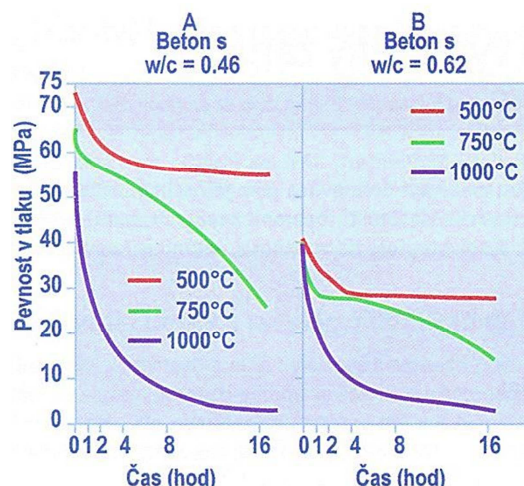
Jedním z faktorů podílejícím se na destruktivním odprýskávání betonu je jeho vlhkost, protože při velmi nízké vlhkosti k destruktivnímu odprýskávání nedochází. Některé laboratorní testy se provádí se vzorky plně nasycenými (uložení ve vodní lázni), čímž je dosaženo srovnatelných podmínek vlhkosti vzorku pro různá testování. Vlhký – plně nasycený beton však neodpovídá reálným podmínkám konstrukce. Je třeba se při testování zamyslet na jaké konstrukce by daný beton měl být použit a tomu přizpůsobit vlhkost zkoušených betonových vzorků vzhledem k reálným hodnotám vlhkosti dané konstrukce (např. vlhkost betonových tunelových ostění se může pohybovat okolo 4,0 % a více [5]).

2.8.1.7 Vliv vodního součinitele

Dle některých názorů (Malhotra [50]) nemá hodnota vodního součinitele vliv na snížení pevnosti betonu po vystavení požáru. Naopak však byly naměřeny a publikovány data, která jasně dokazují, že betony s nižším vodním součinitelem dosahují po zatížení požárem vyšších pevností (Obr. č. 19, Obr. č. 20).



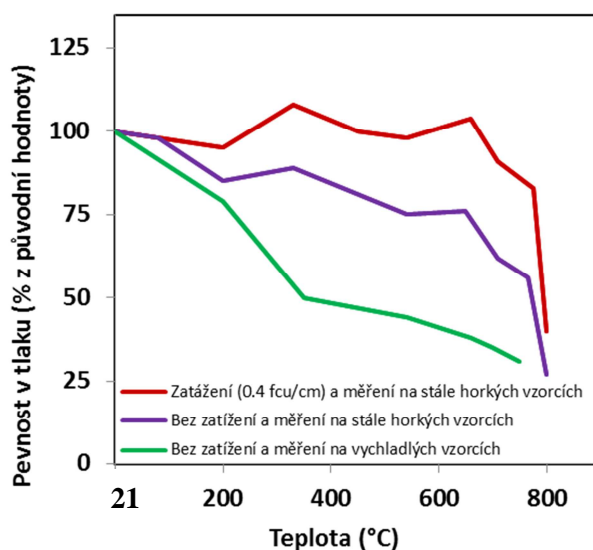
Obr. č. 19: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících křemičité kamenivo [4]



Obr. č. 20: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících vápenaté kamenivo [4]

2.8.2 Vliv provozního zatížení

Na Obr. č. 21 je vidět chování betonu s krychelnou pevností 27,5 MPa s různým zatížením v průběhu zkoušky. Beton byl v jednom z případů zatížen na 40 % jeho tlakové pevnosti.



Obr. č. 21: Vliv zatížení na pevnost v tlaku [4] – překresleno

Tento beton zahříváný bez zatížení ukázal výrazné snížení pevnosti (asi 50 %) kolem 500 °C. Měření bylo prováděno po zchladnutí vzorku na pokojovou teplotu. Vzorky, na nichž byla zjišťována pevnost v tlaku bez zatížení a v horkém stavu, dosahovaly při teplotě 600 °C asi 75 % původní pevnosti. Zdá se tedy, že pokud se pevnost měří až po vychladnutí vzorků, je pokles pevnosti výraznější, než je tomu ve skutečnosti na horkém betonu a ještě k tomu se

zatížením. Zatížení může eliminovat porušení, protože expanze způsobená vysokou teplotou je redukována zatížením. [4]

Zahřívání betonové vzorky, které než byly zkoušeny na pevnost v tlaku, tak byly ochlazeny na pokojovou teplotu, ukázaly výrazně vyšší úbytek pevnosti ve srovnání s horkými vzorky zkoušenými při dané teplotě. Například po teplotě 600 °C měly vzorky zkoušené až po ochlazení pouze 40 % původní pevnosti, zatímco vzorky zkoušené v ještě horkém stavu dosáhly 75 % původní pevnosti. Chování betonových vzorků, které byly zkoušeny horké a zatěžovány až do 40 % pevnosti během tepelné expozice je ještě lepší. Z Obr. č. 21 je možné vidět, že až do teploty 700 °C si vzorky z této série v podstatě zachovávají své mechanické vlastnosti konstantní. [4]

2.8.3 Vliv vysokých teplot a ohně na speciální betony

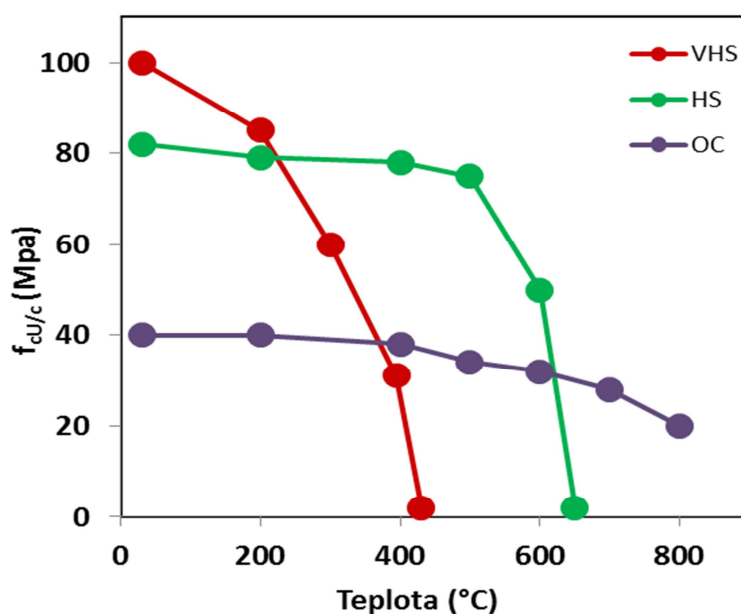
Z hlediska působení vysokých teplot na beton jsou známy určité odlišnosti při sledování betonů s běžnými pevnostmi a betonů vysokohodnotných. Vedle vlhkosti je neméně důležitým faktorem ovlivňujícím míru porušení betonu pórovitost a transportní schopnosti cementové matrice betonu. Expandovaná vodní pára, která může prostupovat otevřenou pórovitou strukturou cementové matrice, způsobí výrazně menší destruktivní účinky než u hutné matrice. Vliv pórovité struktury cementové matrice na snížení destruktivních účinků expandované vodní páry je výrazně omezen u betonů vysokohodnotných (HPC), vysokopevnostních (HSC) a samozhutnitelných (SCC). K dosažení požadovaných vlastností těchto betonů se využívá superplastifikátorů a jemných minerálních příměsí. Tyto betony pak mají značně hustou a homogenní strukturu cementové matrice s redukovanou kapilární pórovitostí, čímž je difúze vodní páry značně omezena. U těchto betonů je použití PP vláken prozatím jedinou možnou variantou zvýšení difuzních vlastností a tím pádem omezení destruktivních účinků expandované vodní páry.

V případě zahřívání vysokohodnotných, vysokopevnostních a samozhutnitelných betonů zabraňuje hutná struktura cementového kamene prostupu páry na povrch konstrukce. Pára vzniká jednak odpařováním volné vody a také rozkladem C-S-H, C-A-H fází a portlanditu. Tím může dojít k odprýskávání povrchových vrstev betonu („explosive spalling“ viz kapitola 2.8.4). Dá se říci, že platí, že se zvyšující se pevností betonu se zvyšuje riziko explozivního odprýskávání z důvodu hutnější struktury cementového kamene, což je způsobeno:

- snížením dávky vody → snížení množství kapilárních pórů;
- zvýšením množství cementu → zhutnění struktury cementového kamene;
- zvýšením množství příměsí → zhutnění struktury cementového kamene.

Pokud je vysokým teplotám vystaven beton s pevností kolem 100 MPa, tlak vodní páry vzniklý v důsledku zahřívání, je ještě výrazně vyšší než u betonů nižších pevností. K odprýskávání betonu může dojít již při 250 °C. Ke kompletní destrukci může dojít již při teplotě kolem 400 °C. [51]

Na Obr. č. 22 je zobrazen vliv počáteční pevnosti betonu v tlaku (40 MPa, 80 MPa, 100 MPa) na změnu této pevnosti v průběhu zahřívání. Všechny betony byly z vápenatého kameniva.



Obr. č. 22: Vliv teploty na ztrátu pevnosti běžného betonu (OC, pevnost v tlaku 40 MPa), vysokopevnostního betonu (HS, pevnost v tlaku 80 MPa) a vysokopevnostního betonu s pevností 100 MPa (VHS) [4] – překresleno

2.8.4 Explosivní odprýskávání

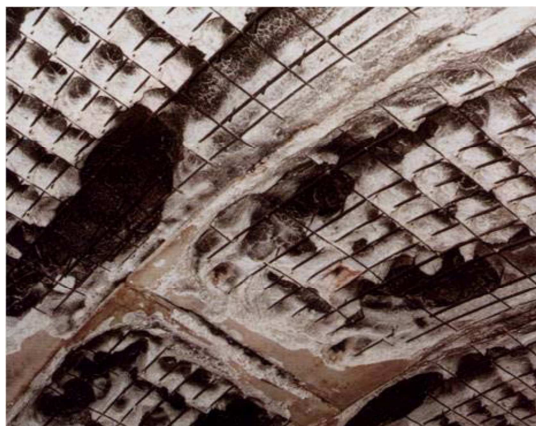
Mechanismy způsobující explozivní odprýskávání či rozpad při požáru nebyly zatím plně vysvětleny. Je však zřejmé, že nejdůležitějšími faktory jsou vlhkost betonu a mikrostruktura materiálu. Voda obsažená v betonu se při teplotě nad 100 °C mění na vodní páru. S rostoucí teplotou roste také tlak vodní páry v betonu. Pokud je mikrostruktura betonu spíše otevřená, (vysoký vodní součinitel), pára může unikat poměrně rychle, čímž se tlak vodní páry sníží. Pokud má však beton hustší strukturu, tlak vodní páry může dosáhnout vysokých hodnot převyšujících hranici 3 MPa. V důsledku vysokého vnitřního tlaku může náhle dojít k odtržení malé vrstvy cementového kamene u povrchu betonu, tento jev nazýváme jako explozivní odprýskávání. [1]

Z hlediska vlivu odprýskání na požární bezpečnost konstrukce se jedná o velmi nepříznivý jev, který negativně ovlivňuje následující klíčové vlastnosti železobetonové konstrukce:

- oslabení průřezu;
- urychlení transportu tepla do hlubších vrstev konstrukce;
- obnažená výztužných prvků;
- urychlení degradace konstrukce – zhoršení fyzikálně – mechanických vlastností betonu a ocelové výztuže.

2.8.4.1 Mechanismus explozivního odprýskávání

Mechanismus tohoto efektu, projevujícího se zejména u vysokohodnotných betonů (High Performance Concrete = HPC), tzv. spalling, byl podrobně popsán Harmatou [52]. Beton má v omezené míře izolační schopnost a tudíž teplota směrem od povrchu ohřívané konstrukce klesá. Odezvou betonu na teplotní zatížení je prudké odpařování vody. Voda obsažená v betonu se při teplotě nad 100 °C mění na vodní páru. Zahřívání vlhkých materiálů způsobuje přesun vlhkosti do chladnějších zón. S rostoucí teplotou roste také vnitřní tlak vodní páry v betonu. Pokud je mikrostruktura betonu spíše otevřená, tzn. propojený pórový systém v důsledku vysokého vodního součinitele, pára může unikat poměrně rychle, čímž se tlak vodní páry sníží. Pokud má však beton hutnější strukturu, tlak vodní páry může dosáhnout vysokých hodnot, které mohou mít destruktivní účinky. Navíc omezí tepelnou roztažnost zahřívajícího betonového povrchu. Tyto dva překrývající se faktory mají za následek rozvoj nepříznivého stavu v betonu. V případě, že zatížení překoná pevnostní limit betonu, nastane explozivní odprýskávání. Tradiční beton s běžnou konstrukční pevností není tak náchylný k explozivnímu odprýskávání, protože má poněkud otevřenější pórovou strukturu.



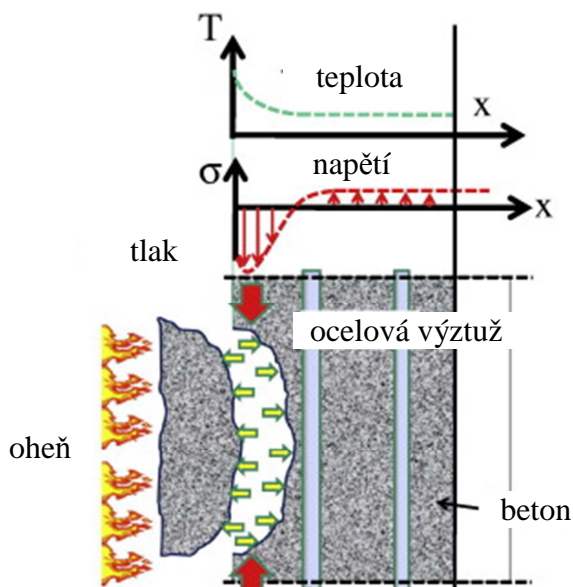
Obr. č. 23: Příklad explozivního odprýskávání na tunelovém ostění [6]

Druhy odprýskávání betonu:

- destrukce – doprovázena uvolněním malých částí v tloušťce v rozmezí mm až cm (tzv. „popcorn efekt“);
- explozivní uvolnění velkých částí betonu – doprovodným efektem je ztráta krycí vrstvy ocelové výztuže, jež je citlivá na vysoké teploty.

Existují dva mechanismy, díky kterým k tomuto jevu dochází. První mechanismus spočívá v termo – mechanickém procesu, který je přímo spojen s teplotním polem. Jak roste teplota povrchu betonu, teplotní gradient vede k distribuci napětí v tlaku ve směru rovnoběžném s povrchem betonu, rozdělení vede ke vzniku tahových napětí v kolmém směru. Pokud hodnoty tahového namáhání jsou vyšší než mez pevnosti v tahu, dojde k explozivnímu odprýsknutí betonu, jak je znázorněno na Obr. č. 24. [19]

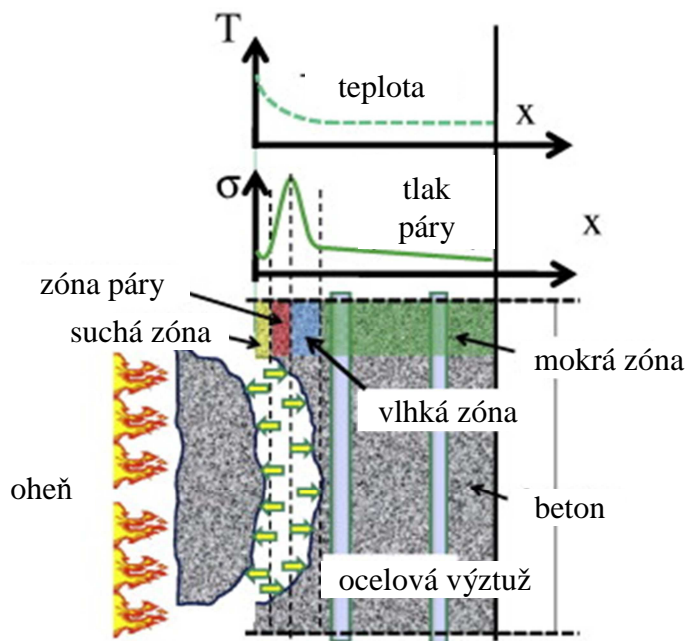
Tento mechanismus popisuje také Bažantova hypotéza: vysvětluje odprýskávání betonu v zabránění tepelné dilatace v blízkosti tepelného zatížení, které vede ke vzrůstu napětí až na samotnou mez pevnosti. Naopak pórovým tlakům přisuzuje Bažantova hypotéza pouze sekundární roli. [20]



Obr. č. 24: Mechanismus odprýsknutí betonu – tepelná dilatace [19]

Druhý mechanismus spočívá v přesunu vlhkosti ve formě kapalné vody a páry. Když se teplota povrchu betonu zvyšuje, obsah vlhkosti betonu se mění s hloubkou od povrchu, jak je znázorněno na Obr. č. 25. V důsledku toho, tlak par v zóně par a vlhké zóně bude větší než v suché a mokré oblasti. Kolem vrcholu tlaku par se od vysokého tlaku páry v betonu vyvíjí tahové namáhání, což způsobuje explozivní odprýsknutí betonu. [19]

Tento mechanismus popisuje také Anderbergova hypotéza: odprýskávání betonu je založeno na předpokladu nízké permeability prostředí. Nízká permeabilita prostředí vede k vysokým gradientům pórového tlaku. Dle předpokladu pórový tlak způsobuje selhání, které se projevuje odprýskáváním (spalling). Tento defekt je tím výraznější, čím je rychlost tepelného zatížení vyšší. Tato teorie je v souladu s experimentálním pozorováním i numerickými výsledky. [20]



Obr. č. 25: Mechanismus odprýsknutí betonu – tlak par [19]

Dle charakteru odprýsknutí a jeho příčin dále rozlišujeme tyto základní typy. Popsané typy explozivního odprýskávání se ve většině případů nevyskytují pouze ojedinele. V reálném případě je explozivní odprýskávání synergií několika nebo všech následujících jevů:

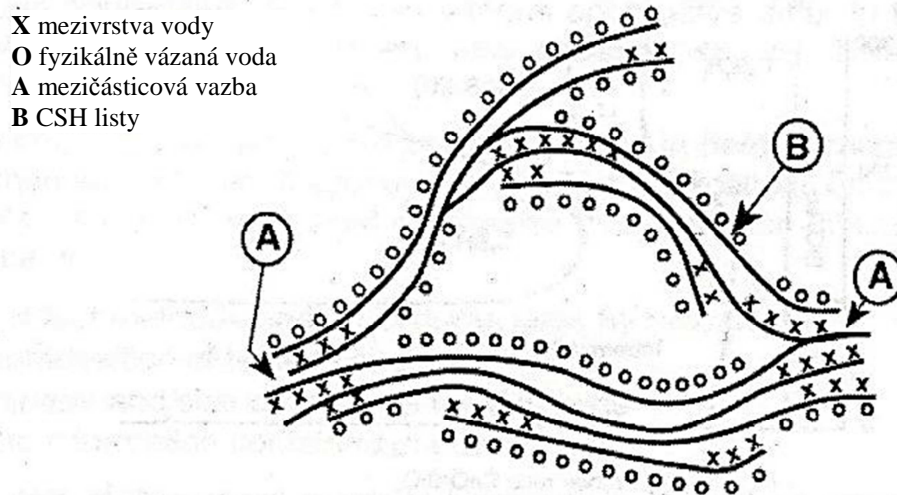
- **explozivní odprýskávání** – projevuje se v úvodní fázi, cca do 30 minut po vzniku požáru. Projevuje se prudkým odlupováním větších či menších částí betonu (plošný rozměr 100 – 300 mm, v hloubce 15 – 20 mm) z povrchové plochy. Tento způsob odprýskávání se může projevit ojedinele, v pravidelných intervalech i v místech kde již k odprýsknutí došlo. Kritičnost tohoto jevu spočívá v jeho vysoké intenzitě, vedoucí až ke vzniku hlubokých výmolů a redukci průřezové plochy konstrukce.
- **plošné odprýskávání** – se projevuje též v úvodní fázi tepelného zatížení, typickým projevem je vznik plošných podpovrchových puchýřů a dutin a jejich následné odprýsknutí. Je doprovázen odlétáváním menších částecek o rozměru cca 20 mm. Kritičnost spočívá v celoplošném odstranění krycí výztuže a její celkové odhalení.
- **štěpení a odprýsknutí částí kameniva** – souvisí především s rozdílnou tepelnou roztažností jednotlivých složek betonové směsi a narušení vazby mezi kamenivem a zatvrdlou cementovou pastou v důsledku fyzikálních a chemických přeměn. Jedná se především o fázovou změnu křemene z triklinické krystalové soustavy do soustavy hexagonální, ke které dochází při teplotě 573 °C.
- **oddělení hran a rohových částí** – se projevuje v pokročilejší fázi tepelného namáhání, kdy se plně rozvinou trhliny v důsledku tahových napětí podél hran a rohů v místech uložení výztuže.
- **odprýskávání v důsledku chemického narušení** – je způsobeno chemickým rozkladem cementové pasty a závisí především na velikosti dosažené teploty v celém průběhu tepelného zatížení. [20]

2.9 Vliv vysokých teplot na složky betonu

2.9.1 Vliv vysokých teplot na cementovou pastu

2.9.1.1 Transport vody

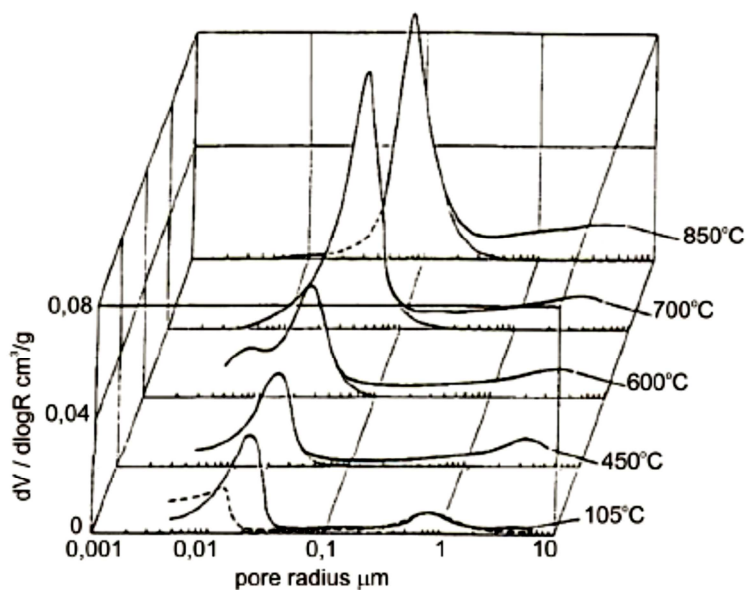
Jedním z procesů, ke kterým dochází v zahříváných cementových pastách, je ztráta obsažené vody. Voda může být v pevných látkách vázána různě. Jako první se odpařuje volná voda, potom pokračuje voda obsažená v kapilárách a po ní následuje voda absorbovaná na povrchu jemných minerálů. V poslední fázi začne proces odstraňování chemicky vázané vody, jež je vázána s cementovými hydráty, probíhá tzv. dehydratace. Mechanické vlastnosti cementové pasty jsou silně ovlivněny chemickými vazbami a soudržností sil mezi "listy", které jsou tvořeny C-S-H gelem. Předpokládá se, že přibližně 50 % pevnosti cementové pasty zajišťuje soudržnost sil (obrovské oblasti "listů" C-S-H gelu). Odpařováním vody, k němuž dochází mezi "listy" C-S-H gelu, jsou silně ovlivňovány mechanické vlastnosti cementové pasty. Obr. č. 26 ukazuje model C-S-H gelu. [29]



Obr. č. 26: Konstrukce modelu CSH fází [29]

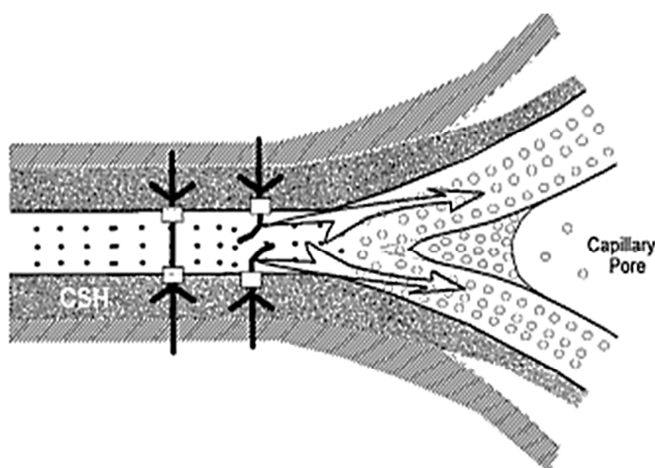
Dehydratačním procesem C-S-H gelu zmenšují hydráty svůj objem, což zvyšuje pórovitost cementové matrice. Narůstá celkový objem pórů a tím pádem také průměrná velikost pórů. Obr. č. 27 ukazuje příklady změn porozity v důsledku zvýšené teploty. Přetvoření v cementovém tmelu je výsledkem přetvoření jejich složek, snižuje se podíl zhydratovaných fází a naopak dochází k nárůstu podílu fází nezhydratovaných. Cementový tmel se rozpíná přibližně při teplotě 200 °C, zatímco jeho intenzivní smrštění začíná až po překročení této teploty.

Jak ukazuje následující Obr. č. 27, ke změnám v textuře cementového kamene vystaveného vysokým teplotám dochází na úrovni nanopórů. S rostoucí teplotou dochází k nárůstu objemu pórů menších než 0,1 μm.



Obr. č. 27: Rozdíl distribuce velikosti pórů zahřívání cementového tmelu s přidáním křemičitého úletu [30]

Při vzrůstající teplotě v intervalu do 100 °C dochází k hydrataci betonu (přeměna volné vody v chemicky vázanou) s odpovídajícím uvolněním tepelné energie, jejímž řídicím procesem je reakce alitu C_3S (případně belitu C_2S) s vodou, při které vzniká hydrosilikát vápenatý C-S-H a portlandit (hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$). Přesáhne-li teplota 100 °C, začíná dehydratace, tj. je uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů a při teplotě nad 200 °C dochází k uvolňování též vody vázané. Při teplotě nad 300 °C pokračuje rozklad hydrosilikátu vápenatého a portlanditu za výrazného vzniku mikrotrhlin. [21]



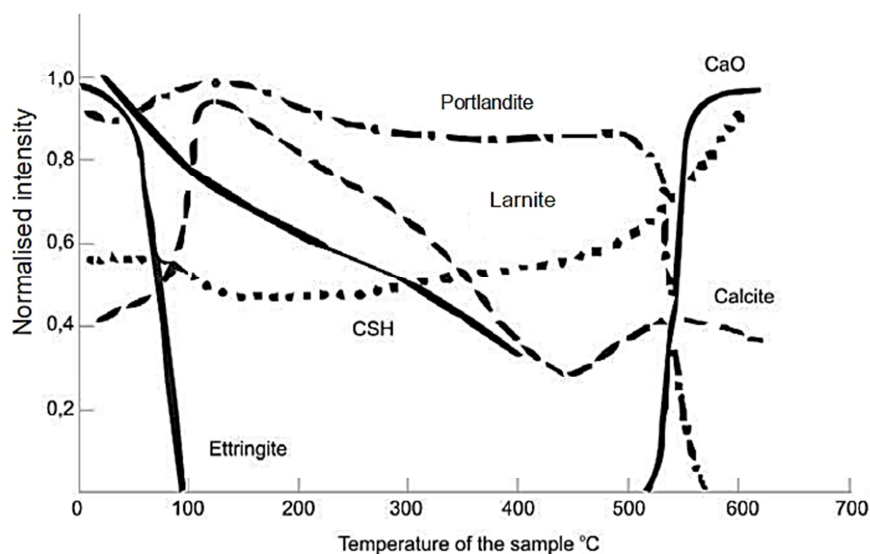
Obr. č. 28: Náčrt dehydratace – mikrodifúze chemicky vázané molekuly vody z mikropórů do kapilárních pórů [25]

2.9.1.2 Fázové změny

Pokud je cementový tmel zahříván v uzavřeném, vlhkém prostředí (tzv. autoklávování), může dojít k hydrotermální reakci, která může způsobit podstatné změny

v mikrostruktuře z hlediska fyzikálního a chemického. Toto je dobře známá technologie v prefabrikaci, kde se materiál vystaví vysokému tlaku a vysokým teplotám a tím dosáhne hydratačních změn v mikrostruktuře, což je často příčinou zvýšení pevnosti cementového tmelu. Povaha fázových změn bude záviset na několika aspektech:

- mineralogické složení cementu;
- poměr Ca/SiO₂;
- výši jemnosti krystalů nebo křemičitých úletů;
- na úrovni dosažené teploty a tlaku. [3]



Obr. č. 29: Změny základních složek portlandské cementové pasty [27]

Obr. č. 29 demonstruje změny v množství základních minerálů cementové pasty z portlandského cementu zahřáté na 700 °C s nárůstem 1 °C za minutu. Pozorování bylo provedeno na šesti základních minerálech cementové pasty: portlanditu, C-S-H gelu, ettringitu, larnitu, kalcitu a oxidu vápenatém. Ettringit se rozkládá jako první, při teplotách 100 °C. V C-S-H gelu je dehydratace postupná a dochází k ní už od začátku zahřívání materiálu. Lze si všimnout, že struktura cementové pasty je částečně narušena již při teplotě 105 °C, což je mimochodem standardní teplota pro sušení stavebních materiálů. Jakmile se cementová pasta zahřívá na teplotu v rozmezí 500 – 550 °C, obsah portlanditu rychle klesá, jelikož se rozkládá podle následující reakce:



Rozkladná reakce portlanditu vysvětluje zvýšení obsahu CaO v cementové pastě při teplotě okolo 550 °C, což je možno pozorovat právě na Obr. č. 29. CaO vzniklé touto reakcí zůstává v betonu po ochlazení bez využití. [32]

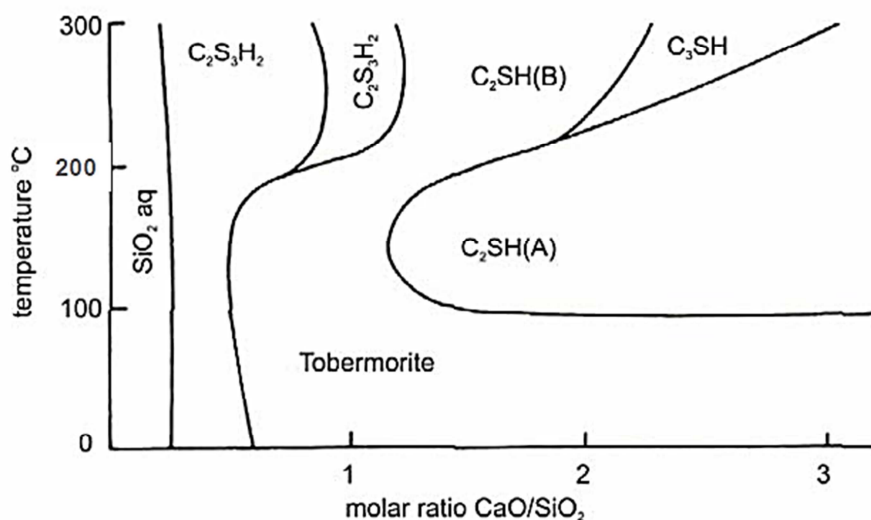
Nad 650 °C nastává rozklad CaCO_3 , který vzniká karbonací složek cementového tmelu. Nad 750 °C dojde k postupné přeměně dehydratovaného C-S-H gelu na nesilikát, který se svou strukturou podobá C_2S . K rozkladu dehydratovaného C-S-H gelu dochází při teplotách vyšších než 800 °C. Hlavními složkami cementového tmelu, který byl vystaven teplotě nad 800 °C, jsou CaO, larnit, wollastonit, brownmillerit a gehlenit. [53]

Ve vlhkém prostředí nejsou dehydratované cementové pasty stálé a dochází u nich ke zpětné rehydrataci složek, čímž dojde ke vzniku hydratovaného C-S-H gelu, hydratovaného ettringitu, portlanditu, pokud dojde ke karbonaci také CaCO_3 . Larnit zůstává beze změny.

Tab. č. 8: Teplotní rozmezí rozkladu některých složek ztvrdlé cementové pasty [43]

složka	vzorec	teplotní rozmezí rozkladu [°C]
kalciumsilikáthydráty	CSH typ 1 a 2	95 – 120
ettringit	$\text{C}_4\text{ASH}_{12}$	125 – 135
monosulfát	$\text{C}_6\text{ASH}_{32}$	185 – 195
portlandit	CH	495 – 550
uhličitan vápenatý	CaCO_3	850 – 1000
sádrovec	SCH_2	160 – 185
kalciumalumináthydráty	CAH_{10}	110 – 130
	C_2AH_8	175 – 185
	C_3AH_6	280 – 320

Zahřívání cementového tmelu s poměrem CaO/SiO_2 okolo hodnoty 1,5 až na teploty přes 110 °C dává podmínky ke vzniku několika podob křemičitanu vápenatého, které jsou obecně špatně krystalické. Obr. č. 30 ukazuje, že pokud poměr CaO/SiO_2 je přibližně 1 a teplota dosahuje nad 150 °C, nastávají podmínky pro vznik tobermorit gelu. Zvýšením teploty na rozmezí 180 – 200 °C mohou vznikat ostatní křemičitany xonolit a hillebrandit. [26]



Obr. č. 30: Vliv molárního poměru (CaO/SiO_2) a teploty na CSH fáze hydratačních produktů [26]

2.9.2 Vliv vysokých teplot na kamenivo

Kamenivo v betonu, co se týče vlivu působení vysokých teplot, plní klíčovou úlohu a mělo by se brát v úvahu už od samého počátku návrhu betonové směsi. Kamenivo v betonu zabírá 60 – 80 % objemu a jednotlivé druhy kameniva při teplotním zatížení mohou mít zásadní význam na odolnost betonu při vysokých teplotách. Jednotlivé druhy kameniva mají odlišné reakce na teplo, které jsou doprovázeny fyzikálně – chemickými změnami v kamenivu. Klíčovým faktorem v chování teplotně zatěžovaného betonu je chemická a fyzikální stabilita kameniva. Volba kameniva – plniva je proto důležitým faktorem při zajištění tepelné stability betonu při požáru.

Z makroskopického hlediska je nejnápadněji pozorovatelnou změnou tepelně zahřívání kameniva vizuální posouzení, kde kromě rozpadu jednotlivých zrn lze sledovat i změnu v barvě kameniva, viz Tab. č. 9. Samozřejmě pro různé druhy kameniva bude vlivem vysoké teploty barevná změna odlišná.

Tab. č. 9: Příklad barevných změn kameniva v průběhu zahřívání [41]

teplota	barevná změna kameniva
250 – 300 °C	<ul style="list-style-type: none"> • křemenné kamenivo se zbarvuje do růžova až červena v důsledku oxidace sloučenin železa okolo 300 °C
450 – 500 °C	<ul style="list-style-type: none"> • zvýrazňuje se červené zbarvení křemenného kameniva až do teploty 600 °C • křemenné kamenivo se může zbarvit do šeda až bíla
800 – 1 000 °C	<ul style="list-style-type: none"> • vápenaté kamenivo se zbarvuje do bíla

Jako téměř všechny pevné látky, také kamenivo zvyšuje svůj objem s rostoucí teplotou. Proto je teplotní roztažnost důležitou charakteristikou kameniva z hlediska jeho reakce na zvýšenou teplotu. Tab. č. 10 udává hodnoty koeficientu lineární tepelné roztažnosti pro různé typy hornin.

Tab. č. 10: Lineární tepelné roztažnosti pro různé typy hornin [3]

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

Mineralogické složení kameniva rozhodne o souhrnné tepelné roztažnosti, jelikož se minerály liší v hodnotě tepelné roztažnosti. Kromě tepelné roztažnosti mohou probíhat i

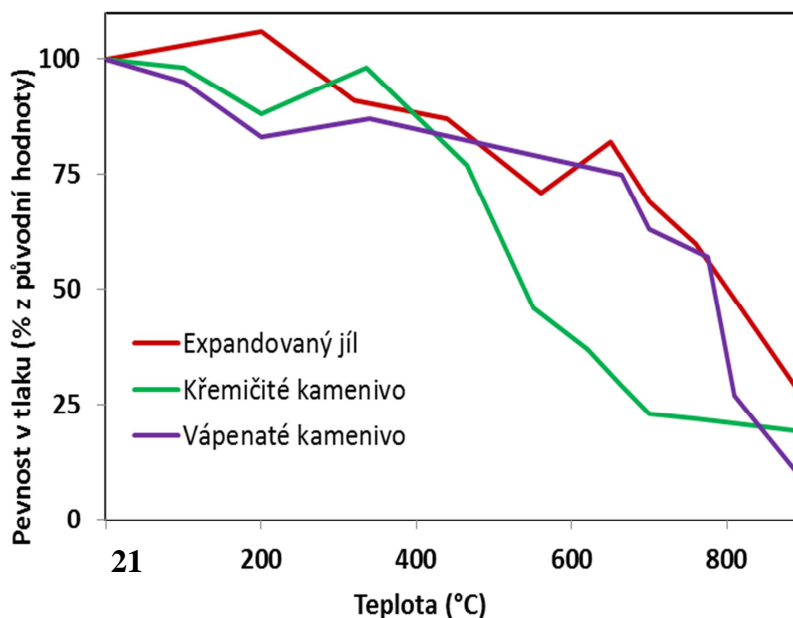
metamorfní přeměny jednotlivých minerálů, například přeměna křemene v kamenivu při teplotě 573 °C. Tato změna vyvolává objemový nárůst přibližně o 0,84 %. Tepelná nestabilita vápence začíná již při teplotě 600 °C. K rozkladu uhličitanového kameniva na CaO a CO₂ dochází přibližně při teplotě 700 °C. Při ochlazování mohou CaO formy hydratovat s výslednou expanzí až 40 %.

Možnost detekce, zda v průběhu požáru došlo v kamenivu k modifikačním přeměnám křemene, je velmi obtížná. Tyto procesy jsou totiž reverzibilní, po ochlazení se křemenná složka navrácí do původní modifikace.

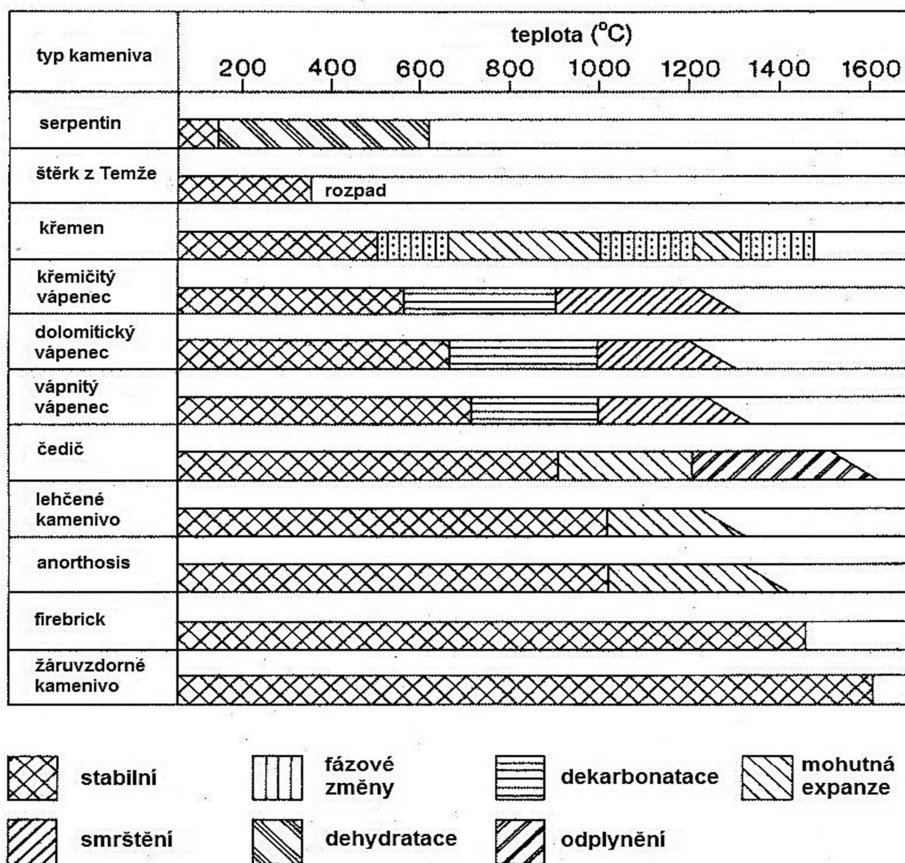
U betonů s kamenivem obsahujícím zejména křemen (Obr. č. 19) je zaznamenáno výraznější snížení pevnosti než u betonů s vápenatým kamenivem (Obr. č. 20), zejména pokud je teplota žáru nižší než 750 °C. Lepší chování betonů s vápenatým kamenivem při vysokých teplotách je vysvětlováno vyšším množstvím tepla, které se spotřebuje při endotermickém rozkladu na oxid uhličitý při teplotě asi 800 °C. [4]



Obr. č. 31 ukazuje vliv teploty na pevnost betonu v tlaku s různými typy kameniva. U křivky betonu s křemičitým kamenivem je jasné zřetelné snížení pevnosti při teplotě okolo 570 °C, kdy dochází ke konverzi křemene z modifikace β na modifikaci α, které je doprovázeno již zmíněným nárůstem objemu.

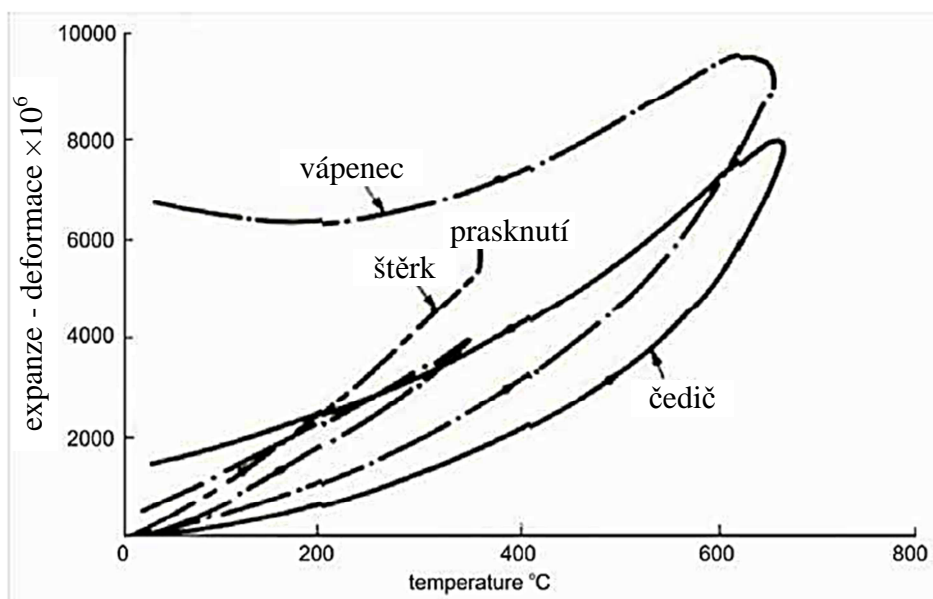


Obr. č. 31: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku způsobené zvýšením teploty [4] – překresleno

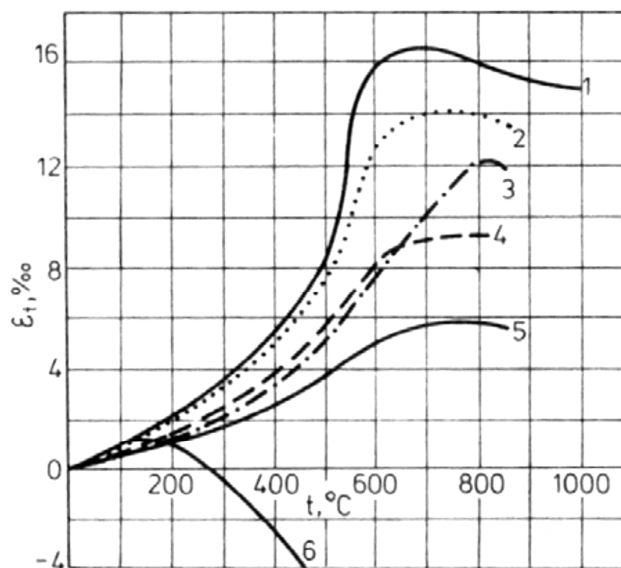


Obr. č. 32: Stabilita a procesy probíhající v průběhu zahřívání kameniva [15]

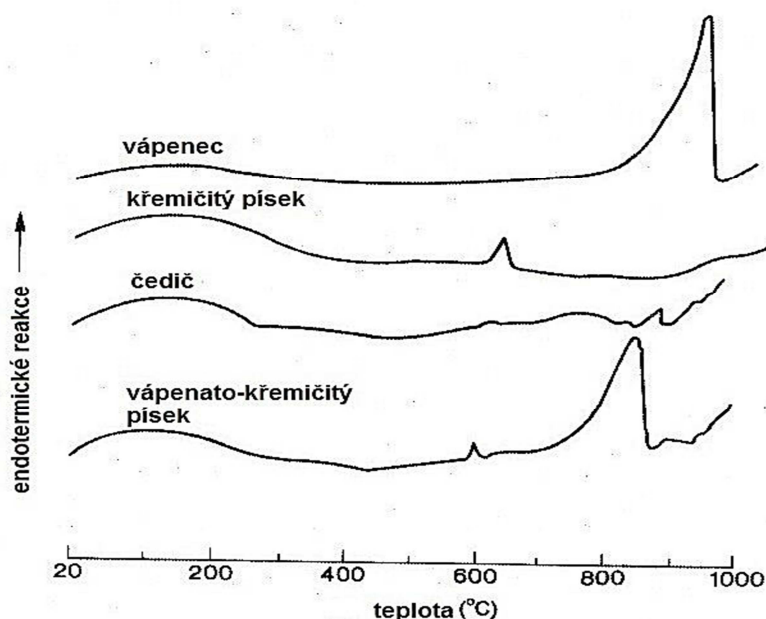
V důsledku reakce kameniva na vysoké teploty je vhodné zvolit do betonu kamenivo s nízkou tepelnou roztažností a zanedbatelným zbytkovým přetvořením. Na Obr. č. 33 jsou zobrazeny příklady křivek tepelného přetvoření pro štěrk, vápenec a čedič. Kameniva, která vykazují tepelnou stabilitu, nemají žádné vrcholy podél DTA a TGA křivek (viz Obr. č. 35).



Obr. č. 33: Tepelné přetvoření vybraných kameniv [31]



Obr. č. 34: Tepelná přetvoření betonů, které obsahují různá kameniva: 1 – křemičité kamenivo, 2 – pískovec, 3 – vápenec, 4 – čedič, 5 – kamenivo z expandovaného jílu, 6 – cementový tmel [28]

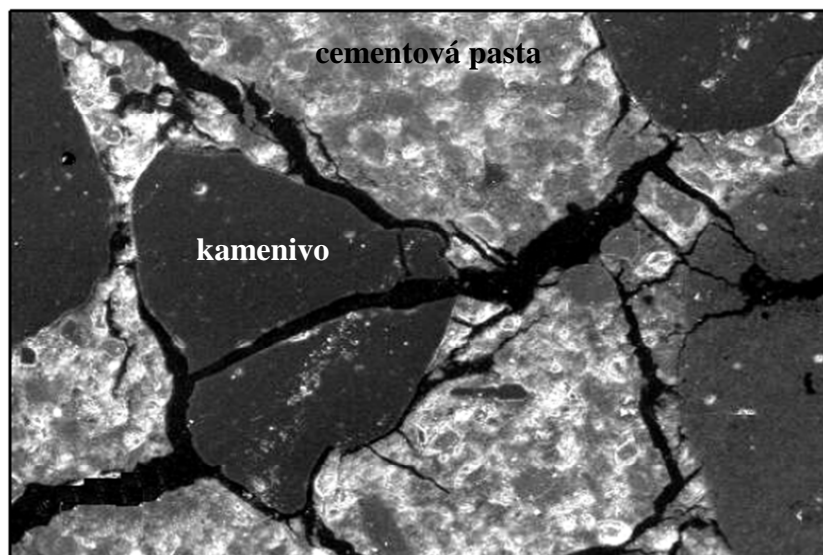


Obr. č. 35: Termická analýza kameniv získaná při nárůstu teploty 10 °C/min v atmosféře dusíku [31]

2.9.3 Spolupůsobení cementového tmele a kameniva v průběhu zahřívání

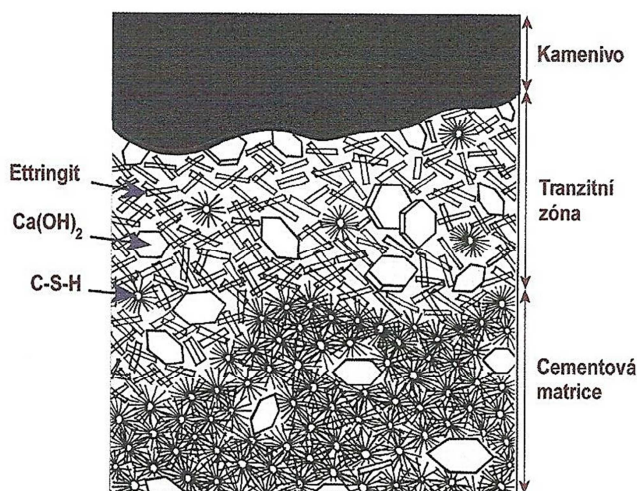
Zahříváním betonu se objem kameniva zvětšuje a zároveň dochází ke smršťování cementového tmele, který ho obklopuje. Vzhledem k vysokému podílu kameniva v betonu, které je důležité pro stabilitu a pevnost, je do značné míry destrukce vysokými teplotami způsobena praskáním, ke kterému dochází v důsledku rozdílu tepelného přetvoření mezi

smršťujícím se cementovým tmelem a expandujícím kamenivem. Na Obr. č. 36 můžeme zpozorovat příklad destrukce vysokohodnotného betonu (HPC) zahřátého na 600 °C. Zároveň jsou zobrazeny praskliny skrz cementový tmel, křemičitá zrna a praskliny okolo kameniva v tranzitní zóně.



Obr. č. 36: Struktura betonu zahřátá na 600 °C, beton složený z křemičito – vápenného kameniva, pevnost v tlaku 75 MPa [32]

Tranzitní zóna mezi cementovou maticí a povrchem kameniva bývá v betonu nejslabším článkem. Na povrchu kameniva bývá navázáno určité množství vody, což vede ke zvýšení pórovitosti cementové matrice v tranzitní zóně v porovnání s ostatní cementovou maticí. Důvod, proč tomu tak je, je ten, že pod částicemi kameniva zůstává uzavřená, několik milimetrů tenká vrstvička vody. Důsledkem toho je lokálně se vyskytující vodní součinitel, způsobující, že tranzitní zóna v těchto vlhkých oblastech je poréznější a krystalické produkty, které se tvoří nejdříve, jako portlandit nebo vláknitý ettringit, mohou lépe růst díky dostatečnému prostoru. [4]

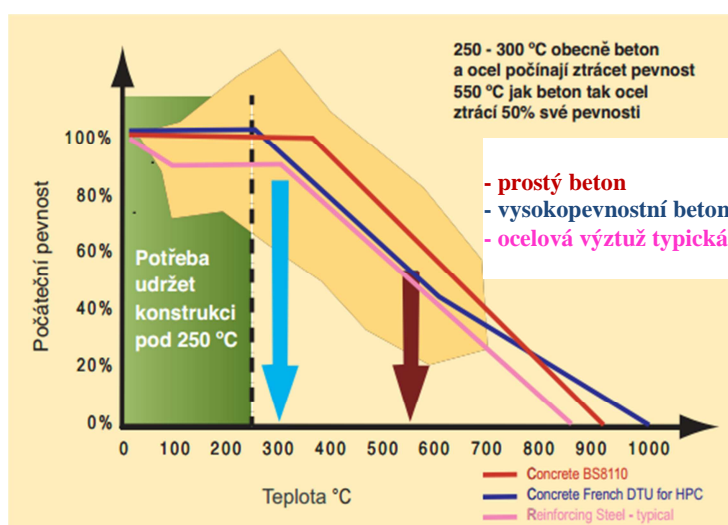


Obr. č. 37: Schematické znázornění tranzitní zóny [4]

2.9.4 Vliv vysokých teplot na ocelovou výztuž

Důležitým faktorem ovlivňující požární odolnost železobetonových konstrukcí je schopnost betonu ochránit výztuž v konstrukci. Požární odolnost závisí především na tloušťce krycí vrstvy, která je nezbytná pro udržení výztuže pod teploty 500 °C. Při této teplotě je hodnota meze kluzu válcované výztuže pouze kolem 50 % z hodnoty při běžné teplotě [12]. Ocelová výztuž je vystavená riziku kolapsu při působení vysokých teplot více než beton samotný. Důležitým faktorem je zde krycí vrstva betonu, kde vznik jakýchkoliv trhlin může ohrozit chování vyztužené betonové konstrukce – v případě požáru může uzavřená vodní pára skrz tuto poruchu snadno proniknout a tím dojde k ohřevu oceli. Jakmile pevnost spojení mezi ocelí a betonem již nemůže odolávat tahovému namáhání, které je vytvořené teplotním gradientem mezi betonem a ocelí, dochází k odtržení mezi ocelovými výztužnými pruty a částmi betonového povrchu.

Především odhalená ocelová výztuž má při požáru zásadní význam, neboť zahřátím ocelové výztuže na vysokou teplotu dochází k její postupné degradaci a ztrátě základních mechanických vlastností a pevnosti. Ocel má definováno několik oblastí teplot, které zásadně ovlivňují její pevnostní charakteristiky. Do hodnoty 400 °C je definována oblast beze změn pevnosti a charakteristiky oceli. V rozmezí teplot 450 °C – 650 °C se začínají projevovat prvotní změny oceli, a to především zvyšující se duktilita a tažnost. Od teploty 750 °C dochází k rekrystalizaci a významné redukci pevnosti oceli a od teploty 900 °C dochází k měknutí výztuže.



Obr. č. 38: Vliv teploty na beton a ocelovou výztuž (ITA 2004 a Khoury 2005) [40]

Zvláštní význam má u předpjatého betonu maximální teplota žáru na úrovni výdrže předpínací výztuže, kde po dosažení teploty dochází k indukované degradaci ve spojení mezi betonem a výztuží. Dále dochází k uvolnění výztuže v konstrukci a v rovině zatížení desky kvůli kombinaci účinků tepelné roztažnosti. Je dobře známo, že mechanické vlastnosti oceli při vyšších teplotách degradují, a to až do teploty, která má zásadní význam při hodnocení požárem poškozených betonových konstrukcí. Pevnost v ohybu betonové stropní desky je závislá na nadimenzovaném konstrukčním materiálu, což je především beton a předpínací

výztuž. Předpínací ocel vystavená zvýšené teplotě stejně jako beton začíná ztrácet pevnost. Bylo prokázáno, že ocel ztrácí pevnosti v tahu při teplotách v rozmezí 400 °C až 500 °C o 15 % až 40 %.

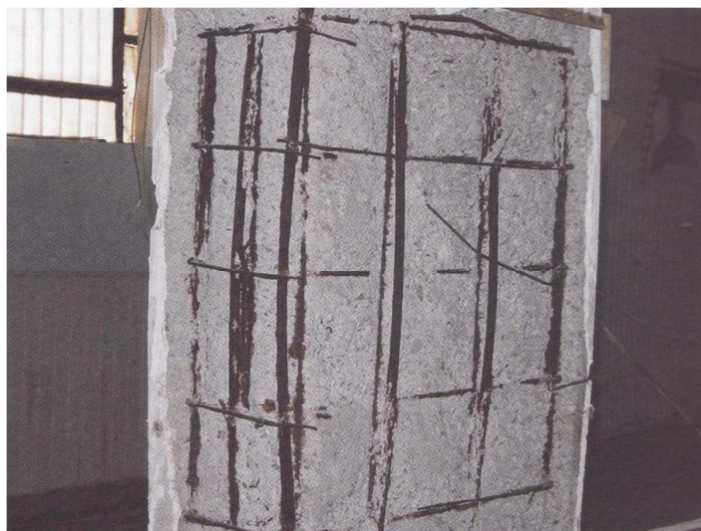
Abrams a Cruz [23] provedli sérii testů, aby byly lépe pochopeny dopady zvýšené teploty na zastudena předpínaných ocelových prutech. Pevnostní testy byly provedeny na prutech o průměru 9,53 mm ve svazku po sedmi drátech. Vzorky byly zahřívány při 10 °C/min na požadovanou teplotu s výdrží na této teplotě po dobu 30 minut. Toto rozmezí se pohybovalo mezi 450 °C a 750 °C, a pozorovaly se účinky pomalého vnějšího chlazení versus chlazení proudem vody. Bylo prokázáno, způsob chlazení neovlivnil reziduální pevnost v tahu po vystavení žáru až do 750 °C.

Neves [24] ve svých experimentech získal hodnoty zbytkové pevnosti v tahu po vystavení vysokým teplotám pro výztuž o průměru 5,5 mm, která je složena ze sedmi drátů. Vzorky výztuže byly ohřívány v elektrické peci při nárůstu 10 °C/min s izotermickou výdrží 60 minut. Následně byly vzorky chlazeny vzduchem nebo proudem vody, aby tak došlo k simulování hašení jako při skutečném požáru. Do teploty 700 °C neměl způsob chlazení vliv na zbytkovou pevnost v tahu, protože nebylo dosaženo teploty, při níž by došlo k mikrostrukturálním změnám. Při vyšších teplotách však začalo docházet k rekrytalizaci oceli a tím pádem ke zvýšené možnosti jejího prasknutí nehledě na způsob chlazení.

2.9.5 Vliv krytí výztuže betonem na odolnost proti požáru

Během požáru je jedním z úkolů betonu chránit ocelovou výztuž v konstrukci tak dlouho, jak jen je to možné. V tomto ohledu jsou zcela zásadní vlastnosti krycí vrstvy betonu, jenž by měla udržet teplotu výztuže pod hodnotou přibližně 450 °C. Je nutné dodržet nejen optimální tloušťku krycí vrstvy betonu, ale i dobrou kvalitu povrchu bez defektů (trhliny, šterková hnízda, kaverny). I přítomnost malých defektů v povrchových vrstvách betonu konstrukce, např. v podobě drobných trhlin, může v případě požáru negativně ohrozit chování železobetonové konstrukce. Při vysokých teplotách mají horké plyny možnost snadno pronikat těmito defekty v krycí vrstvě až k výztuži a tím ji zahřívát. V důsledku vysoké tepelné vodivosti oceli (125 až 195 kJ/m²h °C) v teplotním intervalu 0 – 600 °C se tepelný tok rychle roznáší do prutů výztuže. Díky náhlému zvýšení teploty dochází k jejich rozpínání a následkem jsou odlupující se povrchové vrstvy betonu. Beton se totiž zahřívá mnohem pomalejší rychlostí, protože má daleko nižší tepelnou vodivost (6 až 8 kJ/m²h °C) než ocel. Jakmile soudržnost mezi ocelí a betonem již nemůže dále odolávat rostoucímu tahovému napětí, které je generováno výrazným teplotním rozdílem mezi výztuží a betonem, dojde k porušení této soudržnosti a následkem je oddělení krycí vrstvy betonu od výztuže.

Obecně lze pro zcela kompaktní a homogenní beton říci, že během požáru může být teplota o hodnotě 500 °C působící na výztužnou ocel dosažena po 50 – 70 minutách při tloušťce krycí vrstvy 20 mm, po 80 – 110 minutách s krycí vrstvou 30 mm, po 120 – 160 minutách při krycí vrstvě 40 mm a 180 – 240 minut při krycí vrstvě 50 mm. Zvýšení doby prohřátí krycí vrstvy betonu může být docíleno použitím lehkého betonu, jelikož se tyto betony vyznačují nižší tepelnou vodivostí. [4]



Obr. č. 39: Vyztužená betonová konstrukce po požáru [4]

V důsledku vysoké hodnoty tepelné vodivosti oceli může teplota v dlouhých prutech výztuže velmi snadno dosáhnout kritické teploty 500 °C s následkem rizika kolapsu. Toto riziko lze výrazně redukovat jednoduchým zásahem do návrhu konstrukce a to zvýšením tloušťky krycí vrstvy betonu. Při adekvátní tloušťce krycí vrstvy je mnohem nižší riziko, že lokální defekty (trhlinky) budou dosahovat až k výztužným prutům a nedojde tak k rychlejšímu ohřevu výztužné oceli.

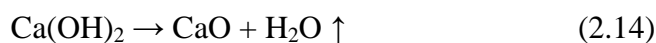
2.10 Doporučený výběr jednotlivých složek cementového kompozitu

2.10.1 Pojivo

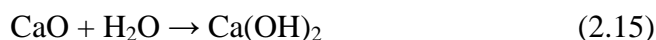
Jako nejméně vhodné pojivo do betonů, vzhledem k odolnosti vůči vysokým teplotám, je hodnocen čistý portlandský cement. U portlandských cementů dochází v průběhu zahřívání ztrátou vody k jejich smrštění, které značně roste do teploty 500 °C. Toto smrštění je trvalého charakteru a hodnota objemového smrštění dosahuje až 0,5 %.

Pokud máme ovlivnit odolnost betonu vůči vysokým teplotám pojivovou složkou, je nutné použít směsných cementů s co možná nejnižším obsahem portlandského slínku, tedy s příměsí popílku, strusky, mikromletého vápence. Smyslem je dosáhnout ve ztvrdlém betonu co nejnižšího množství portlanditu – Ca(OH)_2 , který vzniká v průběhu hydratace cementu.

Portlandit se při teplotách přibližně 500 °C rozkládá dle následující rovnice:



Během hašení v případě požáru je na povrch konstrukce stříkáno množství vody, díky níž probíhá rozpínávací reakce (hašení vápna), které porušuje beton:



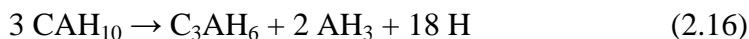
Důsledkem je zvýšení objemu cementového tmelu, což způsobuje rozrušení cementové matrice. Na základě těchto informací budou mít betony s pucolánovými látkami nebo se struskou lepší odolnost proti vysokým teplotám, než betony s čistým portlandským cementem, protože v nich vzniká méně portlanditu.

2.10.1.1 Hlinitanový cement

Nejlepší odolnosti mezi pojivy vůči vysokým teplotám dosahují hlinitanové cementy. Použití tohoto pojiva je již v ČR pro konstrukční účely zakázáno z důvodu dobře známé konverze (přeměna metastabilních fází CAH_{10} a C_2AH_8 při teplotách nad 20 °C na stabilní kubickou formu C_3AH_6 a gibbsit) v jejímž důsledku dochází ke snížení molekulárního objemu, zvýšení pórovitosti matrice a výraznému snížení pevnostních parametrů betonu. V extrémních případech pak může dojít ke kolapsu celé konstrukce. Tyto cementy mohou najít uplatnění pouze ve speciálních odvětvích, např. na výrobu žárobetonů a vyzdívek pecí.

Hlinitanový cement je složen z více než 35 % z Al_2O_3 , tvrdnutí způsobuje hydratace převážně vápenatých hlinitanů (kalciumaluminátů). Vstupní surovinou pro výrobu výpalem je směs z bauxitu a vápence. Hlinitanový cement se při normální teplotě vyznačuje rychlým nárůstem počátečních pevností, kdy za 24 hodin dosahuje beton s použitím hlinitanového cementu až 70 % konečné pevnosti. Hlinitanový cement se vyznačuje vyšším nárokem na záměsovou vodu, kterou potřebuje k dokonalé hydrataci, a jako rychle tuhnutí pojivo uvolňuje v krátkém čase od zamíchání větší část ze svého celkového hydratačního tepla. Synergie těchto dvou skutečností zapříčiňuje, že beton z hlinitanového cementu vyžaduje velmi pečlivé dodatečné ošetřování - provlhčování, a to hned od počátku tuhnutí.

Při teplotách nad 25 °C je dostatečné zvlhčování hlinitanového cementu v betonu už velmi obtížné. Vzniká vodní deficit, který má za následek tvorbu málo pevného trikalciumaluminátového hexahydrátu. Na celkovou nestabilitu a nespolehlivost vytvrzeného hlinitanového cementu má vliv i rychle hydratující C_5A_3 s nestabilní strukturou, která se může projevit snižováním pevnosti betonu s časem. Jako nejproblematictější se při používání hlinitanového cementu ukázal fakt, že dekahydrát CAH_{10} vznikající hydratací za normální teploty může, i po delším čase přejít na méně pevný hexahydrát C_3AH_6 , který má zhruba poloviční objem. V důsledku modifikačních přeměn se struktura cementu stává porézní a ztrácí pevnost. [17]



2.10.2 Plnivo

Obecně lze vycházet z doporučení odborných příspěvků [4] [7] a zahrnout do návrhu složení betonu, který má být odolný vůči účinkům vysokých teplot, vápencové kamenivo. V ČR je však vápencové kamenivo jen výjimečně používáno pro přípravu betonů, protože se uplatňuje spíše pro výrobu pojiv, odsiřování v tepelných elektrárnách atd. Přírodní kamenivo nesmí při vyšší teplotě měnit své mechanické vlastnosti a nesmí se vlivem vysoké teploty smršťovat.

Příznivé chování betonů s vápenatým kamenivem ve vysokých teplotách, včetně expozice v ohni, je vysvětlováno vyšším množstvím tepla, které se spotřebuje při endotermickém rozkladu na oxid uhličitý při teplotě asi 800 °C. U betonů s křemičitým kamenivem dochází k podstatnému poklesu pevnosti okolo teploty 570 °C, kde jak je známo dochází k přeměně křemene z modifikace β na modifikaci α , která má daleko nižší hustotu. Tato modifikační přeměna při 573 °C je provázána výrazným zvýšením objemu. V betonu tak tím pádem v průběhu požáru (především mezi teplotami 450 – 650 °C) dochází ke vzniku mnoha trhlin a prasklin, které snižují pevnost v tlaku o více než 80 %. [4]

Příznivě se na průběh chování betonu během tepelného zatěžování odráží použití lehkého kameniva na bázi expandovaného jílu do betonu, které je objemově stabilní až do 1 050 °C a nedochází u něho v průběhu zahřívání k modifikačním přeměnám.

Lehké betony s expandovaným jílem vykazují lepší tepelně izolační schopnosti než betony s běžným kamenivem. Díky těmto tepelným vlastnostem je v betonu ocelová vyztuž lépe chráněna. Toto je klíčovým problémem při posuzování požární odolnosti konstrukce: ocel, spíše než beton, je materiál, který ztrácí všechny své mechanické vlastnosti a kolabuje při nižších teplotách (okolo 450 °C). Jednou z nejdůležitějších vlastností betonu je tedy chránit vyztuž před teplotou vyšší než 450 °C. Z tohoto pohledu se tedy nejlépe chová kamenivo z expandovaného jílu a nejhůře křemičité kamenivo. [4]

Zdá se také, že vliv na soudržnost kameniva s cementovou pastou při teplotních dilatacích může mít jeho tvarový index a textura. Dá se předpokládat, že k menším poruchám v oblasti tranzitní zóny dojde u kameniv s hrubším povrchem a hranatějším tvarem než u hladkých a zaoblených kameniv. [7]

2.10.3 Příměsi

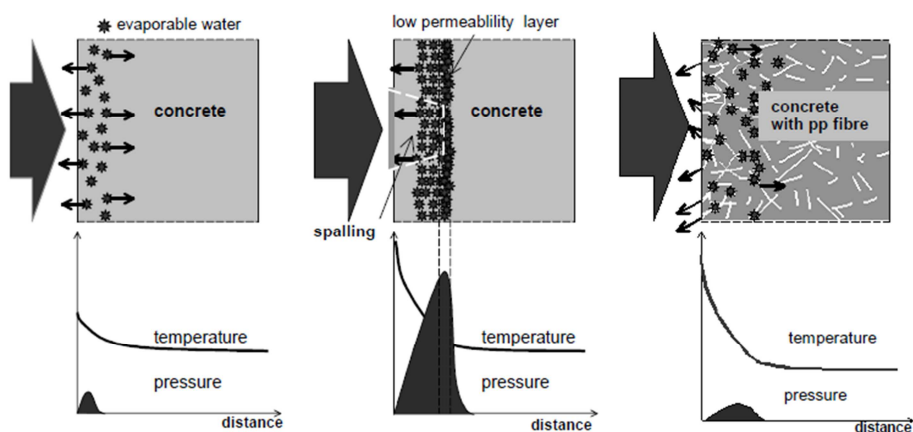
Co se týče otázky používání příměsí jako mikroplniva do teplotně odolných betonů tak obecně platí, že dobré je co nejvíce omezit. Důvodem je zhutnění cementové matrice betonu a „ucpání“ pórové struktury betonu, ke kterému obecně dochází při přimíchání jakýchkoli jemných příměsí do betonové směsi. Jinou otázkou je náhrada části portlandského cementu aktivními příměsemi za účelem snížení množství portlandského slínku, který vykazuje nízkou odolnost vůči vysokým teplotám.

2.10.4 Rozptýlená výztuž

Jednou z možností, jak zvýšit odolnost betonových konstrukcí vůči vysokým teplotám, je použití rozptýlené výztuže. Obecně jsou betony s rozptýlenou výztuží označovány jako kompozitní materiál – vláknobetony. Na rozdíl od klasického návrhu betonu se do konceptu začleňuje vláknová rozptýlená výztuž v podobě různě tenkých a dlouhých vláken. Může se jednat o různé typy rozptýlené výztuže a tvaru, stejně tak jako druh materiálu vláken. Nejčastěji používanými vlákny z hlediska teplotní odolnosti jsou polypropylenová vlákna (PP), která jsou často doplněna o vlákna ocelová, jež napomáhají zpevnit vnitřní strukturu betonu. Pro zvýšení odolnosti betonu vůči vysokým teplotám se dále používají vlákna polyvinylalkoholová, polyethylenová, celulózová a další přírodní vlákna (např. jutová).

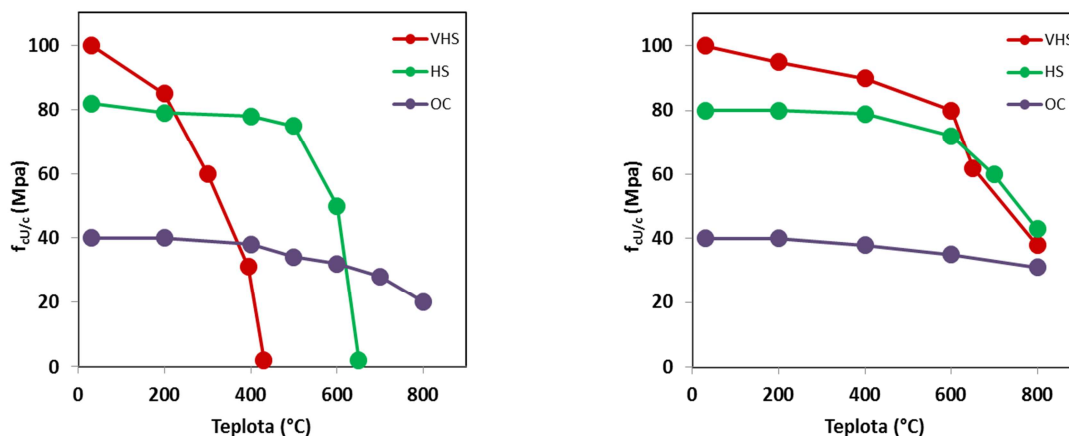
2.10.4.1 Polypropylenová vlákna

Aplikací polypropylenových vláken do betonu lze destruktivní účinky expandované vodní páry zmírnit, především u betonů s hutnější strukturou (HPC, HSC, SCC – viz kapitola 2.8.3) Teplota tání polypropylenu je okolo 160 °C. Při těchto teplotách dojde k vyprcháání polypropylenových vláken z betonu, čímž se v betonu vytvoří malé kapilární dutinky – „tunelové cestičky“. Vznikne otevřená kapilárně pórová struktura betonu, kudy může, při vyšších teplotách, expandovaná vodní pára unikat bez toho, aby nějak výrazně poškodila mikrostrukturu betonu. Tímto opatřením se zamezí vzniku trhlinek ve struktuře betonu a odprýskání povrchových vrstev betonu. Bylo prokázáno, že výhodnější jsou vlákna s větším štíhlostním poměrem, tedy vlákna tenčí a delší. Pórová struktura betonu je tak více propojená a expandovaná pára tak má snadnější možnost úniku bez porušení betonu.



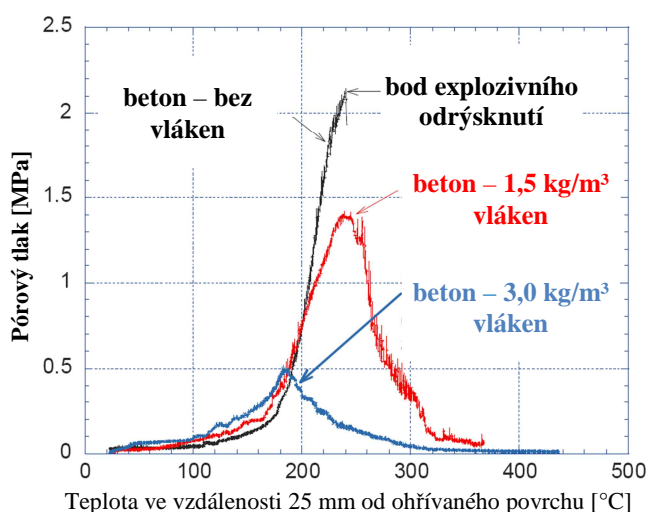
Obr. č. 40: Explosivní odprýskávání v důsledku zvýšení vnitřního tlaku v ohřívaném prvku. Polypropylenová vlákna jako účinná metoda, která umožňuje snížení tlaku páry [32]

Účinek polypropylenových vláken je ukázán na Obr. č. 41. Je na něm zachyceno chování betonů s různou pevností v tlaku (40 MPa, 80 MPa, 100 MPa) s polypropylenovými vlákny v množství 10 kg/m³. V případě betonu s pevností 40 MPa nedochází k žádnému markantnímu zlepšení. Ovšem oba betony s pevností 80 MPa a 100 MPa nevykázaly významné snížení pevnosti až do teploty 600 °C, což je zcela zásadní vylepšení vlastností vzhledem k betonům bez vláken.



Obr. č. 41: Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu běžný beton (OC, pevnost v tlaku 40 MPa), vysokopevnostní beton (HS, pevnost v tlaku 80 MPa), vysokopevnostní beton s pevností 100 MPa (VHS), vlevo nevyztužený – vpravo s polypropylenovými vlákny [4] – překresleno

Experimenty [18] zabývající se měřením pórového tlaku dokazují lepší propustnost betonu pro vodní páru s polypropylenovými vlákny. Hodnota pórového tlaku byla měřena na betonových vzorcích (portlandský cement, vápencové kamenivo, těžný písek, mikrosilika) ve vzdálenosti 25, 50 a 75 mm od zahřívání povrchu. Měření pórového tlaku probíhalo pomocí speciálních talířovitých měřidel, které byly zabetonované přímo ve vzorku. Exponované vzorky byly zaizolovány ze všech stran, vyjma ohřívání povrchu, aby bylo zajištěno zatěžování a možnost úniku páry pouze v jednom směru. Měření ukázala, že právě ve vzdálenosti 25 mm byly hodnoty pórového tlaku nejvyšší. Aplikací polypropylenových vláken dochází ke snížení pórového tlaku a k zabránění explozivního odprýskávání. Vzorky s polypropylenovými vlákny v dávce 1,5 a 3,0 kg/m³ byly porovnávány se vzorky bez vláken. Bod explozivního odprýsknutí byl zjištěn při hodnotě 2,10 MPa pórového tlaku. U vzorků s 1,5 kg/m³ polypropylenových vláken byl naměřen pórový tlak 1,42 MPa, což představuje pokles přibližně o 25 %. Pro vzorky s 3,0 kg/m³ polypropylenových vláken byla hodnota pórového tlaku 0,66 MPa, což je pokles o cca 75 %, viz Obr. č. 42.

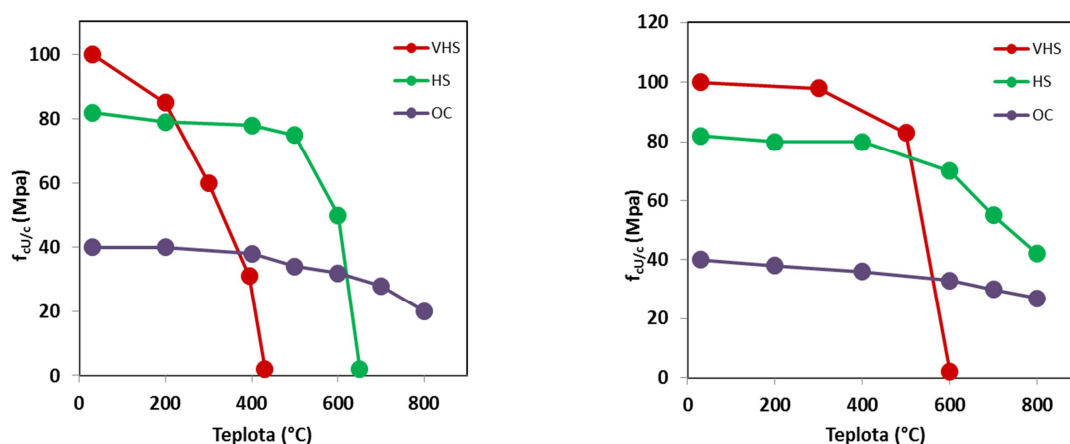


Obr. č. 42: Efekt dávky PP vláken na pórový tlak [18]

2.10.4.2 Ocelová vlákna

Přídavek ocelových vláken do betonu zlepšuje pevnost v tahu a duktilitu betonu, proto je možné se domnívat, že mohou také snížit efekt explozivního odprýskávání. Aplikací speciálních žáruvzdorných ocelových vláken lze omezit odprýskávání betonových vrstev (především vysokohodnotných betonů), ovšem ne v takové míře jako při použití polypropylenových vláken. Ocelová vlákna v průběhu zahřívání fungují na jiném principu než polypropylenová (vyhoření – uvolnění páry). Pokud tlak vodních par v betonu dosáhne takové meze, že překročí pevnost v tahu betonu, dojde k odtržení betonových vrstev. Aplikací ocelových vláken je pevnost v tahu a duktilita betonu zvýšena, čímž dojde tak k omezení nebo i zabránění explozivního odprýskávání tak, že ocelová vlákna rozprostřená v betonu částečně nebo zcela přenesou tahové síly vyvolané tlakem vodních par v betonu.

Na Obr. č. 43 je ukázán úbytek pevnosti tří betonů s odlišnou pevností v tlaku (40 MPa, 80 MPa, 100 MPa), které byly vyztuženy ocelovými vlákny v dávce 40 kg. Při porovnání s vývinem pevností v průběhu zahřívání betonů o pevnosti 40 MPa bez vyztužení a s vlákny nebyla zjištěna významná změna pevností. Drátkobeton s pevností 80 MPa ukazuje zlepšení teplotní odolnosti, protože k výraznému poklesu pevností docházelo kolem 600 °C, oproti betonům bez vláken (výrazný pokles pevností při 450 °C). Drátkobeton s pevností 100 MPa vykazuje také zlepšení teplotní odolnosti. Kolaps betonu nastal v betonu bez vláken téměř bezprostředně po začátku zahřívání, zatímco u drátkobetonu začíná okolo 500 °C. [4]



Obr. č. 43: Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu běžný beton (OC, pevnost v tlaku 40 MPa), vysokopevnostní beton (HS, pevnost v tlaku 80 MPa), vysokopevnostní beton s pevností 100 MPa (VHS), vlevo nevyztužený – vpravo s ocelovými vlákny [4] – překresleno

3. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

První část disertační práce je zpracována v kapitolách 2.1 až 2.10 a shrnuje rešeršní údaje problematiky betonové a železobetonové konstrukce při zatížení vysokými teplotami a požárem. Úvodem byly nastíněny důvody nutnosti řešení dané problematiky včetně statistických dat požárů ve světě a v Evropě. Po vysvětlení základních pojmů a názvosloví byly zpracovány relevantní údaje z normových podkladů ohledně návrhu stavebních konstrukcí a zkoušení stavebních materiálů vystavených vysokým teplotám, příp. přímému ohni se zaměřením na betonové a železobetonové konstrukce. Následně jsou ukázány jednotlivé teplotní křivky požární odolnosti i s rovnicemi pro jejich návrh a jsou nastíněny metody diagnostiky a sanace železobetonových konstrukcí po požáru. V hlavní části rešerší týkající se působení vysokých teplot na beton byly zpracovány následující body:

- Vliv vysokých teplot a ohně na běžné cementové betony a speciální betony (změny betonové struktury a mikrostruktury, fyzikálně – mechanických vlastností)
- Explosivní odprýskávání (mechanismus explozivního odprýskávání)
- Vliv vysokých teplot na jednotlivé složky betonu (cementová pasta, kamenivo – změny mikrostruktury a fyzikálně – chemické změny)
- Vliv vysokých teplot na ocelovou výztuž (změny fyzikálně – mechanických vlastností)
- Doporučený výběr jednotlivých složek betonu (pojivo, plnivo, příměsi, rozptýlená výztuž)

Cílem experimentálních prací byl vývoj kompozitního materiálu s cementovou maticí se zajištěním co možná největší odolnosti vůči působení vysokých teplot, resp. přímému ohni. Vlastní experimentální práce byly rozděleny do čtyř etap řešení. Součástí vývoje kompozitního materiálu byl výběr vhodného plniva (etapa I), což bylo ověřeno testováním pomocí běžných zkoušek kameniva. Na toto testování byla sestavena operativní metodika testování odolnosti kameniva vůči působení vysokých teplot. V etapě II byl proveden výběr vhodné rozptýlené výztuže pro návrh tepelně odolného betonu. V navazujících etapách III a IV byly s využitím získaných poznatků z předešlých etap vyrobeny vzorky cementových betonů, které byly teplotně zatěžovány. Při návrhu jednotlivých směsí se také vycházelo z rešeršních poznatků, jež byly zpracovány v první části disertační práce. Na vyrobených vzorcích jednotlivých směsí referenčních a teplotně zatížených (referenční – srovnávací, bez zatížení vysokými teplotami; teplotně zatížené – různé teplotní křivky, různé intenzity zatížení) byly sledovány vybrané vlastnosti (fyzikálně – mechanické, změny makroskopie, změny mikrostruktury).

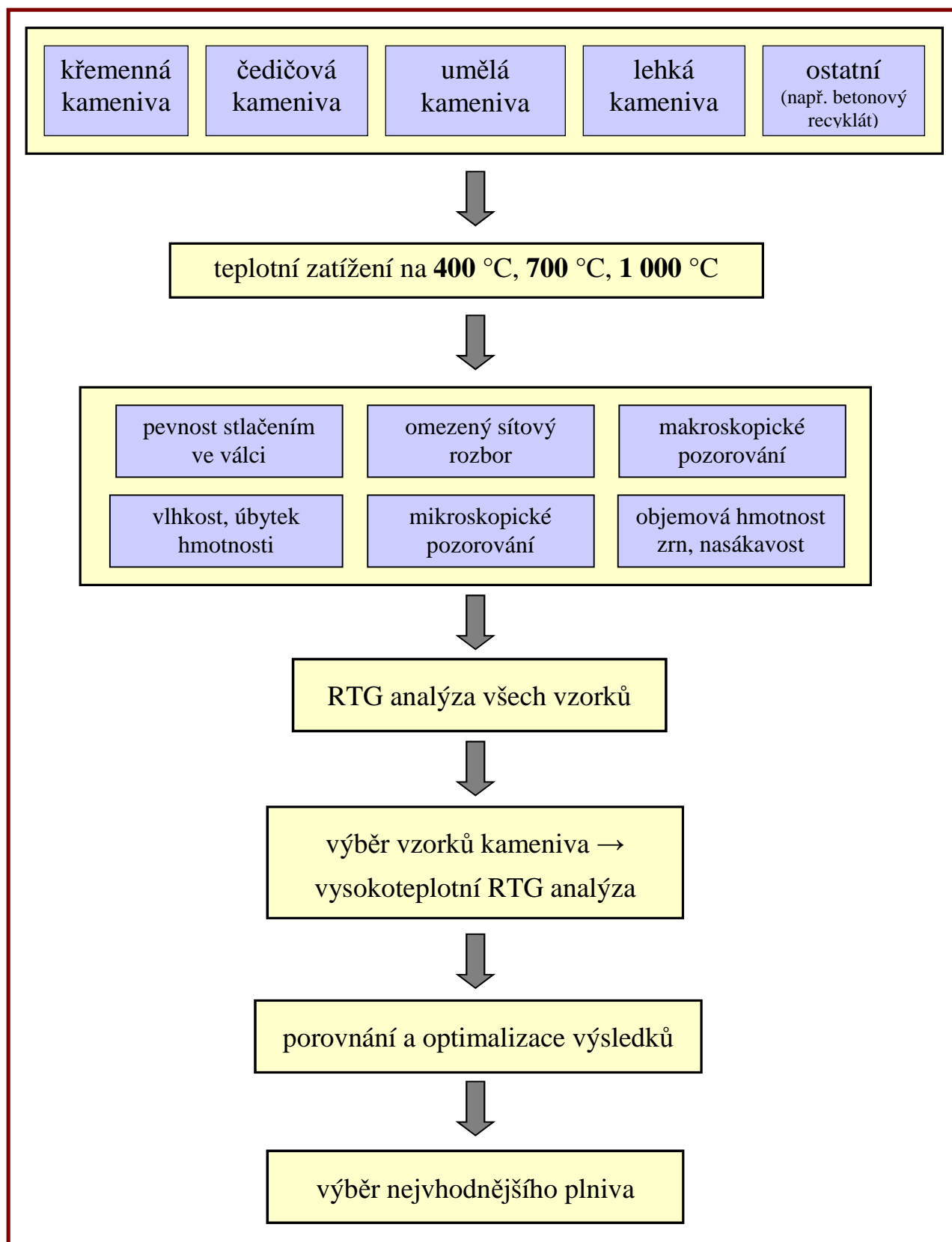
4. METODICKÉ POSTUPY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

4.1 Etapa I – Výběr vhodného kameniva, sestavení testování odolnosti

Pro výběr vhodného hrubého plniva do tepelně odolných kompozitních materiálů byla navržena operativní metodika jeho testování tepelné odolnosti. Soubor několika vzorků dostupných druhů kameniv byl podroben teplotnímu zatížení na různé teplotní stupně a následnému testování, s cílem vyhodnotit kamenivo nejlépe odolné vůči vysokým teplotám. Teplotní zatížení jednotlivých vzorků kameniv bylo provedeno v laboratorní peci, když vzorek kameniva byl uložen vždy ve stejné žáruvzdorné nádobě. Zatěžovací režimy byly zvoleny na hodnoty 400 °C, 700 °C a 1 000 °C s izotermickou výdrží 60 min a nárůstem teplot 10 °C/min. Vybrané teplotní režimy jsou voleny s ohledem na očekávané mineralogické přeměny v mikrostruktuře kameniv. Po samovolném ochlazení na běžnou laboratorní teplotu ± 20 °C byly vzorky kameniv podrobeny souboru zkoušek a dosažené výsledky byly vzájemně porovnávány s cílem vyhodnotit nejvhodnější kamenivo do tepelně odolné směsi. Srovnávací – referenční vzorek kameniva byl vždy vysušen v laboratorní sušárně při teplotě 100 ± 5 °C. Na základě komparace výsledků jednotlivých zkoušek byla provedena korekce sestavené metodiky pro testování odolnosti kameniva vůči vysokým teplotám.

Po zahřátí a následném ochlazení byl ze všech vzorků kameniva odebrán reprezentativní vzorek na provedení rentgenové difrakční analýzy. Na základě zjištěných výsledků, byly navíc odebrány vzorky ze třech kameniv, na kterých byla provedena vysokoteplotní rentgenová difrakční analýza v teplotní komoře při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C, 1 000 °C a také při pokojové teplotě před zahříváním a po zahřívání. Měření probíhalo vždy na jednom vzorku, který byl kontinuálně teplotně zatěžován a při daných teplotách byl získán aktuální rentgenogram.

Metodický postup Etapy I – Výběr vhodného kameniva, sestavení odolnosti je zobrazen na následujícím schématu.



4.1.1 Přehled přípravy vzorku kameniva a návaznost jednotlivých zkoušek

Příprava každého vzorku zkoušeného kameniva a jednotlivé zkoušky na sadě kameniva před a po teplotním zatížení byly provedeny vždy stejným způsobem dle níže popsaného postupu, který byl navržen dle vlastního uvážení a zkušeností.

Příprava vzorku kameniva a zkoušky na referenčním vzorku:

- 1) Homogenizace většího objemu kameniva
- 2) Odběr vzorku kameniva objemu – cca 15 litrů
- 3) Odstranění jemných podílů ze vzorku kameniva propírkou na síť 1,0 mm
- 4) Vysušení vzorku kameniva v laboratorní sušárně při teplotě 100 ± 5 °C po dobu 24 hodin
- 5) Uložení vzorku kameniva do plastových barelů pro ustálení vlhkosti a následné teplotní zatěžování
- 6) Mikroskopické pozorování mikrostruktury
- 7) Stanovení pevnosti stlačením ve válci – cca 1,8 litrů
- 8) Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti – cca 0,6 – 0,7 litrů

Před teplotním zatěžováním:

- 1) Odběr sady kameniva objemu z uložení vzorku kameniva – cca 2,5 l
- 2) Provedení omezeného síťového rozboru na celém vzorku kameniva (propady vráceny do sady na teplotní zatížení)
- 3) Makroskopické pozorování (vizuálně, fotodokumentace)
- 4) Zvážení sady kameniva uložené v žáruvzdorné misce

Po teplotním zatěžování a vychladnutí:

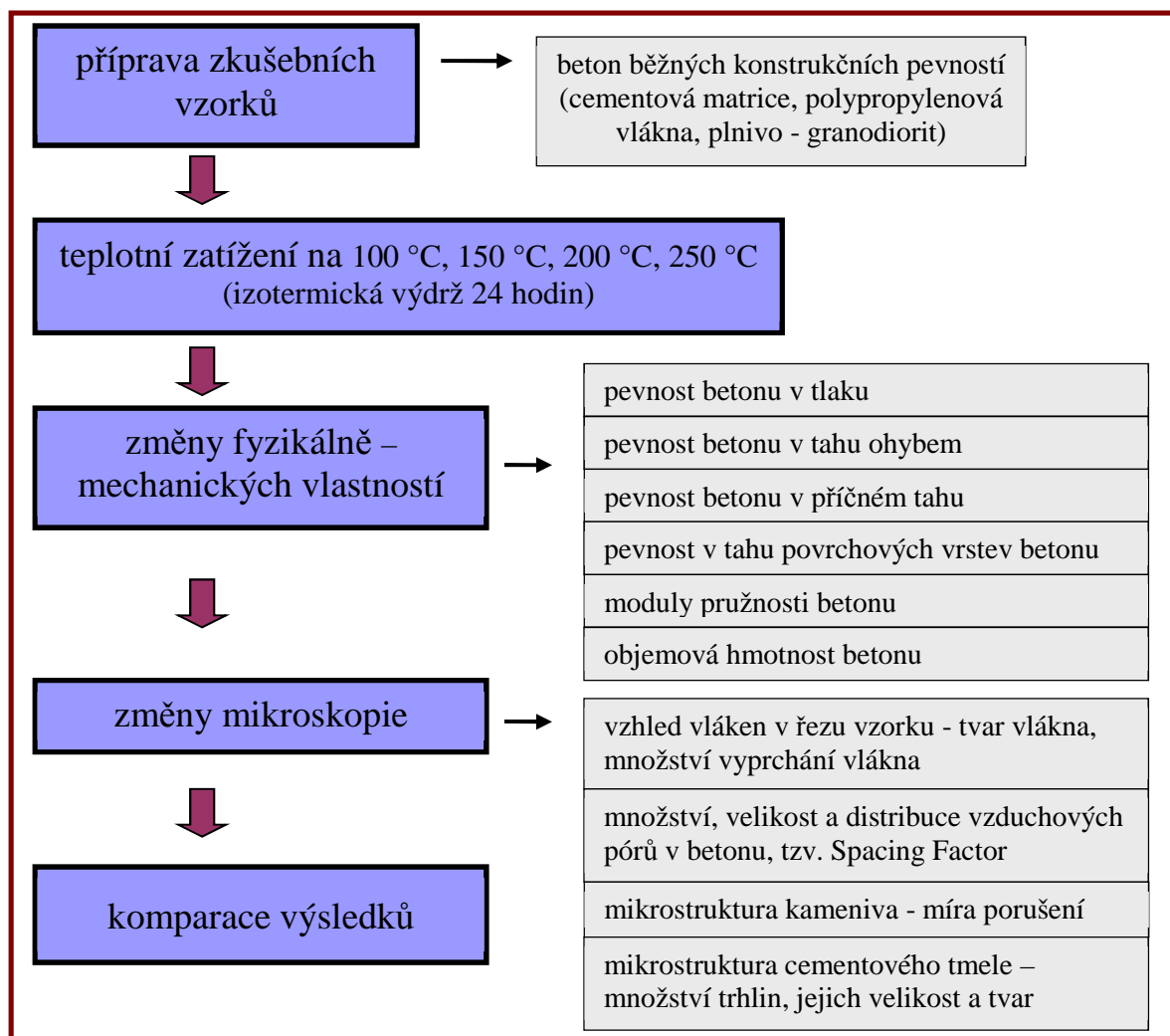
- 1) Zvážení sady kameniva uložené v žáruvzdorné misce
- 2) Makroskopické pozorování (vizuálně, fotodokumentace)
- 3) Mikroskopické pozorování mikrostruktury
- 4) Provedení omezeného síťového rozboru na celém vzorku kameniva (propady sítem 0,25 mm vyhozeny)
- 5) Stanovení pevnosti stlačením ve válci – cca 1,8 litrů
- 6) Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti – cca 0,6 – 0,7 litrů

4.2 Etapa II – Výběr vhodných vláken a ověření jejich účinnosti

4.2.1 Etapa II – část A

Pro výběr vhodných vláken a ověření jejich účinnosti byly vyrobeny zkušební vzorky z cementového betonu s polypropylenovou rozptýlenou výztuží doporučenou pro zvýšení odolnosti betonů vůči explozivnímu odprýskávání. Tyto vzorky po 28 dnech zrání ve vodě byly podrobeny teplotnímu zatížení v laboratorní sušárně ve čtyřech teplotních stupních (100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C) s náběhem na maximální teplotu, který byl dán aktuální výkonností zařízení, izotermickou výdrží 24 hodin a samovolným ochlazením na běžnou laboratorní teplotu ± 20 °C. Po tomto teplotním zatížení byly na vzorcích sledovány změny fyzikálně-mechanických vlastností a mikrostruktury a bylo provedeno srovnání s nezatažovanými vzorky betonu. Cílem části A druhé etapy bylo primárně ověřit chování polypropylenových vláken při zatížení vysokými teplotami. Sekundárně byla ověřena teorie o tzv. „kvazizpevnění“ betonu, ke kterému dochází při zahřátí betonových vzorků na teploty maximálně do 300 °C.

Metodický postup etapy II – Výběr vhodných vláken a ověření jejich účinnosti – část A je znázorněn na následujícím schématu.

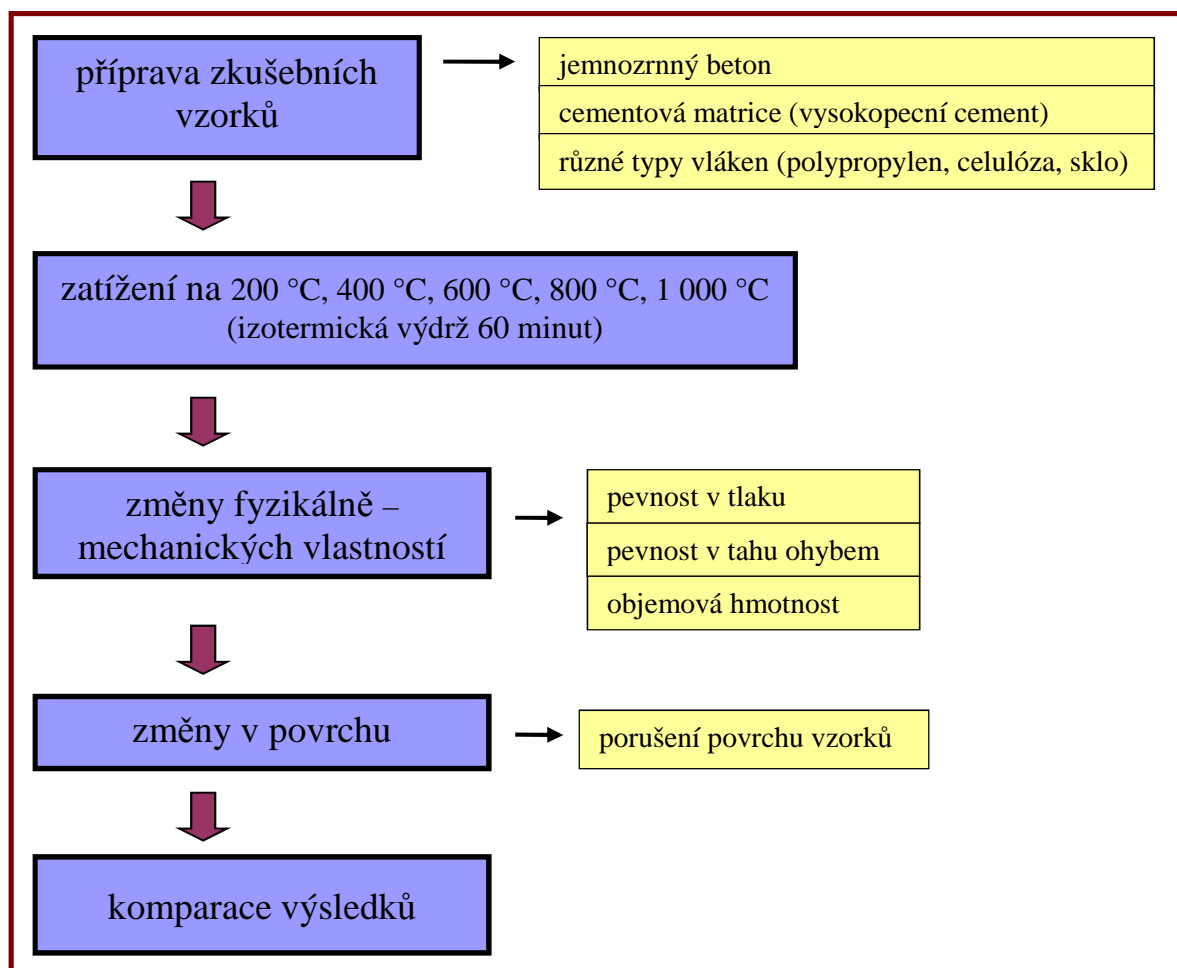


4.2.2 Etapa II – část B

V části B etapy II výběru vhodných vláken a ověření jejich účinnosti byla na základě rešeršních poznatků a doporučení navržena směs s cementovým pojivem a jemnozrnným plnivem. Navržená základní – referenční směs byla modifikovaná přidavkem třech typů rozptýlené vláknové výztuže. Po odformování byly všechny zkušební vzorky uloženy ve vlhkém prostředí. Tyto byly dále podrobeny zjišťování základních fyzikálně – mechanických vlastností (objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku) a to po 7 a 28 dnech od namíchání, před a po teplotním zatěžování na teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C a 1 000 °C. Po zatěžování byla navíc provedena detailní fotodokumentace povrchů se zaměřením na sledování vzniklých trhlin a velikosti jejich rozevření.

Teplotní zatěžování bylo provedeno v laboratorní peci, u které lze nastavit řízený průběh ohřívání i ochlazování. Vzorky se ohřívaly s teplotním gradientem 10 °C/min až na požadovanou teplotu s následnou izotermickou výdrží 60 min na požadované teplotě. Poté byly vzorky řízeně ochlazovány o teplotní gradient 20 °C/min až do dosažení běžné laboratorní teploty ± 20 °C.

Metodický postup etapy II – Výběr vhodných vláken a ověření jejich účinnosti - část B je znázorněn na následujícím schématu.



4.3 Etapa III – Vývoj betonu s cementovou maticí s vyšší odolností vůči vysokým teplotám

Vývoj betonu s cementovou maticí s vyšší odolností vůči vysokým teplotám byl rozdělen do třech dílčích částí (část A, část B, část C), během nichž byly vyrobeny série vzorků cementových kompozitních materiálů o různém složení pro testování teplotní odolnosti. U jednotlivých směsí byly měněny typy rozptýlené výztuže, vlhkosti zkušebních vzorků, složení cementové matrice (různé druhy cementu) s důrazem na ovlivnění její hutnosti a pórovitosti (množství cementu, použití provzdušňovací přísady) a typ kameniva včetně lehkých kameniv. Vyrobené zkušební vzorky byly teplotně zatěžovány na různé intenzity s izotermickými výdržemi za postupného nárůstu na danou teplotu a také podle předem daných teplotních křivek. Teplotní zatěžování bylo provedeno pomocí laboratorní pece, u které lze nastavit řízený průběh ohřívání i ochlazování. Na zatížených vzorcích cementových kompozitních materiálů byly provedeny zkoušky se zaměřením na fyzikálně – mechanické vlastnosti a změny v povrchu betonových vzorků.

4.3.1 Etapa III – část A

V rámci této části etapy byly teplotně zatěžovány série zkušebních vzorků, které se lišily v použitém kamenivu (čedičové kamenivo, lehké kamenivo Liapor) v kombinaci se čtyřmi druhy cementu. Zkušební vzorky ve tvaru trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byly zatěžovány na teploty 200 °C, 400 °C, 660 °C a 800 °C s nárůstem 10 °C/min a teplotní výdrží po dobu 30 minut. Na zkušebních vzorcích byla provedena diagnostika před a po teplotním zatížení, kdy byly provedeny následující zkoušky: objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku, zjištění procentuálního porušení povrchu, měření rychlosti šíření vln pomocí ultrazvuku.

4.3.2 Etapa III – část B

V rámci této části etapy byly teplotně zatěžovány série zkušebních vzorků, které se lišily v použité rozptýlené výztuži (polypropylenová, nízkouhlíková ocelová) a ve způsobu uložení vzorků (vlhko, voda). Polovina vzorků byla uložena do vlhkého prostředí (vlhkost vyšší než 80 %, teplota ± 20 °C) a druhá polovina do vodního uložení na dobu 28 dní. Zkušební vzorky ve tvaru trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byly zatěžovány na teploty 400 °C a 660 °C s nárůstem 10 °C/min a teplotní výdrží po dobu 60 minut. Poté byly vzorky vytaženy z pece a ponechány v běžném laboratorním prostředí až do vychladnutí. Na zkušebních vzorcích byla provedena diagnostika před a po teplotním zatížení, kdy byly provedeny následující zkoušky: objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku, měření rychlosti šíření vln pomocí ultrazvuku, nasákavost.

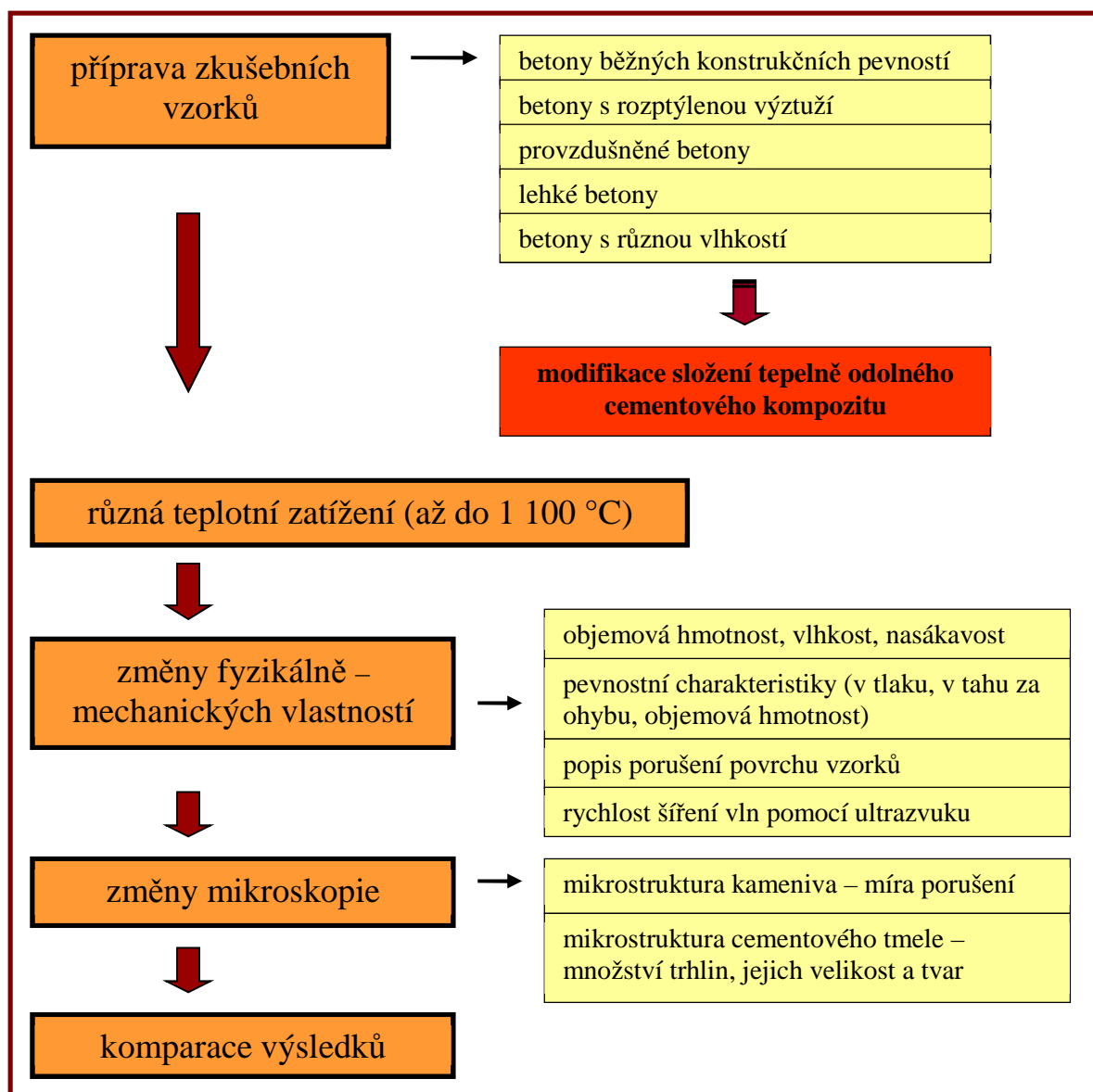
4.3.3 Etapa III – část C

V rámci této části etapy byly teplotně zatěžovány zkušební vzorky tvaru krychle o rozměrech 100 × 100 × 100 mm ze čtyř odlišných receptur, kdy cílem bylo především ověřit chování betonových vzorků při strmém teplotním gradientu. Vzorky byly teplotně zatěžovány v laboratorní peci dle normové teplotní křivky (ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky), kde křivka teplotního zatěžování je dána určitými teplotami v určitém čase v průběhu 360 min. První série vzorků byla zatížena na maximální teplotu 945 °C, druhá série vzorků byla zatížena na maximální teplotu 1 110 °C. Po ohřátí byly vzorky samovolně ochlazeny na běžnou laboratorní teplotu ± 20 °C. Poté byla provedena vizuální prohlídka vzorků a byly zjištěny objemová hmotnost a pevnost v tlaku, které byly porovnány s hodnotami před teplotním zatížením.

Tab. č. 11: Definice normové teplotní křivky podle ČSN EN 1363-1

čas [min]	teplota v peci [°C]
0	20
5	576
10	678
15	738
20	781
30	842
45	902
60	945
90	1 006
120	1 049
150	1 082
180	1 110
210	1 133
240	1 153
300	1 186
360	1 214

Metodický postup Etapy III – Vývoj betonu s cementovou maticí s odolností vůči vysokým teplotám je souhrnně (bez rozdělení na etapy) ukázán na následujícím schématu.



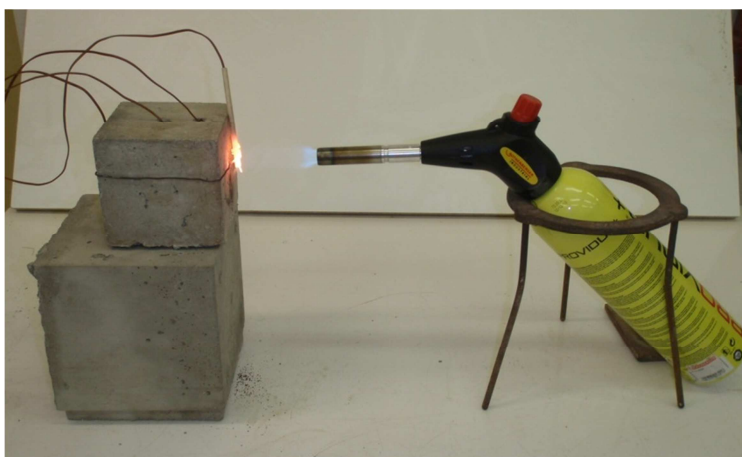
4.4 Etapa IV – Zatížení přímým plamenem

V poslední etapě byly vzorky různých receptur zatíženy přímým plamenem. Byly vybrány různé receptury směsí, které se lišily druhem kameniva, pojivem a různou rozptýlenou výztuží. Od každé receptury byly přímým plamenem zatěžovány vždy dvě skupiny vzorků, které se lišily různou vlhkostí, která byla dosažena uložením ve vlhkém prostředí a ve vodě. Vzorky uložené ve vodě byly vždy před zatěžováním vytaženy z vody a ponechány po dobu 24 hodin v běžném laboratorním prostředí pro ustálení vlhkosti. Další vzorky zatěžovaných receptur byly vždy paralelně se zatížením přímým plamenem vloženy do sušárny pro stanovení aktuální vlhkosti vzorků.

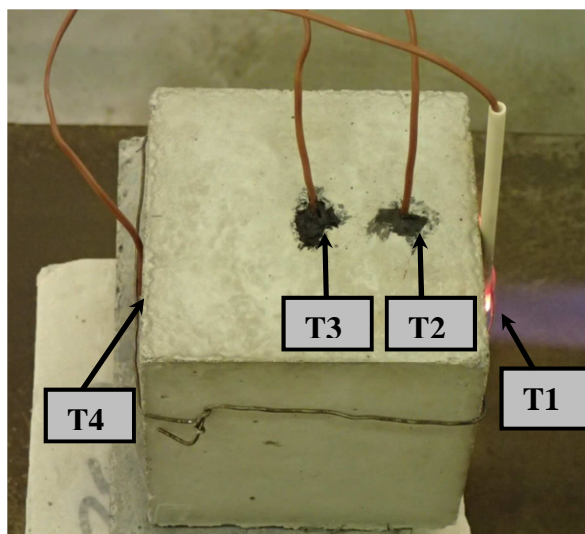
Zatěžování přímým plamenem probíhalo pomocí plynového hořáku, který dokáže vyvinout teplotu plamene až 1 300 °C. Průběh působících teplot plamene se reguloval tak, aby se výsledná křivka co nejvíce přiblížila uhlovodíkové křivce (viz Obr. č. 7), avšak pouze po

dobu 60 minut. Zatěžovací teplota a průběh teplot ve vzorku byly snímány pomocí čtyř termočlánků, které byly umístěné na exponovaném povrchu, ve vzorku v různé hloubce od zahříváného povrchu a na protější povrch k exponovanému. Ukázka zatěžovací soustavy s rozmístěním termočlánků je na následujících obrázcích Obr. č. 44 a Obr. č. 45.

V průběhu zatěžování byly vzorky vizuálně sledovány a zaznamenávaly se probíhající změny. Před zatěžováním a v časových etapách po 10 minutách byl fotograficky zdokumentován exponovaný povrch. Rozložení teplot ve vzorku bylo také v průběhu zatěžování dokumentováno pomocí termografické kamery.



Obr. č. 44: Sestava zatěžování přímým plamenem



Obr. č. 45: Detail umístění jednotlivých termočlánků

- T1** termočlánek uprostřed vzorku – exponovaný povrch
- T2** termočlánek uprostřed vzorku – ve vzdálenosti 25 mm od exponovaného povrchu
- T3** termočlánek uprostřed vzorku – ve vzdálenosti 50 mm od exponovaného povrchu
- T4** termočlánek uprostřed vzorku – protější povrch k exponovanému

Po zatížení a vychladnutí byla provedena diagnostika vzorků skládající se z:

- vizuální sledování vzorku;
- zaznamenání sítě trhlin s fotografickým záznamem;
- změření maximální hloubky odprýsknutého betonu v případě, že nastalo explozivní odprýskávání.

4.5 Přehled prováděných zkoušek

4.5.1 Přehled prováděných zkoušek kameniva

4.5.1.1 Pevnost stlačením ve válci

Zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN 1097-2 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení. [54]

Pevnost stlačením ve válci jednotlivých vzorků kameniva byla zjišťována jednak na vzorcích teplotně nezatížených – referenčních a na vzorcích po zatížení na jednotlivé teplotní stupně. Zkouška pevnosti stlačením ve válci by měla být stěžejní zkouškou pro ověření odolnosti jednotlivých druhů kameniv vůči působení vysokých teplot. Porušení jednotlivých vzorků kameniva vlivem vysoké teploty by se mělo nejvíce projevit právě na jeho pevnosti.

4.5.1.2 Objemová hmotnost zrn, nasákavost

Zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. [55]

Objemová hmotnost zrn a nasákavost jednotlivých vzorků kameniva byly zjišťovány jednak na vzorcích teplotně nezatížených – referenčních a na vzorcích po zatížení na jednotlivé teplotní stupně. V závislosti na teplotním zatížení by mělo dojít ke změně pórovitosti jednotlivých zrn kameniva, příp. k částečnému porušení jednotlivých zrn kameniva. Tyto skutečnosti by se měly projevit jednak ve změně nasákavosti a jednak ve změně objemové hmotnosti jednotlivých vzorků kameniva. Součástí těchto stanovení je zjištění i objemové hmotnosti zrn po vysušení a objemové hmotnosti zrn nasycených.

4.5.1.3 Mikroskopické pozorování

Studium mikrostruktury jednotlivých vzorků kameniv bylo provedeno na optickém mikroskopu značky Nikon, z kterého byl televizní kamerou značky Sony snímán obraz do počítače. Obraz byl zobrazován pomocí softwaru (LIM elements), z něhož byly pořízeny záznamy v digitální formě.

Mikroskopické pozorování jednotlivých vzorků kameniva bylo provedeno jednak na vzorcích teplotně nezatížených – referenčních a na vzorcích po zatížení na jednotlivé teplotní stupně. Pozorováním mikrostruktury zatěžovaných vzorků kameniv a srovnáním s referenčními vzorky by mělo být odhaleno případné porušení jednotlivých zrn kameniva v důsledku teplotního zatížení ve formě mikrotrhlin, odštěpení částí z povrchu zrn kameniva, příp. „puknutí“ zrna kameniva.

4.5.1.4 Makroskopické pozorování

Makroskopické pozorování bylo provedeno vizuálně s fotografickým záznamem.

Makroskopické pozorování jednotlivých vzorků kameniva bylo provedeno jednak na vzorcích teplotně nezatížených – referenčních a na vzorcích po zatížení na jednotlivé teplotní stupně. Vizualním pozorováním by měly být odhaleny markantní poruchy jednotlivých zrn kameniva v podobě trhlin, či celkového rozpadu zrn. Součástí je i fotografický záznam, s pomocí něhož bude vyhodnocena barevná změna jednotlivých druhů kameniv, která by mohla signalizovat modifikační přeměny minerálů jednotlivých druhů kameniv.

4.5.1.5 Úbytek hmotnosti

Každá zkušební sada kameniva byla zvážena těsně před umístěním do laboratorní pece a hned po vyjmutí z laboratorní pece (po ochlazení na běžnou laboratorní teplotu ± 20 °C). Cílem bylo zjistit ztrátu hmotnosti zkušební sady kameniva po daných teplotních stupních, což by mělo mít návaznost na modifikační přeměny minerálů jednotlivých druhů kameniv.

4.5.1.6 Omezený síťový rozbor

Provedení omezeného síťového rozboru bylo inspirováno normou ČSN EN 1367-5 Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – Část 5: Stanovení odolnosti vůči tepelnému šoku [46]. V této normě se navážka kameniva po zatížení tepelným šokem na teplotu 700 ± 50 °C proseje na síť 5,0 mm a zaznamená se hodnota propadu v gramech jako M_2 . Následně se vypočítá propad (I) sítem 5,0 mm následkem vystavení tepelnému šoku podle následujícího vztahu:

$$I = (M_2/M_1) \times 100 \quad (4.1) \quad [46]$$

I procentní podíl propadu následkem tepelného šoku

M_1 počáteční hmotnost zkušební navážky [g]

M_2 hmotnost podsítného propadu sítem 5,0 mm [g]

Každá zkušební sada kameniva byla před teplotním zatížením proseta nejprve přes síto 4,0 mm, kdy byla zaznamenána hodnota propadu jako $M_{4,0}$. Poté byl propad sítem 4,0 mm proset přes síto 0,25 mm a hodnota propadu byla zaznamenána jako $M_{0,25}$. Propady sítem 4,0 mm a 0,25 mm byly vráceny zpět do zkušební sady kameniva a tato byla následně podrobena teplotnímu zatížení. Po teplotním zatížení a ochlazení na běžnou laboratorní teplotu byl omezený síťový rozbor znovu opakován a zaznamenány byly hodnoty propadu sítem 4,0 mm jako $M_{t4,0}$ a hodnoty propadu sítem 0,25 mm jako $M_{t0,25}$.

Provedení omezeného síťového rozboru jednotlivých sad kameniva by mělo identifikovat změny jednotlivých zrn kameniva v podobě odpadávajících částí nebo dokonce rozpad jednotlivých zrn v závislosti na teplotě.

4.5.1.7 RTG difrakční analýza

Mineralogický rozbor byl proveden rentgenovou difrakční analýzou, která umožňuje stanovit přítomnost krystalických fází (minerálů) v hodnoceném vzorku. Tato metoda je založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu.

Výsledky mineralogických rozborů by měly posloužit především k identifikaci mineralogického složení jednotlivých druhů zkoušeného kameniva a to u tepelně nezatěžovaných vzorků. U vzorků kameniva již zatěžovaných na dané teplotní stupně poslouží mineralogický rozbor k objasnění mineralogických přeměn u jednotlivých druhů kameniv po daných stupních teplotního zatížení.

4.5.2 Přehled prováděných zkoušek čerstvých směsí

4.5.2.1 Stanovení konzistence

Stanovení konzistence čerstvých směsí bylo provedeno dle ČSN EN 12 350-2, Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. [79]

4.5.2.2 Objemová hmotnost čerstvého betonu

Objemová hmotnost čerstvého betonu byla stanovena dle ČSN EN 12 350-6, Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. [80]

4.5.2.3 Množství vzduchu v čerstvém betonu

Množství vzduchu v čerstvém betonu bylo stanoveno dle ČSN EN 12 350-7, Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. [81]

4.5.3 Přehled prováděných zkoušek kompozitních materiálů s cementovou maticí

4.5.3.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku betonových vzorků s hrubým plnivem byla stanovena dle ČSN EN 12 390-3, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [56]. Pevnost v tlaku vzorků jemnozrnných betonů byla stanovena dle ČSN EN 196-1, Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [57].

Stanovení pevnosti v tlaku betonových vzorků bylo provedeno na zkušebních vzorcích tvaru krychle o rozměrech $100 \times 100 \times 100$ mm, případně na zlomcích po stanovení pevnosti v tahu ohybem trámčů o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm. Stanovení pevnosti v tlaku vzorků jemnozrnných betonů bylo provedeno na zlomcích zkušebních vzorků tvaru trámečků o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm.

4.5.3.2 Pevnost v tahu ohybem, pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu ohybem betonových vzorků s hrubým plnivem bylo stanoveno dle ČSN EN 12 390-5, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles [58]. Pevnost v tahu za ohybu vzorků jemnozrnných betonů bylo stanoveno dle ČSN EN 196-1, Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [57].

Stanovení pevnosti v tahu ohybem betonových vzorků bylo provedeno na zkušebních vzorcích tvaru trámců o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu vzorků jemnozrnných betonů bylo provedeno na zkušebních vzorcích tvaru trámečků o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm.

4.5.3.3 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost betonových vzorků a jemnozrnných betonů byla stanovena dle ČSN EN 12 390-7, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. [59]

Stanovení objemové hmotnosti betonových vzorků bylo provedeno na zkušebních vzorcích tvaru krychle o rozměrech $100 \times 100 \times 100$ mm, stanovení objemové hmotnosti vzorků jemnozrnných betonů bylo provedeno na zkušebních vzorcích tvaru trámečků o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm.

4.5.3.4 Pevnost betonu v příčném tahu

Pevnost betonu v příčném tahu bylo stanoveno dle ČSN EN 12 390-6, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. [60]

Stanovení pevnosti v příčném tahu bylo provedeno na betonových vzorcích tvaru krychle o rozměrech $100 \times 100 \times 100$ mm, příp. $150 \times 150 \times 150$ mm.

4.5.3.5 Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev

Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev byla stanovena dle ČSN 73 1318, Stanovení pevnosti betonu v tahu. [61]

Stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev bylo provedeno na betonových vzorcích tvaru krychle o rozměrech $100 \times 100 \times 100$ mm, případně na zlomcích po stanovení pevnosti v tahu ohybem trámců o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm.

4.5.3.6 Statický modul pružnosti betonu

Statický modul pružnosti betonu byl stanoven dle ČSN ISO 6784, Beton, Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. [62]

Stanovení statického modulu pružnosti bylo provedeno na betonových vzorcích tvaru trámce o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm.

4.5.3.7 Dynamický modul pružnosti betonu

Dynamický modul pružnosti betonu byl stanoven dle ČSN 73 1371, Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. [63]

Stanovení dynamického modulu pružnosti bylo provedeno na betonových zkušebních vzorcích tvaru trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm a tvaru krychle o rozměrech 100 × 100 × 100 mm.

4.5.3.8 Rychlost šíření vln pomocí ultrazvuku

Rychlost šíření vln pomocí ultrazvuku byla stanovena dle ČSN EN 12504-4, Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. [64]

Rychlost ultrazvukového impulsu se vypočítá ze vzorce:

$$v_L = \frac{l}{t} \quad (4.2) \quad [64]$$

v_L rychlost šíření ultrazvukového impulsu [m/s]

l délka měřicí základny [m]

t čas, za který impuls prošel danou dráhu [s]

Rychlost šíření vln pomocí ultrazvuku betonových vzorků byla stanovena na zkušebních vzorcích tvaru trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm a u jemnozrných betonů na zkušebních vzorcích tvaru trámčků o rozměrech 40 × 40 × 160 mm.

Pomocí této metody by měly být odhaleny vnitřní – skryté poruchy betonu, ke kterým došlo v průběhu teplotního zatěžování, pokud se porovnají hodnoty po různých stupních teplotního zatížení s hodnotami naměřenými na nezatěžovaných vzorcích.

4.5.3.9 Nasákavost, vlhkost betonu

Nasákavost a vlhkost betonu byla stanovena dle již zrušené normy ČSN 73 1316, Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vztlávanosti betonu. [65]

Parametr nasákavosti byl stanoven z úlomků zkušebních betonových vzorků a vzorků jemnozrných betonů po zkoušce pevnosti v tlaku, příp. pevnosti v tahu ohybem. Výsledky nasákavosti by měly potvrdit hypotézu o změně pórového systému cementové matrice v závislosti na vzrůstající teplotě.

Vlhkost byla stanovena přímo na zkušebních vzorcích pro zjištění vstupní vlhkosti zkušebních vzorků před zahájením teplotního zatěžování.

4.5.3.10 Množství, velikost a distribuce vzduchových pórů

Množství, velikost a distribuce vzduchových pórů v betonu, tzv. Spacing Factor bylo stanoveno dle ČSN EN 480-11, Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody, Část 11: Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. [66]

Stanovení množství, velikosti a distribuce vzduchových pórů bylo provedeno na výřezech z betonových vzorků tvaru trámce o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm. Výřezy z betonových vzorků o rozměru $20 \times 100 \times 100$ mm, jejichž povrch byl speciálně vybroušený a vyleštěný, byly následně připraveny pomocí kontrastních barev (červeným inkoustem zbarvený cementový tmel, bílá zinková pasta vtlačena do pórů) pro účely této zkoušky.

4.5.3.11 Rozsah porušení povrchu vzorků

Pro určení rozsahu porušení vzorku byla vytvořena metodika, která byla inspirována metodou podle Xinga a kol. [7].

Vzorky s výskytem poruch, nejčastěji trhlin, musely být nejprve fotograficky zdokumentovány v digitální podobě. Snímky povrchů vzorků o vysokém rozlišení se převedly do softwaru AutoCAD, přiblížily se na maximální rozeznatelnou velikost a poté se trhlinky na povrchu vzorků označily jako jednotlivé plochy. Poté se pomocí AutoCADu spočítaly kumulativní plochy trhlin k celkové ploše kostky, které byly vyjádřeny jako procentuální podíl porušení plochy z celkové plochy vzorku. Pro lepší viditelnost jednotlivých trhlin byly fotografie vzorků ještě ztmaveny.

4.5.3.12 Mikroskopické pozorování

Studium mikrostruktury betonových vzorků a jemnozrných betonů bylo provedeno na optickém mikroskopu značky Nikon, z kterého byl televizní kamerou značky Sony snímán obraz do počítače. Obraz byl zobrazován pomocí softwaru (LIM elements), z něhož byly pořízeny záznamy v digitální formě

Detailnější pozorování změn v mikrostruktuře zkušebních vzorků bylo provedeno ve spolupráci s pracovištěm Ústavu geologických věd Přírodovědecké fakulty Masarykovy university na scanovacím elektronovém mikroskopu JOEL 6490 LV.

Mikroskopické pozorování betonových vzorků na optickém mikroskopu probíhalo přímo na zkušebních vzorcích tvaru krychle o rozměrech $100 \times 100 \times 100$ mm a u vzorků jemnozrných betonů probíhalo přímo na zkušebních vzorcích tvaru trámčků o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm, příp. na výřezech ze zkušebních vzorků. Mikroskopické pozorování na scanovacím elektronovém mikroskopu probíhalo na výřezech ze zkušebních vzorků o rozměru $10 \times 10 \times 10$ mm, které musely být speciálně upravené pokovováním.

Výše popsané zkoušky fyzikálně – mechanických vlastností, stanovení a pozorování byly zjišťovány na teplotně nezatížených – referenčních vzorcích a na vzorcích po zatížení na jednotlivé teplotní stupně, které jsou specifikovány ve schématech jednotlivých etap.

Zjištěné výsledky sledování fyzikálně – mechanických vlastností a mikroskopických změn ve struktuře zkoušených vzorků byly vzájemně vyhodnocovány, komparovány a byly sledovány vzájemné souvislosti s cílem stanovit složení nejodolnějšího cementového kompozitního materiálu vůči vysokým teplotám.

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

5.1 Základní parametry použitých materiálů

5.1.1 Pojiva

5.1.1.1 Cementy ze závodu Mokrý (Českomoravský cement a.s.)

CEM I 42,5 R je čistý portlandský cement, jehož jedinou hlavní složkou je portlandský slínek.

CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R je portlandský směsný cement.

Tab. č. 12: Vlastnosti CEM I 42,5 R a CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R – Mokrý [67]

vlastnost	CEM I 42,5 R	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R
měrný povrch [m ² /kg]	377	560
měrná hmotnost [kg/m ³]	3 110	3 050
objemová stálost [mm]	1,0	1,0
normální konzistence [%]	28,3	30,0
pevnost v tlaku - 28 dní [N/mm ²]	61	47
pevnost v tahu za ohybu - 28 dní [N/mm ²]	9	8
ztráta žíháním [% hm.]	3,0	-
CaO [% hm.]	65	61
SiO ₂ [% hm.]	20	19
Fe ₂ O ₃ [% hm.]	3	3
Al ₂ O ₃ [% hm.]	4	4
MgO [% hm.]	1	2
SO ₃ [% hm.]	2,9	2,6
Cl ⁻ [% hm.]	0,057	0,064
K ₂ O [% hm.]	0,75	0,72
Na ₂ O [% hm.]	0,17	0,17

5.1.1.2 Cementy ze závodu Holcim (Prachovice, Holcim a.s., člen koncernu)

CEM II/B-S 32,5 R je volně ložený portlandský struskový cement.

CEM III/B 32,5 N-SV je vysokopecní cement síranovzdorný s hmotnostním obsahem 66 – 80 % vysokopecní strusky.

Tab. č. 13: Vlastnosti CEM II/B-S 32,5 R a CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim [68]

vlastnost	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/B 32,5 N-SV
měrný povrch [m ² /kg]	367	396
objemová stálost [mm]	1,1	0,4
pevnost v tlaku – 28 dní [N/mm ²]	49,0	45,4
pevnost v tahu za ohybu – 28 dní [N/mm ²]	9,1	10,2
ztráta žíháním [% hm.]	-	1,13
SO ₃ [% hm.]	3,06	3,05
Cl [% hm.]	0,082	0,038
K ₂ O [% hm.]	0,74	0,47
Na ₂ O [% hm.]	0,39	0,42

5.1.2 Plniva

5.1.2.1 Kamenivo z lokality Žabčice

Kamenivo frakce 0 – 4 mm Žabčice je přírodní těžené drobné kamenivo do betonu neprané (nerost – živcový štěrkopísek).

Tab. č. 14: Vlastnosti kameniva z lokality Žabčice [69]

vlastnost	hodnota
objemová hmotnost [kg/m ³]	2 560
nasákavost WA ₂₄ [% hm.]	1,2
alkalicko křemičitá reakce [Δ1 %]	0,035
obsah chloridů [% hm.]	< 0,005
obsah celkové síry [% hm.]	0,01
obsah přírodních nuklidů [% hm.]	0,46

5.1.2.2 Kamenivo z lokality Náklo

Kamenivo frakce 0 – 4 mm z provozovny Náklo je přírodní těžené kamenivo, které má snížený obsah slídy a oxidů křemene a proto je doporučováno do teplotně odolných betonů.

Tab. č. 15: Petrografický rozbor kameniva frakce 0 – 4 mm pískovny Náklo [83]

složka	hodnota [% hm.]
křemen monokrystalický	28
křemen polykrystalický	28
živec	3
granitoid	5
sediment	12
metamorfit	23
černá zrna	1
procento jemných částic	0,8 – 1,8 %

5.1.2.3 Kamenivo z lokality Bílčice

Kamenivo z provozovny Bílčice je přírodní drcené kamenivo z čedičové horniny – bazalt. Obsah SiO_2 je u čedičové horniny v rozmezí 44 – 52 % [77].

Tab. č. 16: Vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice [75] [76]

vlastnost	hodnota pro frakci	
	0 – 4 mm	4 – 8 mm
obsah jemných částic [% hm.]	7,5	0,6
obsah celkové síry [% hm.]	0,048	0,048
obsah chloridových solí [% hm.]	0,0004	0,0004
nasákavost [% hm.]	0,9	0,9
objemová hmotnost kameniva [kg/m^3]	2 945	2 978
tvár zrn – tvarový index > 3 [% hm.]	-	6,4
sypaná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m^3]	1 985	1 690
sypaná hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m^3]	1 626	1 520
mezerovitost volně sypaného kameniva [% hm.]	44,8	48,9
mezerovitost setřeseného kameniva [% hm.]	32,6	43,2
petrografické složení	nepravidelně omezené hnědavé pyroxeny lišťovité, polysyntetické zdvojitěné plagioklasy rudní minerály (magnetit, ilmenit) jílové minerály oxihydroxidy Fe	

Tab. č. 17: Silikátová analýza bazaltů z lomu Bílčice, podle Gregerové (průměrné hodnoty z jedenácti analýz) [76]

prvek	SiO₂	TiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	FeO	MnO	CaO	MgO
hm. [%]	41,3	2,5	12,7	7,5	5,0	0,2	11,2	10,6
prvek	K₂O	Na₂O	S	CO₂	P₂O₅	- H₂O	H₂O	
hm. [%]	0,5	1,7	0,0	0,0	1,2	2,1	3,0	

5.1.2.4 Kamenivo z lokality Olbramovice

Kamenivo z lokality Olbramovice je přírodní drcené kamenivo z nerostu granodiorit - biotitický granodiorit. Obsah SiO_2 je u granodioritové horniny v rozmezí 52 – 65 % [77]. Pro použité frakce kameniva 4 – 8 mm a 8 – 16 mm jsou shodné vlastnosti, viz Tab. č. 18.

Tab. č. 18: Vlastnosti kameniva Olbramovice frakce 4 – 8 mm a 8 – 16 mm [78] [82]

vlastnost	hodnota
otlukovost [% hm.]	15-30
nasákavost [% hm.]	0,4 - 1,2
mrazuvzdornost [% hm.]	0,3 - 1,3
obsah veškeré síry (SO) [% hm.]	0,12
reaktivnost s alkáliemi [-]	0,02
pevnost kamene v tlaku [N/mm ²]	170
objemová hmotnost kamene [kg/m ³]	2 640
drtitelnost [-]	0,80
obsah přírodních radionuklidů [Bq/kg]	28
součinitel ohladitelnosti [-]	0,501
petrografické složení [% hm.]	plagioklasy (42 %) draselné živce (15 %) křemen (34 %) biotit (8 %) ostatní (1 %)

5.1.2.5 Kamenivo Liapor

Lehké kamenivo Liapor pochází od výrobce Lias Vintřov, LSM, k.s.. Liapor je ve Vintřově vyráběn z třetihorních cypřišových jíílů a při výrobě nejsou používány žádné umělé protvorné přísady. Z jíílů jsou vyrobeny granule, které se vypalují při teplotě asi 1 150 °C.

Tab. č. 19: Vlastnosti lehkého kameniva Liapor [69]

vlastnost	hodnota pro frakci	
	1 – 4/500	4 – 8/600
sypaná hmotnost [kg/m ³]	500	600
tolerance sypané hmotnosti [%]	± 15	
objemová hmotnost zrna	925	1150
tolerance objemové hmotnosti zrna [%]	± 15	
nasákavost w ₅ [% hm., max]	2	
nasákavost w ₃₀ [% hm., max]	4	
nasákavost w ₆₀ [% hm., max]	5	
nasákavost w ₁₂₀ [% hm., max]	6	
odolnost proti drcení [MPa, min]	3,0	4,2
odolnost vůči zmrazování a rozmrazování [% ztráty hm., min]	2	
chloridy [% hm.]	< 0,02	
sírany rozpustné v kyselině [% hm.]	< 0,8	
celková síra [% hm.]	< 1,0	
součinitel tepelné vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,11	0,14
třída hořlavosti	A1 (DIN 4102)	
procentuální podíl drcených zrn [% hm.]	< 5,0	
jemné částice (< 0,063 mm)	< 1,0	

Tab. č. 20: Chemické složení lehkého kameniva Liapor [70]

prvek	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	stopové prvky
hm.[%]	55 ± 5	24 ± 5	14 ± 5	5 ± 5	2 ± 2

5.1.3 Příměsi

5.1.3.1 Popílek Dětmárovice

Popílek z elektrárny Dětmárovice je produkt klasického vysokoteplotního spalování černého uhlí. Popílek byl použit pouze v jedné receptuře etapy IV experimentálních prací.

Tab. č. 21: Vlastnosti popílku Dětmárovice [86]

chemické složení	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O
	52,4	24,2	6,4	0,3	1,0	<0,1	0,4	4,0	2,8
	MgO	MnO	Na ₂ O	C	S	ztráta žháním			
	2,8	0,1	0,3	4,5	0,8	3,37			
mineralogické složení					mullit, β křemen				
měrná hmotnost [kg.m ⁻³]					2015				
měrný povrch [m ² /kg]					204,5				
maximální zrno [mm]					0,5				
měrná aktivita ²²⁶ Ra [Bq/kg]					84				

5.1.4 Přísady

5.1.4.1 Superplastifikátor Mapefluid N200

Mapefluid N200 od firmy Mapei je tekutá přísada hnědé barvy na bázi aktivních polymerů ve vodním roztoku, které jsou schopny rozptýlit v betonové směsi zrnka cementu. Doporučené dávkování je 0,5 až 1,5 litru na 100 kg cementu. [87]

5.1.4.2 Plastifikátor ChrysoPlast 760

Plastifikátor ChrysoPlast 760 od firmy Chryso je plastifikátor hnědé barvy na bázi modifikovaných naftalenových polymerů. Doporučené dávkování je od 0,3 kg do 1,8 kg na 100 kg cementu, obvyklá dávka je 0,6 % z hmotnosti cementu. [88]

5.1.4.3 Plastifikátor ChrysoPlast 460

Plastifikátor ChrysoPlast 460 od firmy Chryso je plastifikátor hnědé barvy na lignosulfonanové bázi. Doporučené dávkování je od 0,25 kg do 1,0 kg na 100 kg cementu, obvyklá dávka je 0,4 % z hmotnosti cementu. [88]

5.1.4.4 Superplastifikátor ChrysoFluid Optima 206

Superplastifikátor ChrysoFluid Optima 206 od firmy Chryso je plastifikátor hnědozelené barvy na bázi modifikovaných polykarboxylátů. Doporučené dávkování je od 0,3 kg do 3,0 kg na 100 kg cementu. [88]

5.1.4.5 Pro vzdušňovací přísada Chryso Air A

Chryso Air A je provzdušňovací přísada od firmy Chryso žlutooranžové barvy, která v betonu vytváří stabilní síť mikroskopických bublinek. Doporučené dávkování je od 0,04 kg do 0,6 kg na 100 kg cementu, obvyklá dávka je 0,1 % z hmotnosti cementu. [88]

5.1.5 Rozptýlená výztuž

5.1.5.1 Polypropylenová vlákna

Použitá polypropylenová vlákna byla od výrobce KrampeHarex.

Tab. č. 22: Přehled vlastností polypropylenových vláken [71]

vlastnost/typ vlákna	Fibrin 615	Fibrin 315
materiál vlákna	polypropylen	polypropylen
hustota	910 kg/m ³	910 kg/m ³
délka vlákna	6 mm	12 mm
průměr vlákna	5 μm	16 μm
bod tání	150 – 160 °C	160 °C
doporučené dávkování	1 000 g/m ³	1 000 g/m ³

5.1.5.2 Vlákna na bázi celulózy

Použitá vlákna na bázi celulózy byla od výrobce Buckeye.

Tab. č. 23: Přehled vlastností rozptýlené výztuže na bázi celulózy [72]

vlastnost/typ vlákna	UltraFibre 500
materiál vlákna	přírodní na bázi celulózy
hustota	1 100 kg/m ³
délka vlákna	1,9 – 2,3 mm
průměr vlákna	14 – 17 μm
bod tání	135 °C
doporučené dávkování	450 g/m ³

5.1.5.3 Skleněná vlákna

Použitá vlákna na bázi skla byla od výrobce Owens Corning – OCV Reinforcements.

Tab. č. 24: Přehled vlastností rozptýlené výztuže na bázi skla [73]

vlastnost/typ vlákna	Cem-FIL 60/3
materiál vlákna	sklo
hustota	-
délka vlákna	12 mm
průměr vlákna	14 μm
bod tání	860 $^{\circ}\text{C}$
doporučené dávkování	-

5.1.5.4 Ocelová vlákna

Použitá ocelová vlákna s nízkým obsahem uhlíku byla od výrobce Fibercon International, Inc.

Tab. č. 25: Přehled vlastností rozptýlené ocelové výztuže [74]

typ vlákna	CAR25CDM
materiál vlákna	ocel s nízkým obsahem uhlíku
hustota	7 860 kg/m^3
délka vlákna	25 mm
průměr vlákna	500 μm
bod tání	2 760 $^{\circ}\text{C}$
doporučené dávkování	-

5.2 Složení jednotlivých směsí

Tab. č. 26: Receptury směsí s hrubým kamenivem Olbramovice a jemnozrnných směsí

složka [kg/m ³] / směs	II	II a	II b	II c	II d	III m	III n	III o	IV	
CEM I 42,5 R – Mokrý	350	-					390	340	380	360
CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim	-	586					-			-
kamenivo 0 – 4 mm Žabčice	894	-					820	950	860	930
kamenivo 0 – 4 mm Náklo	-	1 758					-			-
kamenivo 4 – 8 mm Olbramovice	-	-					405	950	860	200
kamenivo 8 – 16 mm Olbramovice	928	-					460	-	-	510
voda (z vodovodního řádu)	194	293					182	153	209	174
plastifikátor ChrysoPlast 760	-	-					3,1	-	-	-
plastifikátor ChrysoPlast 460	-	-					-	1,36	1,52	-
plastifikátor ChrysoFluid Optima 206	2,3	-					-			5,5
provzdušňovací přísada Chryso Air A	-	-					1,1	-	-	-
popílek Dětmárovice	-	-					-			90
polypropylenová vlákna Fibrin 615	2,0	-	2,0	-	-		-			-
polypropylenová vlákna Fibrin 315	-	-					-	-	1,0	-
skleněná vlákna Cem-FIL 60/3	-	-	-	2,0	-		-			-
celulózová vlákna UltraFibre 500	-	-	-	-	2,0		-			-
vodní součinitel w	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,47	0,45	0,55	0,48	
konzistence (sednutí kužele) [mm]	150	-	-	-	-	160	130	180	250	
obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	11,4	-	-	-	-	7,5	3,1	5,5	1,8	
OH čerstvého betonu [kg/m ³]	2180	2270	2090	2250	2230	2310	2390	2330	2360	

Tab. č. 27: Receptury navržených směsí s hrubým kamenivem čedič Bílčice nebo Liapor

složka [kg/m ³] / směs	III a	III b	III c	III d	III e	III f	III g	III h	III i	III j	III k	III l	
CEM I 42,5 R – Mokrý	350	-	-	-	375	-	-	-	-				
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R – Mokrý	-	350	-	-	-	375	-	-	-				
CEM II/B-S 32,5 R – Holcim	-	-	350	-	-	-	375	-	-				
CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim	-	-	-	350	-	-	-	375	350				
kamenivo 0 – 4 mm Bílčice	1 070				500				1 070				
kamenivo 4 – 8 mm Bílčice	1 050				-				1 070				
kamenivo Liapor 1 – 4/500 [m ³]	-				0,24				-				
kamenivo Liapor 4 – 8/600 [m ³]	-				0,40				-				
superplastifikátor Mapefluid N200	6,3				4,5				3,5				
voda (z vodovodního řádu)	175				125				175				
polypropylenová vlákna Fibrin 315	-				-				-	1	2	-	
ocelová vlákna CAR25CDM	-				-				-	-	-	50	
vodní součinitel w	0,50				0,33				0,50				
konzistence (sednutí kužele) [mm]	150	120	160	160	170	130	170	160	130	30	10	80	
obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	-				-				-				
OH čerstvého betonu [kg/m ³]	2570	2560	2580	2580	1720	1700	1710	1720	2560	2550	2500	2610	

5.3 Výsledky a vyhodnocení jednotlivých etap řešení

5.3.1 Etapa I

Soubor sedmi vzorků dostupných druhů kameniv do betonu byl postupně podroben teplotnímu zatížení na různé teplotní stupně a následnému testování. Snahou bylo vybrat různé druhy kameniva, které se budou co nejvíce lišit svojí mineralogií a pokud možno aby byly shodné frakce. Seznam testovaných kameniv včetně jejich charakteristik je v Tab. č. 28 a Tab. č. 29.

Tab. č. 28: Přehled testovaných kameniv včetně jejich charakteristik

původ kameniva – lokalita	značení vzorku	frakce [mm]	hornina/materiál
přírodní drcené kamenivo – Olbramovice	Olbramovice	8 – 16	biotický granodiorit
přírodní drcené kamenivo – Lomnička	Lomnička	8 – 16	svratecká ortorula
přírodní drcené kamenivo – Bílčice	Bílčice	8 – 16	čedič (bazalt)
přírodní těžené kamenivo – Náklo	Náklo	1 – 16	šterkopísek – kvartér
betonový recyklát	recyklát	1 – 16	beton
průmyslově sbalkovaný popílek	sbalky	8 – 16	popílek + cement
průmyslové lehké kamenivo – Lias Vintřfov	Liapor	4 – 8	vypálený cypřišový jíl

Tab. č. 29: Příslušnost a petrografické složení přírodních kameniv [82] [83] [84] [85]

hornina/minerál	Olbramovice	Lomnička	Bílčice	Náklo
geologická příslušnost	Brněnský masiv	Moravikum	Velký Roudný	říční nánosy Moravy
hornina	biotický granodiorit	svratecká ortorula	čedič (bazalt)	šterkopísek
křemen	34	54	-	55
živec (albit, ortoklas, anortit)	15	3	-	1
kalcit	-	4	-	-
sericit (slídový minerál)	-	28	-	-
limonit = hnědel	-	11	-	-
biotit (slídový minerál)	8	-	-	-
plagioklasy (andezit, albit)	42	-	20 – 30	-
olivín	-	-	15 – 20	-
pyroxeny (augit, titanaugit)	-	-	37 – 45	-
nefelín	-	-	1 – 3	-
magnetit	-	-	10 – 25	-
ostatní	1	-	-	-
granitoid	-	-	-	10
sediment	-	-	-	9
metamorfit	-	-	-	25

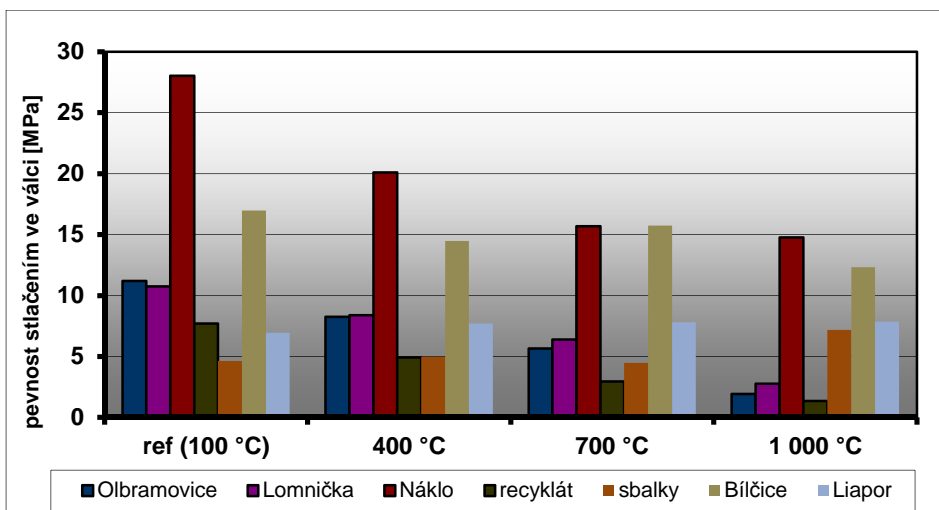
5.3.1.1 Pevnost stlačením ve válci a úbytek hmotnosti

Jedny ze základních zkoušek, které byly prováděny před a po jednotlivých stupních teplotního zatěžování, jsou pevnost stlačením ve válci a úbytek váhy kameniva po jednotlivých stupních teplotního zatížení.

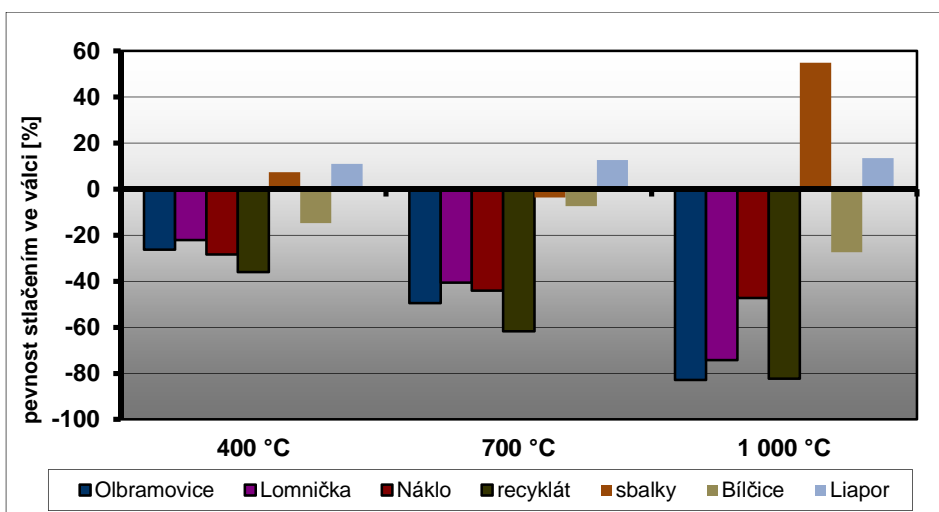
Výsledky těchto vlastností jsou uvedeny níže, viz Tab. č. 30 a graficky zpracované v Graf č. 1 – Graf č. 3.

Tab. č. 30: Výsledky pevností stlačením ve válci a úbytků hmotnosti

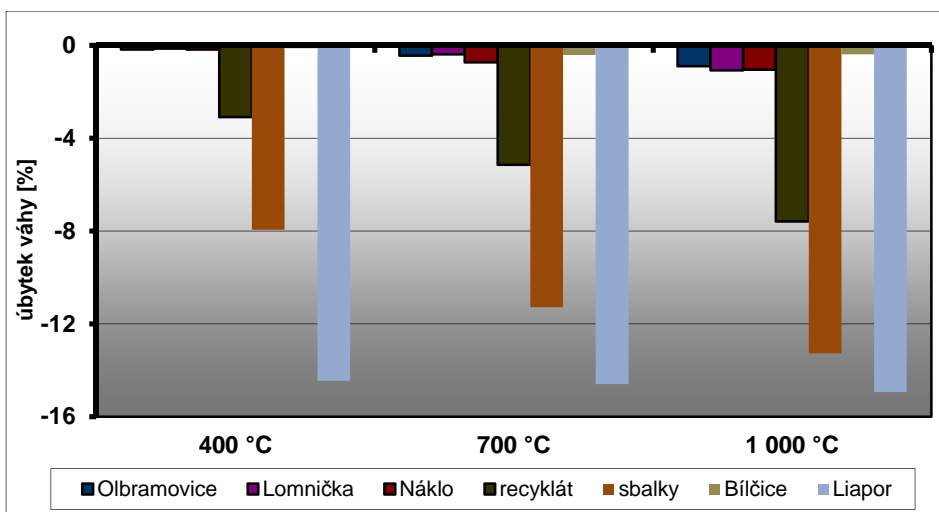
označení vzorku	zatěžování	váha [g]		úbytek hmotnosti		pevnost stlačením ve válci			
		před	po			síla [N]	pevnost		změna [%]
				[g]	[%]		[MPa]	[%]	
Olbramovice	ref (100 °C)					198 000	11,2	100,0	0,0
	400 °C	3 338,1	3 332,1	6,00	- 0,2	146 000	8,3	73,7	- 26,3
	700 °C	3 410,3	3 395,3	15,00	- 0,4	100 000	5,7	50,5	- 49,5
	1 000 °C	3 179,4	3 151,4	28,00	- 0,9	34 000	1,9	17,2	- 82,8
Lomnička	ref (100 °C)					190 000	10,8	100,0	0,0
	400 °C	3 840,5	3 835,5	5,00	- 0,1	148 000	8,4	77,9	- 22,1
	700 °C	3 368,0	3 355,0	13,00	- 0,4	113 000	6,4	59,5	- 40,5
	1 000 °C	3 513,6	3 476,6	37,00	- 1,1	49 000	2,8	25,8	- 74,2
Náklo	ref (100 °C)					495 000	28,0	100,0	0,0
	400 °C	4 256,1	4 249,0	7,10	- 0,2	355 000	20,1	71,7	- 28,3
	700 °C	3 913,0	3 885,0	28,00	- 0,7	277 000	15,7	56,0	- 44,0
	1 000 °C	2 991,5	2 960,5	31,00	- 1,0	261 000	14,8	52,7	- 47,3
recyklát	ref (100 °C)					136 000	7,7	100,0	0,0
	400 °C	3 209,4	3 113,4	96,00	- 3,1	87 000	4,9	64,0	- 36,0
	700 °C	3 271,3	3 111,3	160,00	- 5,1	52 000	2,9	38,2	- 61,8
	1 000 °C	3 051,5	2 836,5	215,00	- 7,6	24 000	1,4	17,6	- 82,4
sbalky	ref (100 °C)					82 000	4,6	100,0	0,0
	400 °C	2 283,2	2 115,2	168,00	- 7,9	88 000	5,0	107,3	+ 7,3
	700 °C	2 337,9	2 100,9	237,00	- 11,3	79 000	4,5	96,3	- 3,7
	1 000 °C	1 972,2	1 741,2	231,00	- 13,3	127 000	7,2	154,9	+ 54,9
Bílčice	ref (100 °C)					300 000	17,0	100,0	0,0
	400 °C	3 537,0	3 533,0	4,00	- 0,1	256 000	14,5	85,3	- 14,7
	700 °C	3 742,0	3 727,0	15,00	- 0,4	278 000	15,7	92,7	- 7,3
	1 000 °C	4 021,0	4 006,0	15,00	- 0,4	218 000	12,3	72,7	- 27,3
Liapor	ref (100 °C)					122 500	6,9	100,0	0,0
	400 °C	1 686,0	1 473,0	213,00	- 14,5	136 000	7,7	111,0	+ 11,0
	700 °C	1 649,0	1 439,0	210,00	- 14,6	138 000	7,8	112,7	+ 12,7
	1 000 °C	1 731,0	1 506,0	225,00	- 14,9	139 000	7,9	113,5	+ 13,5



Graf č. 1: Přehled pevností stlačením ve válci kameniv po jednotlivých stupních teplotního zatížení



Graf č. 2: Procentuální porovnání pevností stlačením ve válci kameniv po jednotlivých stupních teplotního zatížení



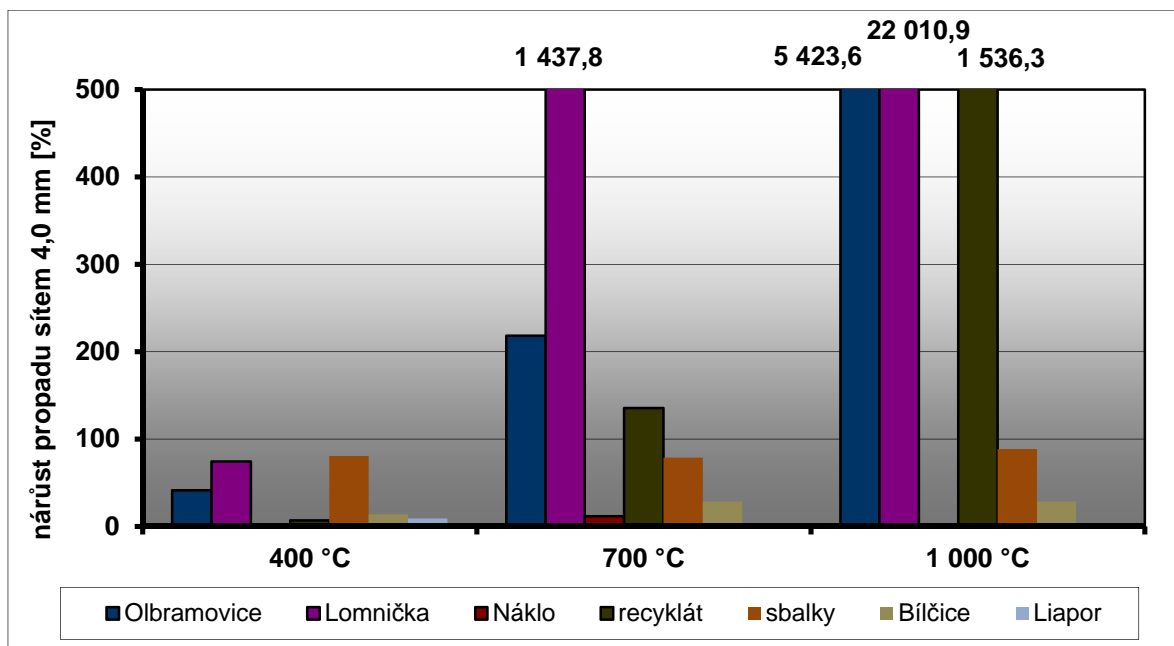
Graf č. 3: Procentuální porovnání úbytku hmotnosti kameniv po jednotlivých stupních teplotního zatížení

5.3.1.2 Omezený síťový rozbor

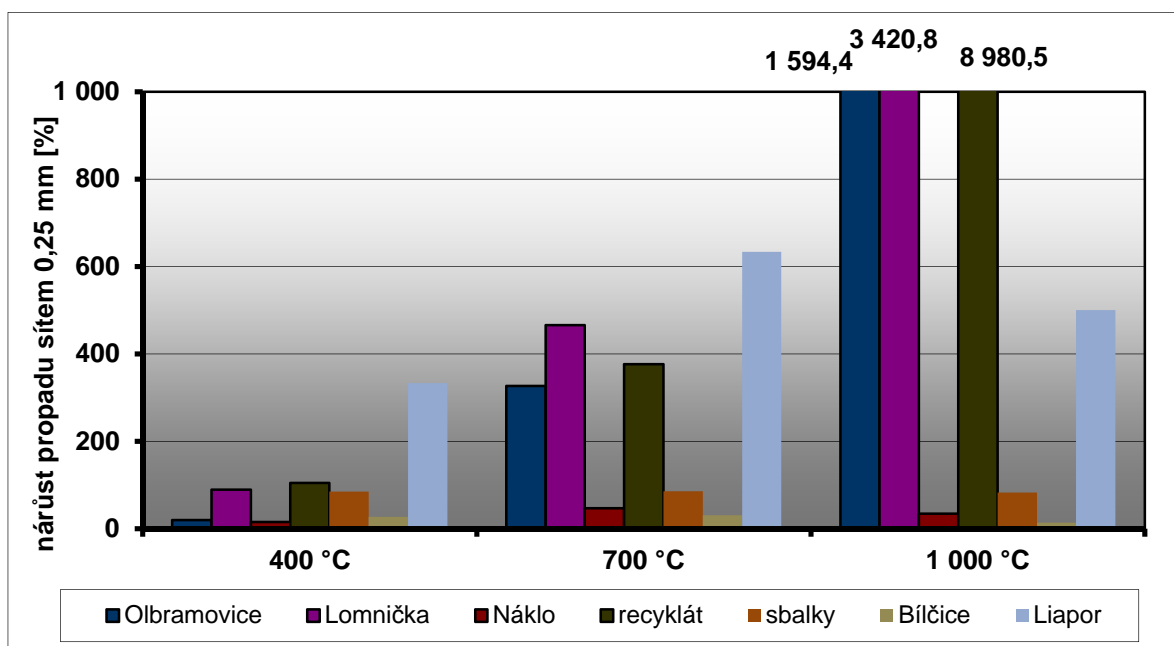
Omezený síťový rozbor byl prováděn vždy před a po teplotním zatížení a sestával se z prosetí vzorku kameniva přes síto 0,25 mm a 4,0 mm. Z rozdílů hodnot je vyjádřen nárůst propadu jednotlivými síty a také procentuální vyjádření nárůstu propadu. Výsledky těchto vlastností jsou uvedeny níže v Tab. č. 31 a graficky zpracované v Graf č. 4 a Graf č. 5.

Tab. č. 31: Výsledky omezeného síťového rozboru kameniva

označení vzorku	zatěžování	propad [g]				nárůst propadu			
		4,0 mm		0,25 mm		4,0 mm		0,25 mm	
		M _{4,0}	M _{14,0}	M _{0,25}	M _{10,25}	[g]	[%]	[g]	[%]
Olbramovice	400 °C	0,94	1,33	0,20	0,24	0,39	41,5	0,04	20,0
	700 °C	1,91	6,08	0,15	0,64	4,17	218,3	0,49	326,7
	1 000 °C	1,65	91,14	0,36	6,10	89,49	5 423,6	5,74	1 594,4
Lomnička	400 °C	1,06	1,85	0,28	0,53	0,79	74,5	0,25	89,3
	700 °C	0,74	11,38	0,32	1,81	10,64	1 437,8	1,49	465,6
	1 000 °C	0,46	101,71	0,24	8,45	101,25	22 010,9	8,21	3 420,8
Náklo	400 °C	172,02	173,52	0,38	0,44	1,50	0,9	0,06	15,8
	700 °C	132,31	147,75	0,51	0,75	15,44	11,7	0,24	47,1
	1 000 °C	347,96	354,18	9,92	13,32	6,22	1,8	3,40	34,3
recyklát	400 °C	45,39	48,52	0,39	0,80	3,13	6,9	0,41	105,1
	700 °C	20,56	48,39	0,59	2,81	27,83	135,4	2,22	376,3
	1 000 °C	35,51	581,04	0,41	37,23	545,53	1 536,3	36,82	8 980,5
sbalky	400 °C	1,65	2,98	1,57	2,91	1,33	80,6	1,34	85,4
	700 °C	2,30	4,11	2,09	3,88	1,81	78,7	1,79	85,6
	1 000 °C	1,40	2,64	1,38	2,52	1,24	88,6	1,14	82,6
Bílčice	400 °C	12,77	14,57	0,44	0,56	1,80	14,1	0,12	27,3
	700 °C	6,12	7,87	0,39	0,51	1,75	28,6	0,12	30,8
	1 000 °C	12,87	16,57	0,42	0,48	3,70	28,7	0,06	14,3
Liapor	400 °C	4,37	4,78	0,09	0,39	0,41	9,4	0,30	333,3
	700 °C	4,28	3,75	0,06	0,44	-0,53	-12,4	0,38	633,3
	1 000 °C	4,96	5,13	0,08	0,48	0,17	3,4	0,40	500,0



Graf č. 4: Procentuální nárůst propadu sítem 4,0 mm po stupních teplotního zatížení



Graf č. 5: Procentuální nárůst propadu sítem 0,25 mm po stupních teplotního zatížení

5.3.1.3 Objemová hmotnost zrn, nasákavost

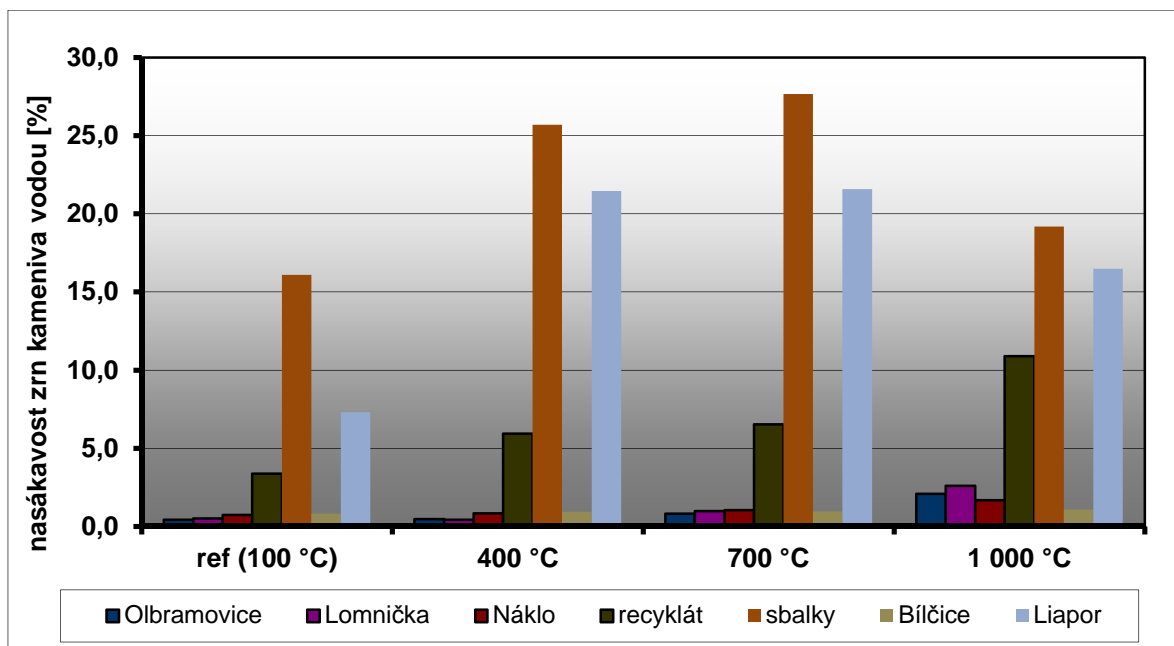
Objemová hmotnost zrn a nasákavost jednotlivých vzorků kameniva byly zjišťovány jednak na vzorcích teplotně nezatížených – referenčních a na vzorcích po zatížení na jednotlivé teplotní stupně.

Výsledky těchto vlastností jsou uvedeny níže v Tab. č. 32 a graficky zpracované v Graf č. 6 a Graf č. 7.

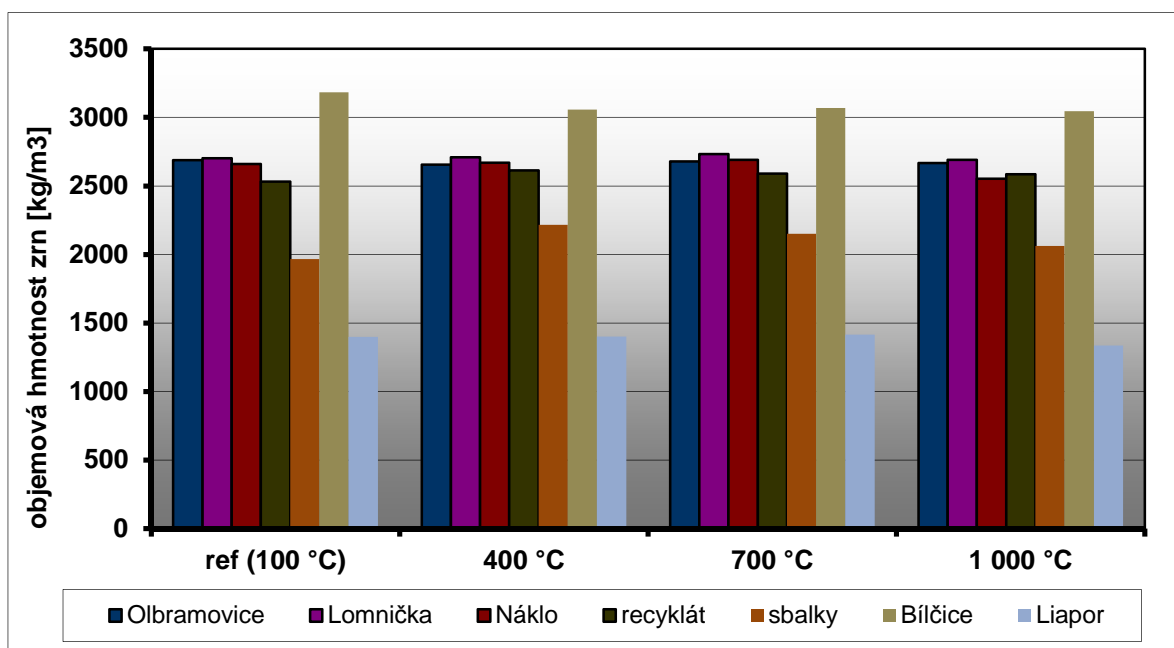
Tab. č. 32: Výsledky nasákavosti a objemových hmotností zrn kameniva

označení vzorku	zatěžování	M ₄	M ₁	M ₂	M ₃	ρ _a	ρ _{rd}	ρ _{ssd}	WA ₂₄ [%]
		[g]				[kg/m ³]			
Olbramovice	ref (100 °C)	857,48	861,14	2 212,08	1 673,66	2 688	2 657	2 668	0,4
	400 °C	711,66	715,01	2 118,44	1 674,71	2 656	2 623	2 636	0,5
	700 °C	637,77	643,04	1 673,93	1 274,30	2 678	2 620	2 642	0,8
	1 000 °C	685,23	699,56	2 096,16	1 667,86	2 667	2 526	2 579	2,1
Lomnička	ref (100 °C)	836,94	841,26	2 201,95	1 674,77	2 702	2 665	2 678	0,5
	400 °C	1 332,08	1 337,94	2 514,32	1 673,97	2 709	2 677	2 689	0,4
	700 °C	918,38	927,50	2 248,91	1 666,52	2 733	2 661	2 688	1,0
	1 000 °C	1 011,85	1 038,20	2 310,80	1 674,88	2 692	2 515	2 581	2,6
Náklo	ref (100 °C)	1 238,02	1 247,22	2 448,59	1 675,90	2 661	2 609	2 628	0,7
	400 °C	1 370,05	1 381,68	2 526,24	1 669,34	2 670	2 611	2 633	0,8
	700 °C	1 119,67	1 131,49	2 375,91	1 672,47	2 690	2 616	2 643	1,1
	1 000 °C	210,41	213,93	1 800,82	1 672,84	2 553	2 448	2 489	1,7
recyklát	ref (100 °C)	837,14	865,46	2 181,35	1 674,90	2 531	2 332	2 411	3,4
	400 °C	931,57	986,94	2 248,58	1 673,57	2 613	2 261	2 396	5,9
	700 °C	989,43	1 054,17	2 278,26	1 670,72	2 591	2 215	2 360	6,5
	1 000 °C	164,58	182,51	1 774,67	1 673,76	2 585	2 017	2 237	10,9
sbalky	ref (100 °C)	294,25	341,60	1 819,35	1 674,80	1 966	1 493	1 734	16,1
	400 °C	418,62	526,21	1 901,65	1 671,92	2 216	1 412	1 775	25,7
	700 °C	544,32	694,84	1 963,77	1 672,61	2 150	1 348	1 721	27,7
	1 000 °C	269,70	321,45	1 809,07	1 670,09	2 063	1 478	1 762	19,2
Bílčice	ref (100 °C)	905,77	913,21	2 283,87	1 662,67	3 183	3 102	3 127	0,8
	400 °C	761,08	768,21	2 186,12	1 673,96	3 058	2 972	3 000	0,9
	700 °C	929,42	938,31	2 293,94	1 667,40	3 069	2 981	3 010	1,0
	1 000 °C	1 161,06	1 173,69	2 453,25	1 673,36	3 046	2 948	2 980	1,1
Liapor	ref (100 °C)	365,76	392,50	1 298,27	1 194,06	1 398	1 269	1 361	7,3
	400 °C	318,39	386,72	1 772,73	1 681,62	1 401	1 077	1 308	21,5
	700 °C	283,69	344,89	1 761,48	1 678,12	1 416	1 085	1 319	21,6
	1 000 °C	346,90	404,09	1 757,78	1 670,59	1 336	1 095	1 275	16,5

- M₁ hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva
M₂ hmotnost pyknometru obsahujícího vzorek kameniva nasyceného vodou
M₃ hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou
M₄ hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky na vzduchu
ρ_a objemová hmotnost zrn
ρ_{rd} objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně
ρ_{ssd} objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených
WA₂₄ nasákavost vodou



Graf č. 6: Grafické zpracování nasákavosti zrn kameniva po jednotlivých stupních teplotního zatížení



Graf č. 7: Grafické zpracování objemové hmotnosti zrn kameniva po jednotlivých stupních teplotního zatížení

5.3.1.4 Makroskopické a mikroskopické pozorování

Makroskopické pozorování bylo provedeno vizuálně na celkovém vzorku kameniva ihned po ochlazení. Součástí je i fotografický záznam, s pomocí něhož je vyhodnocena barevná změna jednotlivých druhů kameniv, viz Obr. č. 46 – Obr. č. 66.

Sledování mikrostruktury jednotlivých vzorků kameniv bylo provedeno na optickém mikroskopu, z něhož byly pořízeny fotografické záznamy, viz Obr. č. 67 – Obr. č. 87.

Popis jednotlivých vzorků kameniv po teplotním zatížení z hlediska makroskopie i mikroskopie je v následující Tab. č. 33.

Tab. č. 33: Přehled makroskopického a mikroskopického pozorování

označení vzorku	zatěžování	pozorování vzorků	
		makroskopické	mikroskopické
Olbramovice	400 °C	- šedozelená, oranžová barva	- zrna bez defektů
	700 °C	- šedobílá, růžová barva	- trhliny v zrnech kameniva
	1 000 °C	- růžovobílá, oranžová barva - trhliny v zrnech - rozpad zrn při prosívání	- trhliny v zrnech kameniva
Lomnička	400 °C	- šedobílá, oranžová barva	- zrna bez defektů
	700 °C	- hnědobílá, oranžová barva - trhliny a rozpad části zrn	- trhliny a rozpad části zrn
	1 000 °C	- hnědobílá, růžová barva - trhliny a totální rozpad části zrn	- trhliny a totální rozpad části zrn
Náklo	400 °C	- různobarevné	- zrna bez defektů
	700 °C	- různobarevné - trhliny v zrnech	- trhliny v zrnech kameniva
	1 000 °C	- různobarevné - do oranžova - trhliny a totální rozpad části zrn	- trhliny v zrnech kameniva
recyklát	400 °C	- šedá barva	- mikrotrhliny v cementovém tmelu
	700 °C	- šedá barva	- trhliny v cementovém tmelu - trhliny i v části kameniva
	1 000 °C	- šedá barva - totální rozpad části zrn	- trhliny v cementovém tmelu - porušení soudržnosti kameniva a tmele - trhliny i v části kameniva
sbalky	400 °C	- černošedá barva	- zrna bez defektů
	700 °C	- hnědošedá barva	- výrazná změna barvy - minimální odlupování popílkových zrn
	1 000 °C	- pískově žlutá barva	- výrazná změna barvy - trhliny ve větších zrnech - minimální odlupování popílkových zrn
Bílčice	400 °C	- černošedá barva	- zrna bez defektů
	700 °C	- černošedá barva	- mikrotrhliny jen v železitých částech zrn
	1 000 °C	- černošedá barva	- trhliny jen v železitých částech zrn
Liapor	400 °C	- hnědobílá barva	- síť trhlín z výroby
	700 °C	- hnědobílá barva	- síť trhlín z výroby
	1 000 °C	- oranžovobílá barva - minimální rozpad zrn	- výrazná změna barvy - síť trhlín z výroby - minimální oddělení prachových částic



Obr. č. 46: Olbramovice po 400 °C



Obr. č. 47: Olbramovice po 700 °C



Obr. č. 48: Olbramovice po 1 000 °C



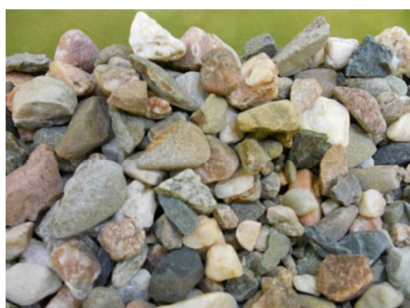
Obr. č. 49: Lomnička po 400 °C



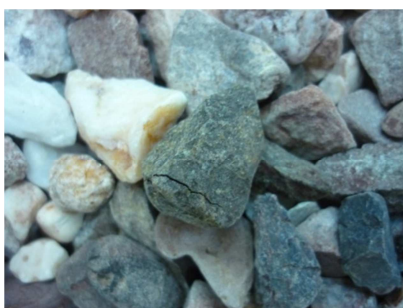
Obr. č. 50: Lomnička po 700 °C



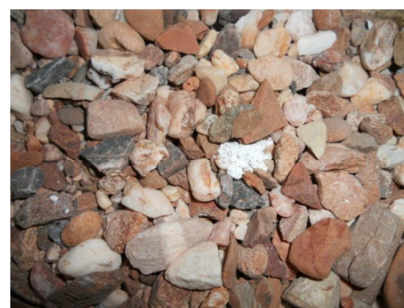
Obr. č. 51: Lomnička po 1 000 °C



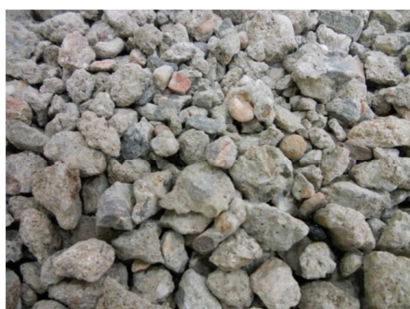
Obr. č. 52: Náкло po 400 °C



Obr. č. 53: Náкло po 700 °C



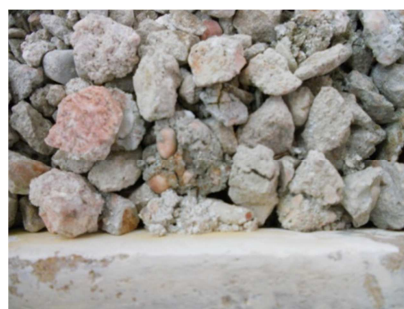
Obr. č. 54: Náкло po 1 000 °C



Obr. č. 55: Recyklát po 400 °C



Obr. č. 56: Recyklát po 700 °C



Obr. č. 57: Recyklát po 1 000 °C



Obr. č. 58: Sbalky po 400 °C



Obr. č. 59: Sbalky po 700 °C



Obr. č. 60: Sbalky po 1 000 °C



Obr. č. 61: Bílčice po 400 °C



Obr. č. 62: Bílčice po 700 °C



Obr. č. 63: Bílčice po 1 000 °C



Obr. č. 64: Liapor po 400 °C



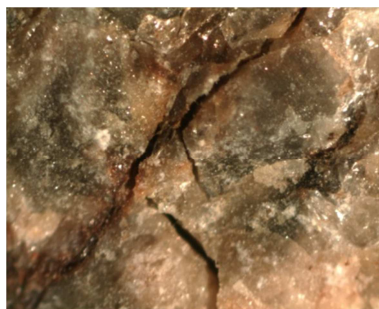
Obr. č. 65: Liapor po 700 °C



Obr. č. 66: Liapor po 1 000 °C



Obr. č. 67: Detail po 400 °C
– Olbramovice (zvětšeno 60×)



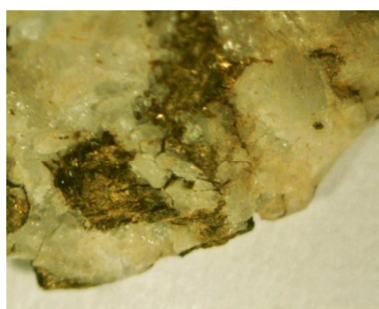
Obr. č. 68: Detail po 700 °C
– Olbramovice (zvětšeno 60×)



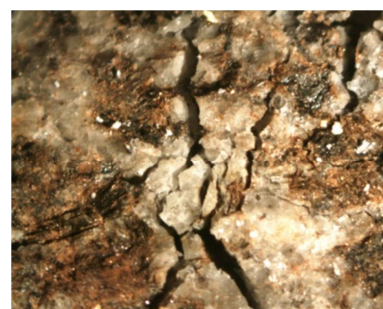
Obr. č. 69: Detail po 1 000 °C
– Olbramovice (zvětšeno 60×)



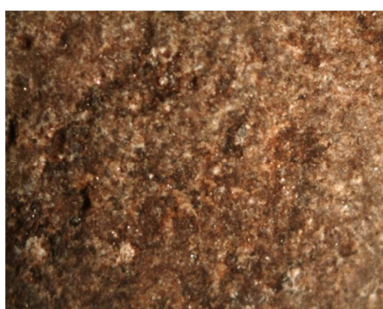
Obr. č. 70: Detail po 400 °C
– Lomnička (zvětšeno 40×)



Obr. č. 71: Detail po 700 °C
– Lomnička (zvětšeno 40×)



Obr. č. 72: Detail po 1 000 °C
– Lomnička (zvětšeno 40×)



Obr. č. 73: Detail po 400 °C
– Náklo (zvětšeno 40×)



Obr. č. 74: Detail po 700 °C
– Náklo (zvětšeno 40×)



Obr. č. 75: Detail po 1 000 °C
– Náklo (zvětšeno 40×)



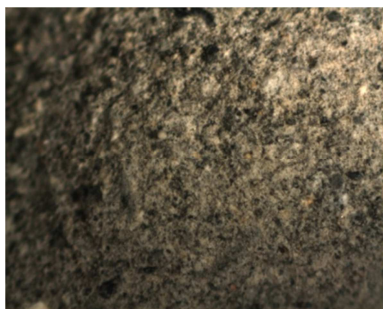
Obr. č. 76: Detail po 400 °C
– recyklát (zvětšeno 260×)



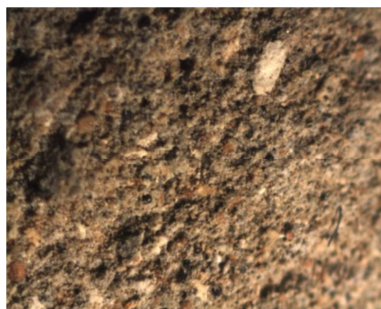
Obr. č. 77: Detail po 700 °C
– recyklát (zvětšeno 40×)



Obr. č. 78: Detail po 1 000 °C
– recyklát (zvětšeno 40×)



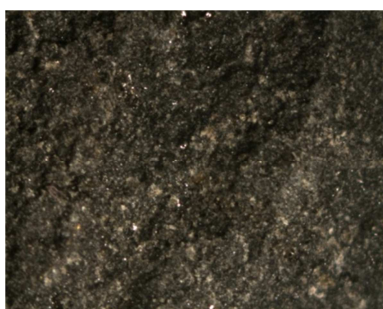
Obr. č. 79: Detail po 400 °C
– sbalky (zvětšeno 40×)



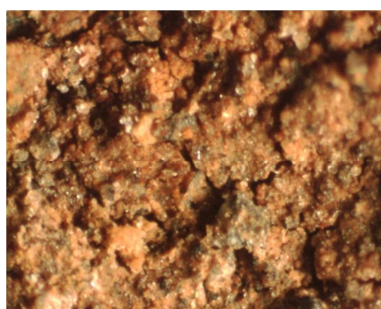
Obr. č. 80: Detail po 700 °C
– sbalky (zvětšeno 60×)



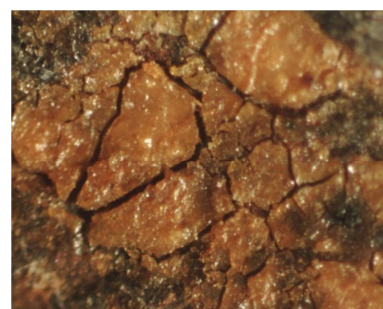
Obr. č. 81: Detail po 1 000 °C
– sbalky (zvětšeno 40×)



Obr. č. 82: Detail po 400 °C
– Bílčice (zvětšeno 40×)



Obr. č. 83: Detail po 700 °C
– Bílčice (zvětšeno 200×)



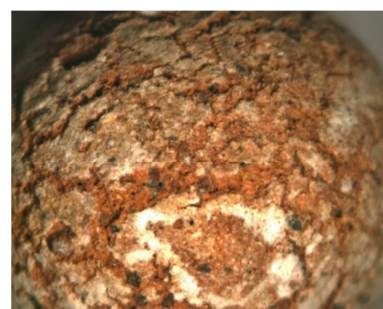
Obr. č. 84: Detail po 1 000 °C
– Bílčice (zvětšeno 160×)



Obr. č. 85: Detail po 400 °C
– Liapor (zvětšeno 40×)



Obr. č. 86: Detail po 700 °C
– Liapor (zvětšeno 40×)

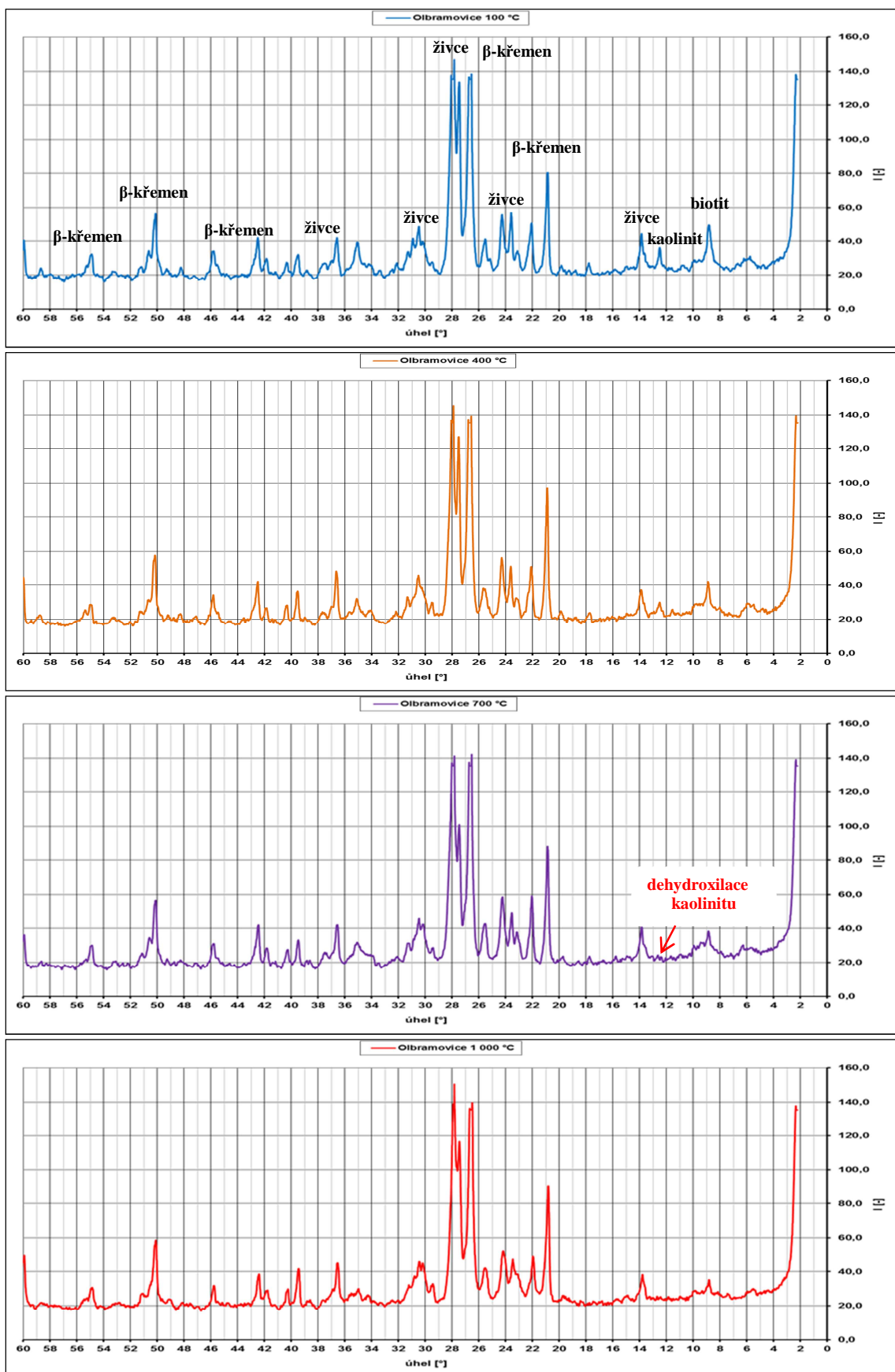


Obr. č. 87: Detail po 1 000 °C
– Liapor (zvětšeno 40×)

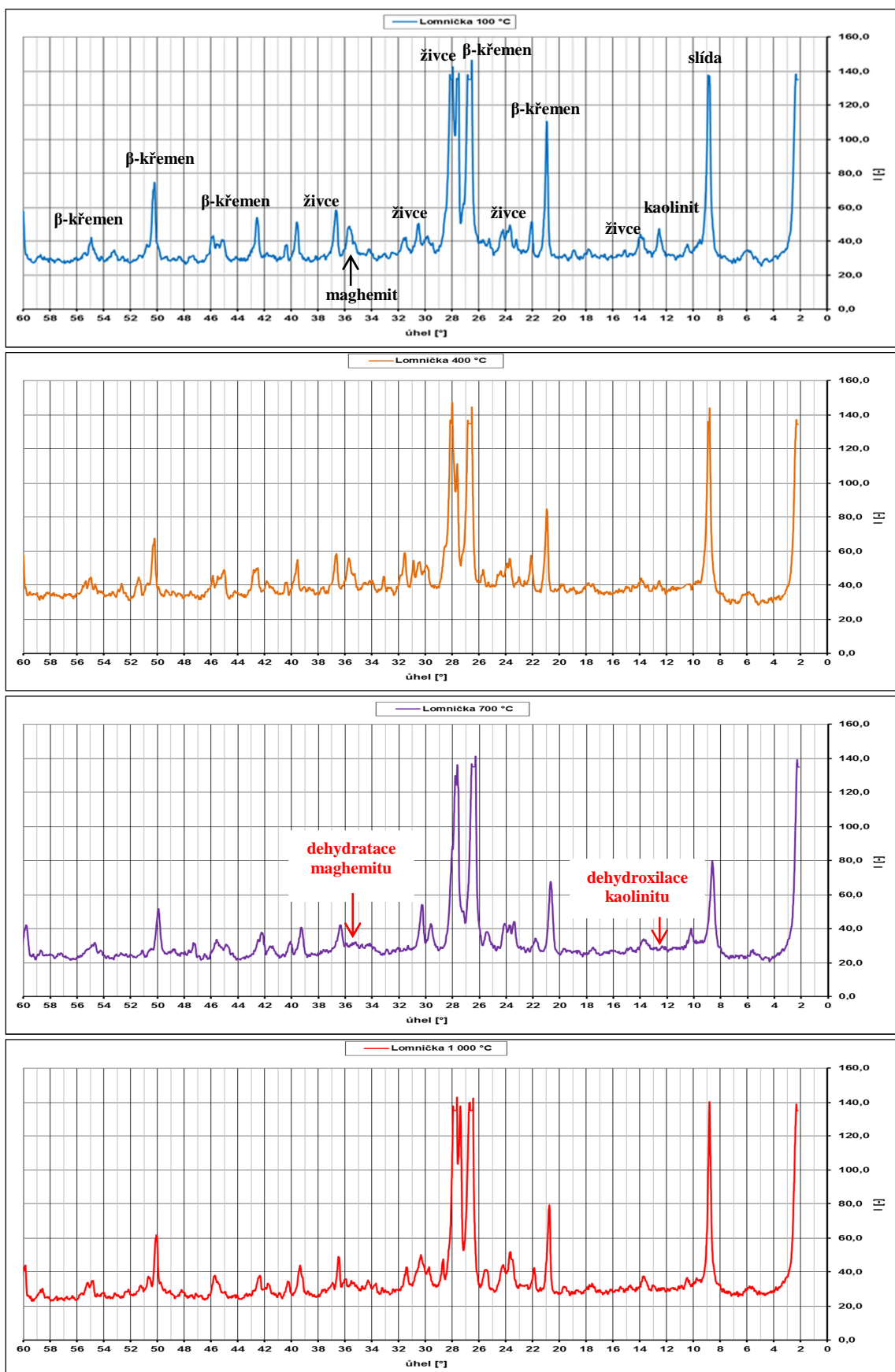
5.3.1.5 RTG difrakční analýza

Po zahřátí a následném ochlazení byl ze všech vzorků kameniva odebrán reprezentativní vzorek na provedení rentgenové difrakční analýzy. Výsledky jsou v následujících Graf č. 8 – Graf č. 14. V rentgenogramu nezatěžovaného vzorku (100 °C) jsou vyhodnoceny zjištěné minerály (s pomocí [89]). V dalších rentgenogramech jsou vyznačeny pouze změny, ke kterým příp. došlo při zatížení na danou teplotu a následném ochlazení.

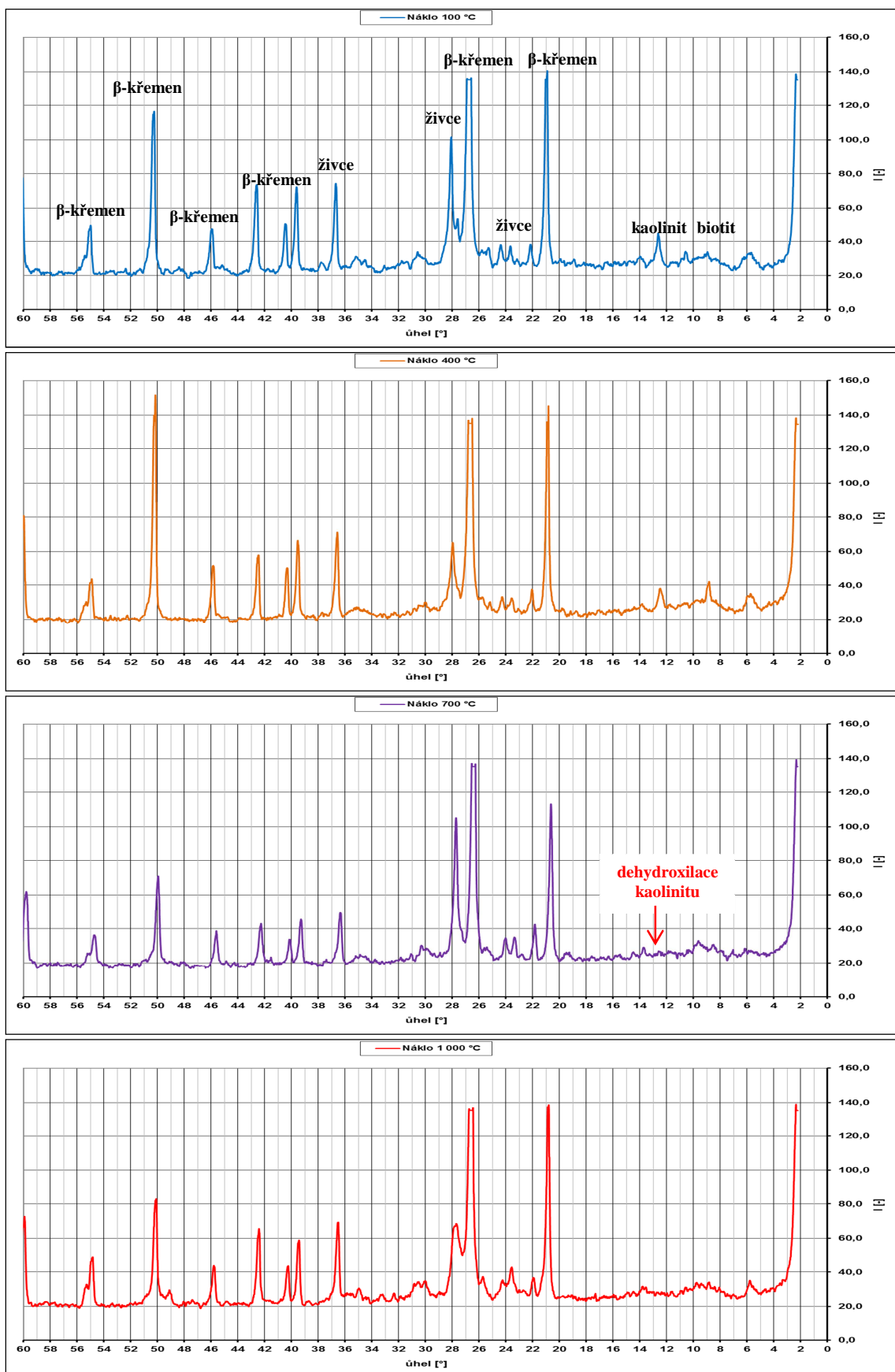
Pro následnou vysokoteplotní rentgenovou difrakční analýzu v teplotní komoře při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C, 1 000 °C a také při pokojové teplotě před zahříváním a po zahřívání byly vybrány tři vzorky kameniva (Bílčice – nejstabilnější přírodní kamenivo, Lomnička – nejméně stabilní přírodní kamenivo, sbalky – umělé kamenivo). Výsledky jsou zobrazeny v grafech Graf č. 15 – Graf č. 20.



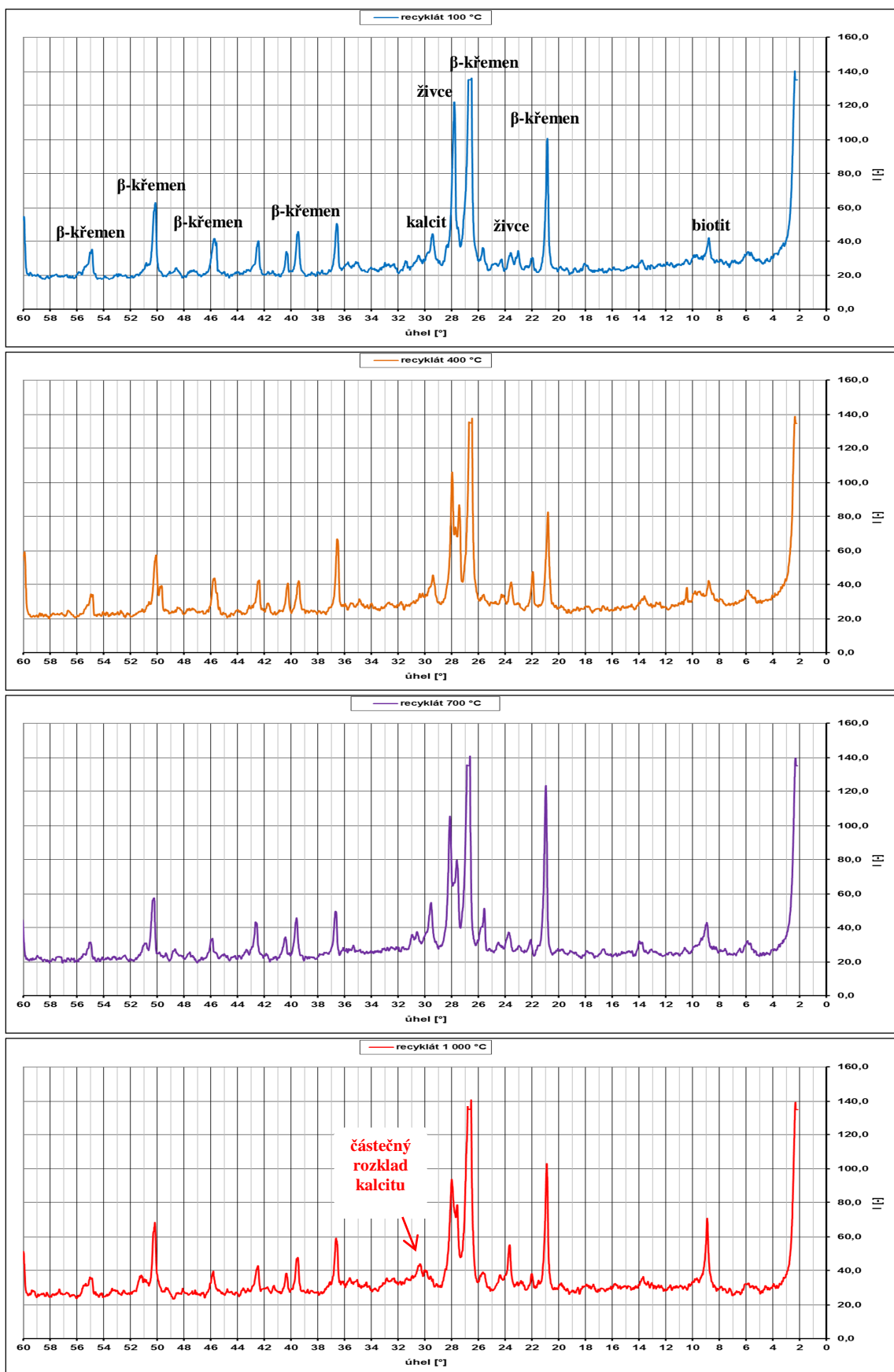
Graf č. 8: Rentgenogramy kameniva Olbramovice po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C



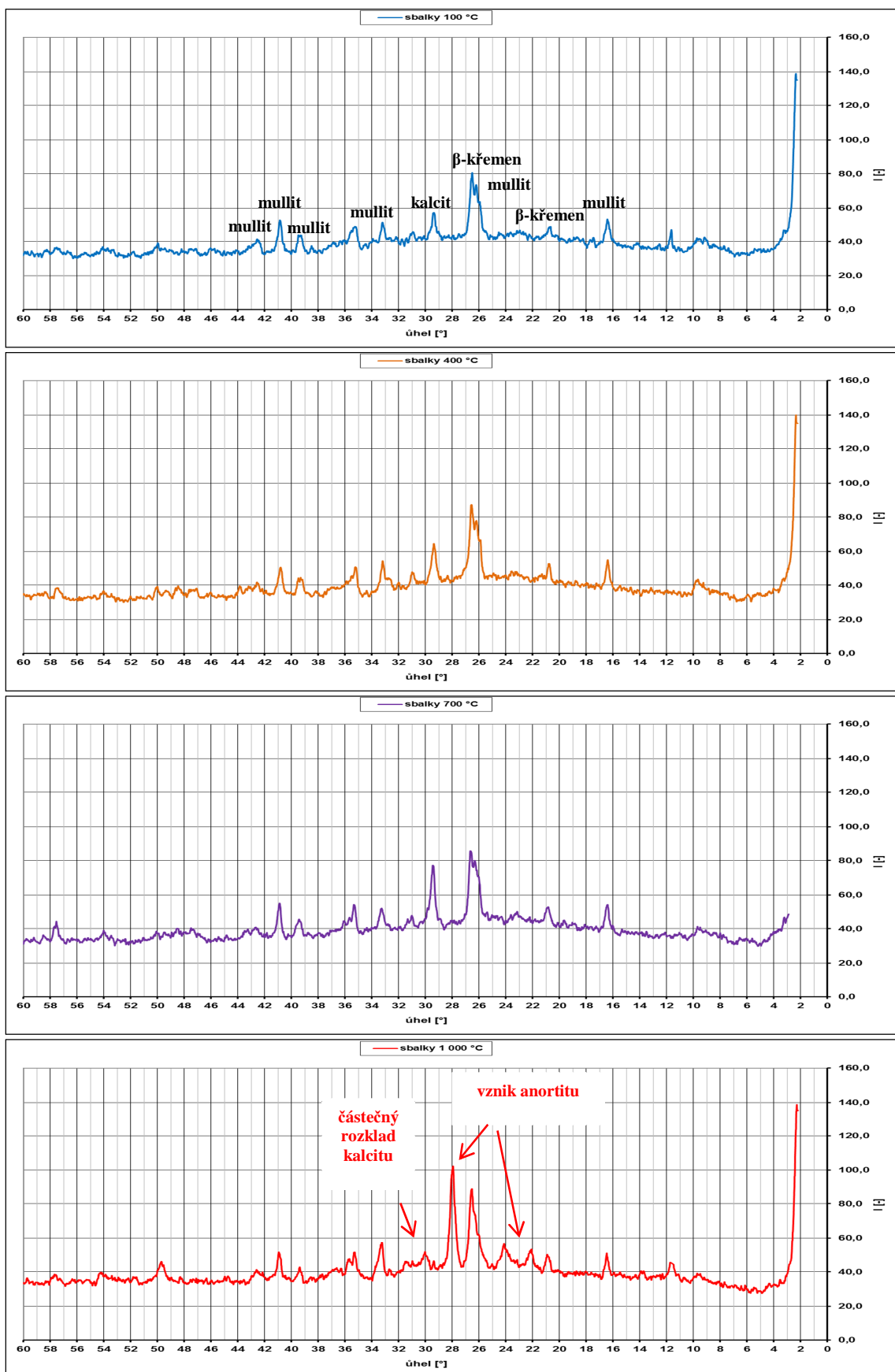
Graf č. 9: Rentgenogramy kameniva Lomnička po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C



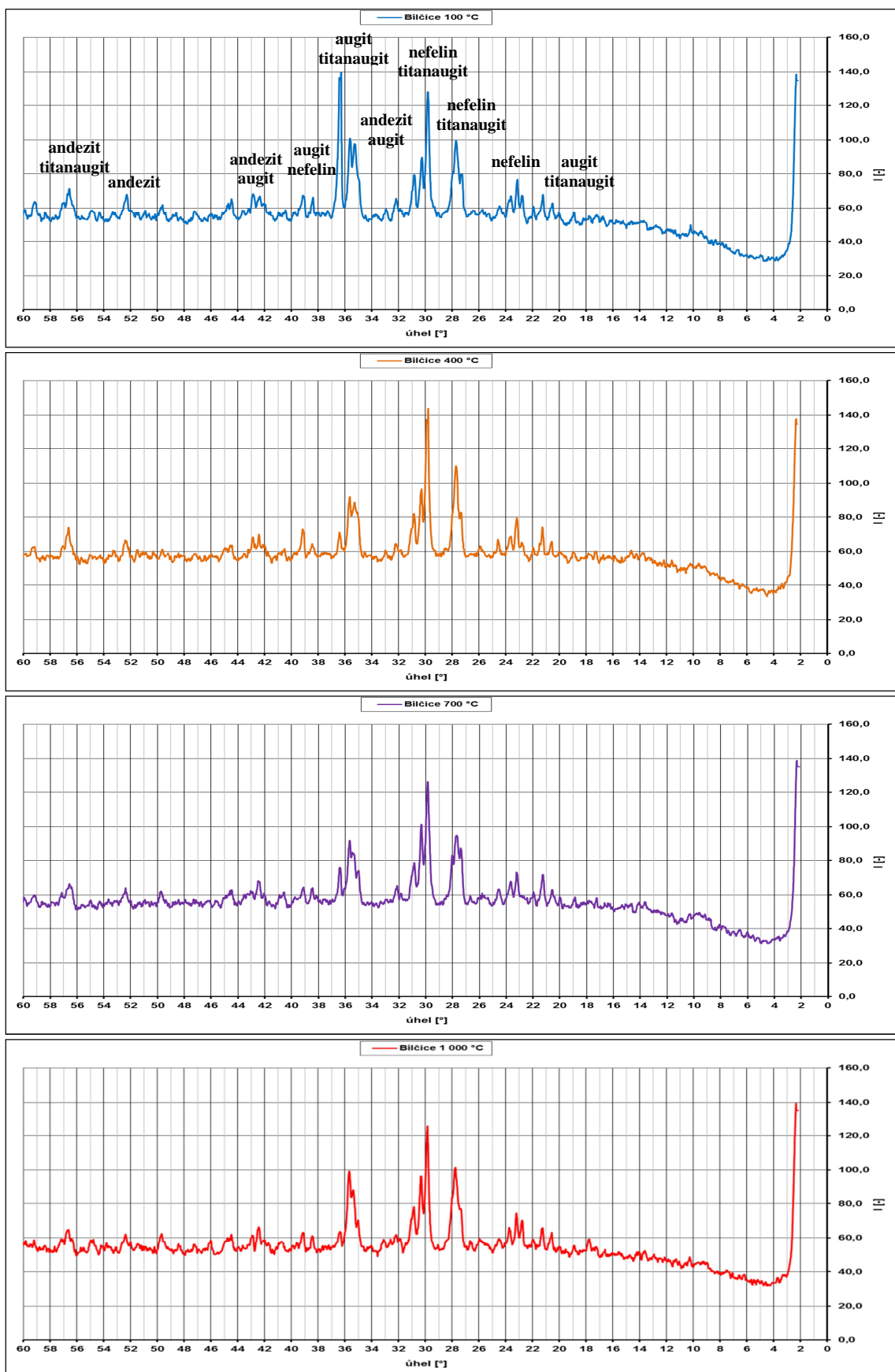
Graf č. 10: Rentgenogramy kameniva Náklo po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C



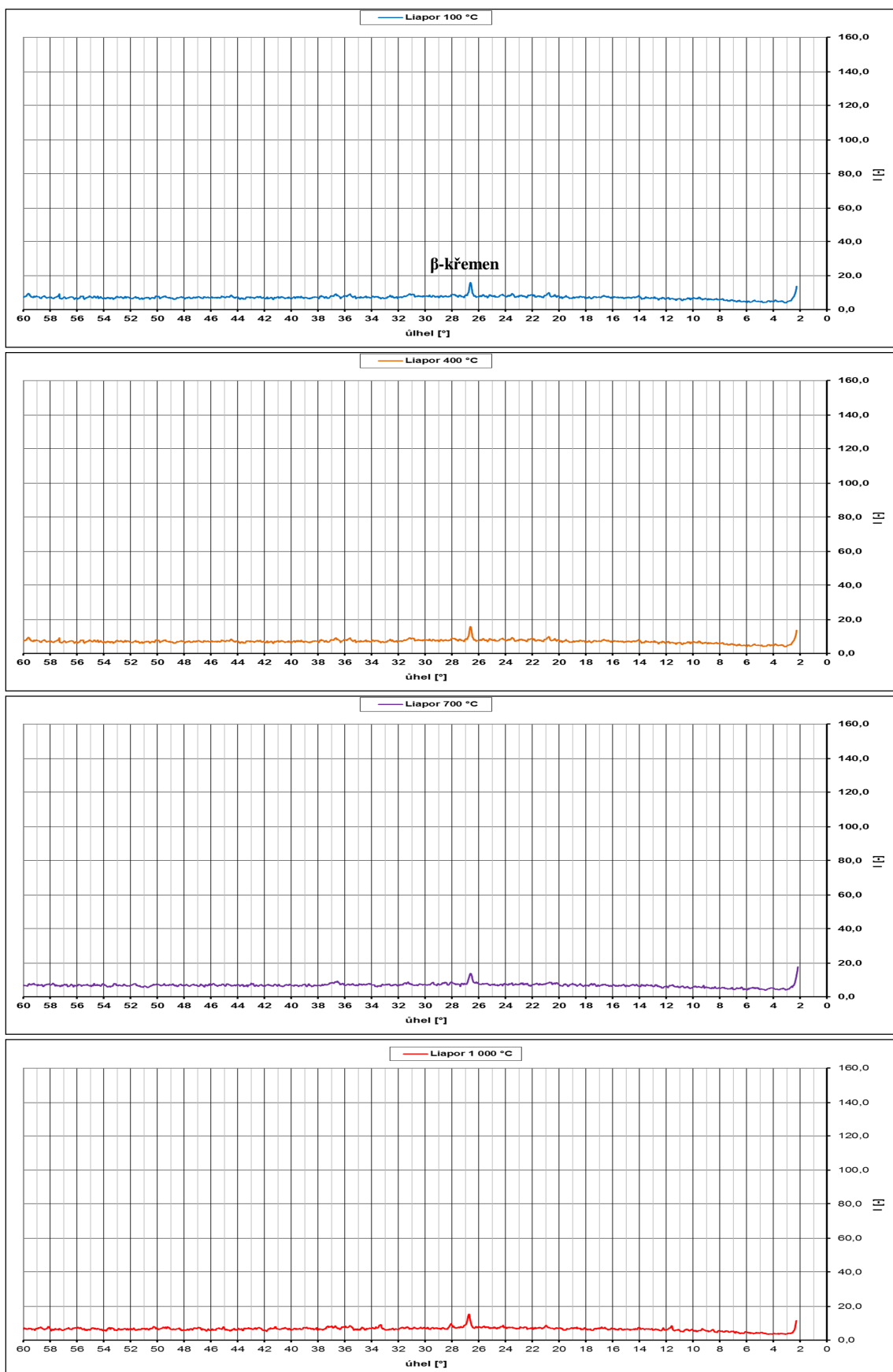
Graf č. 11: Rentgenogramy recyklovaného kameniva po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C



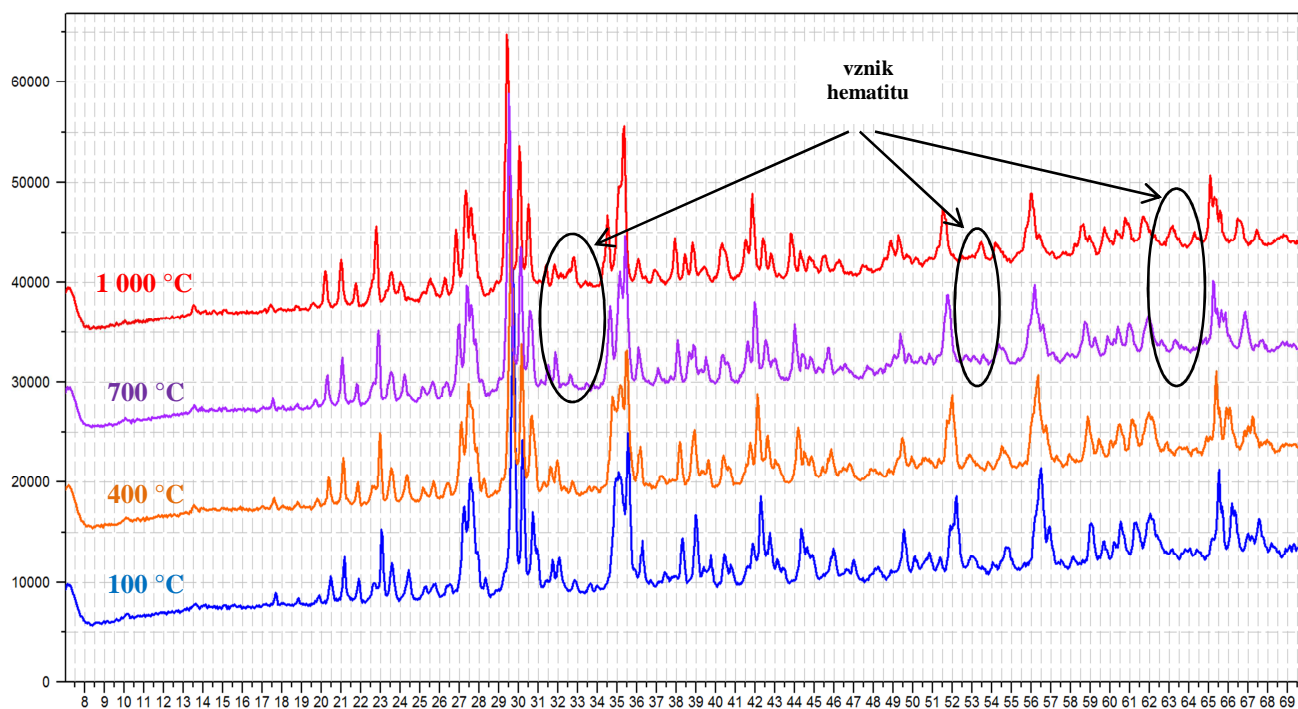
Graf č. 12: Rentgenogramy sbalkovaného popílku po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C



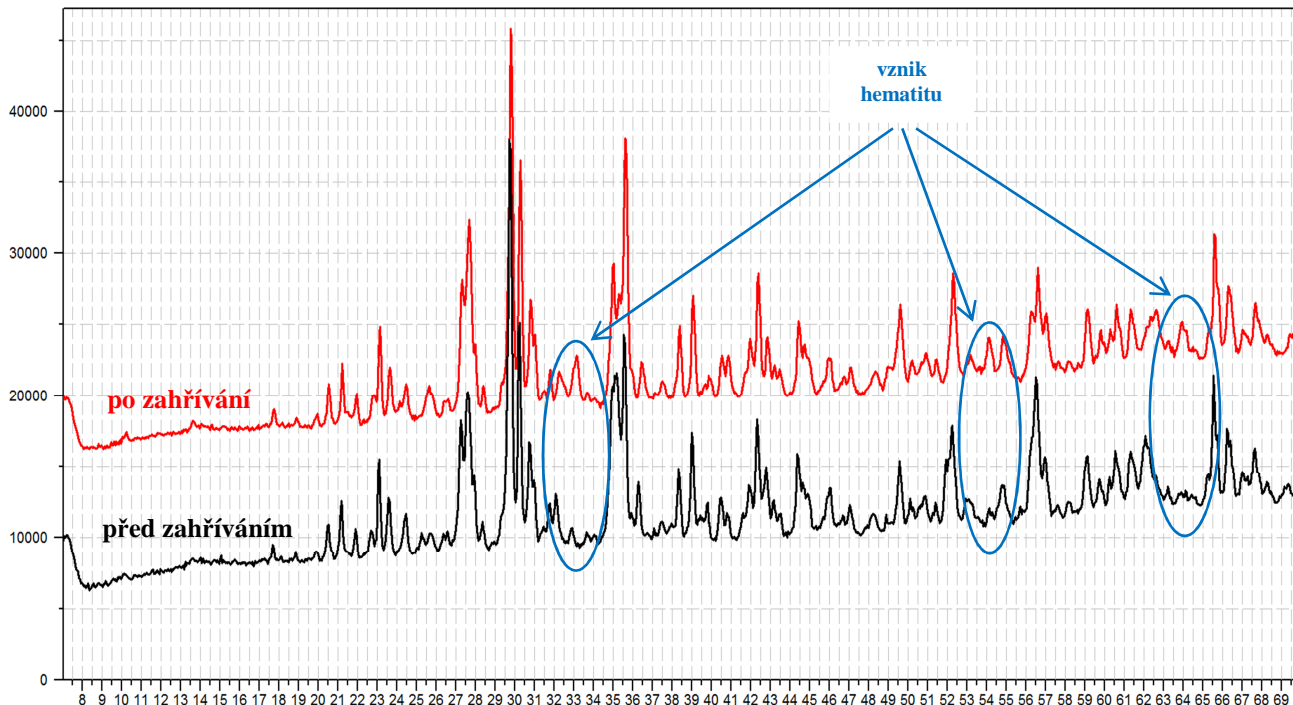
Graf č. 13: Rentgenogramy kameniva Bělčice po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C



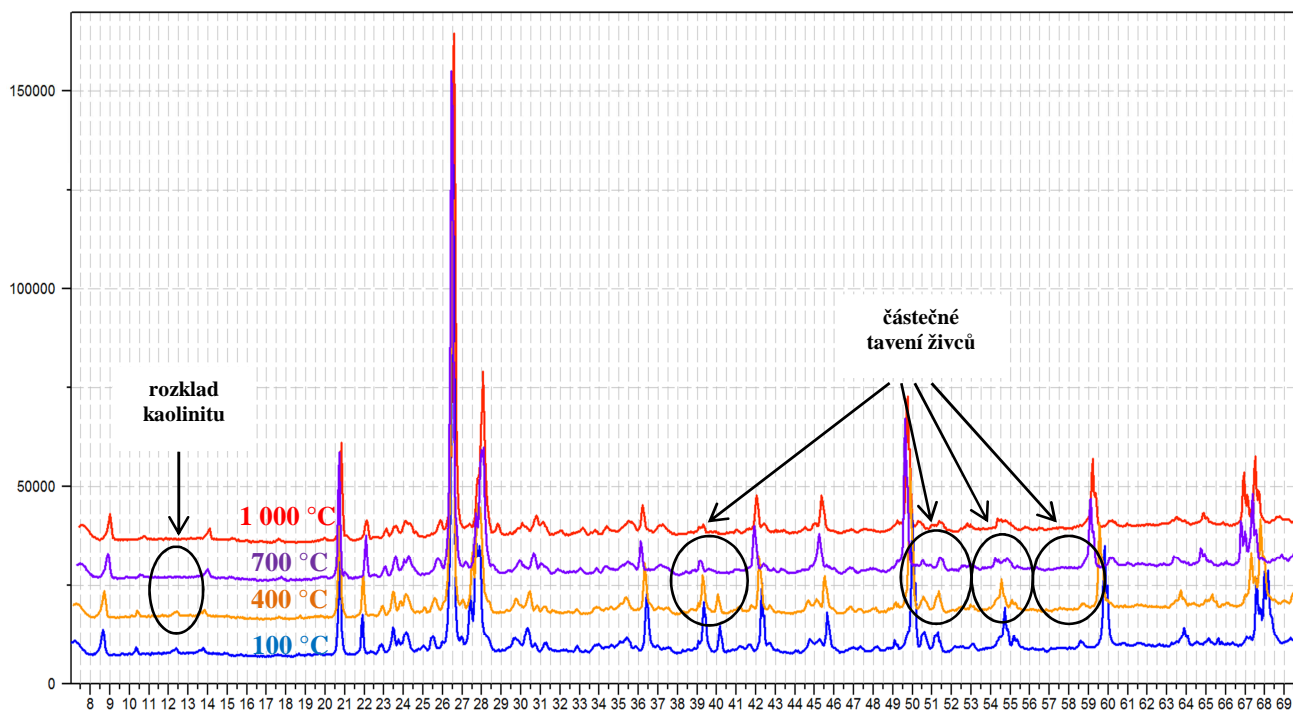
Graf č. 14: Rentgenogramy kameniva Liapor po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C



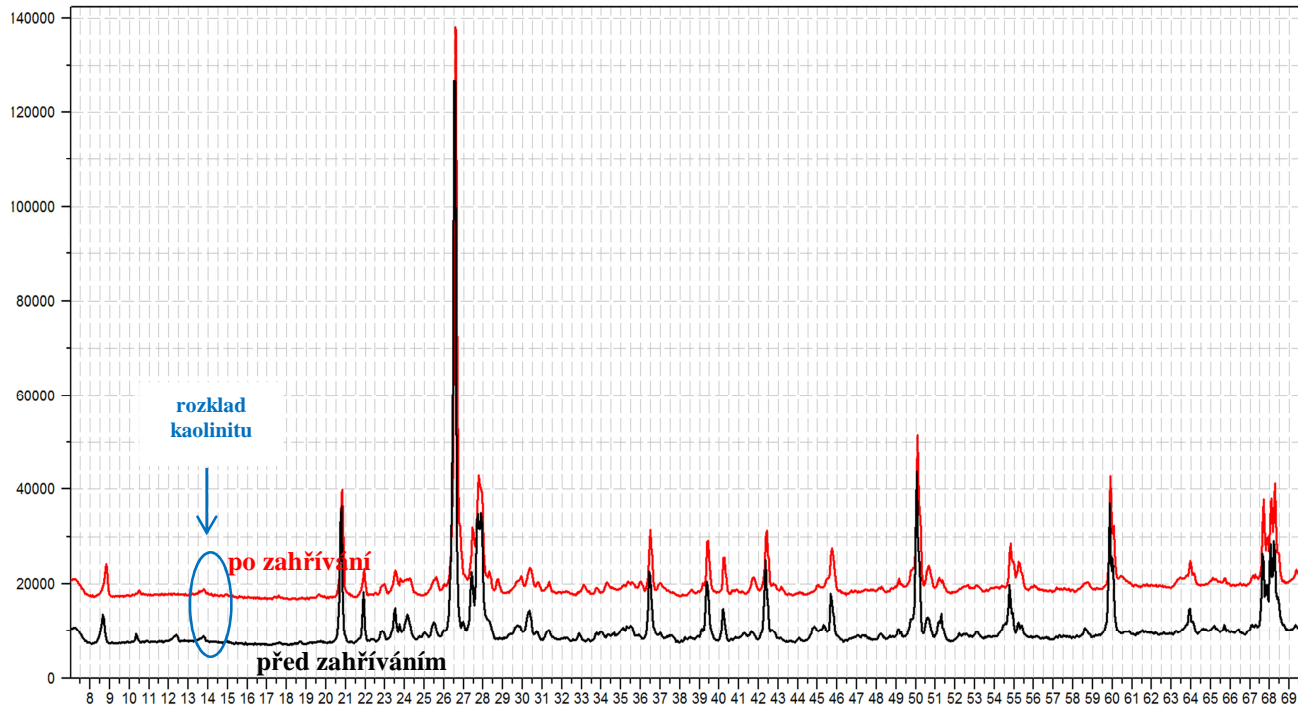
Graf č. 15: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Bílčice při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C (jeden vzorek zahříváný kontinuálně)



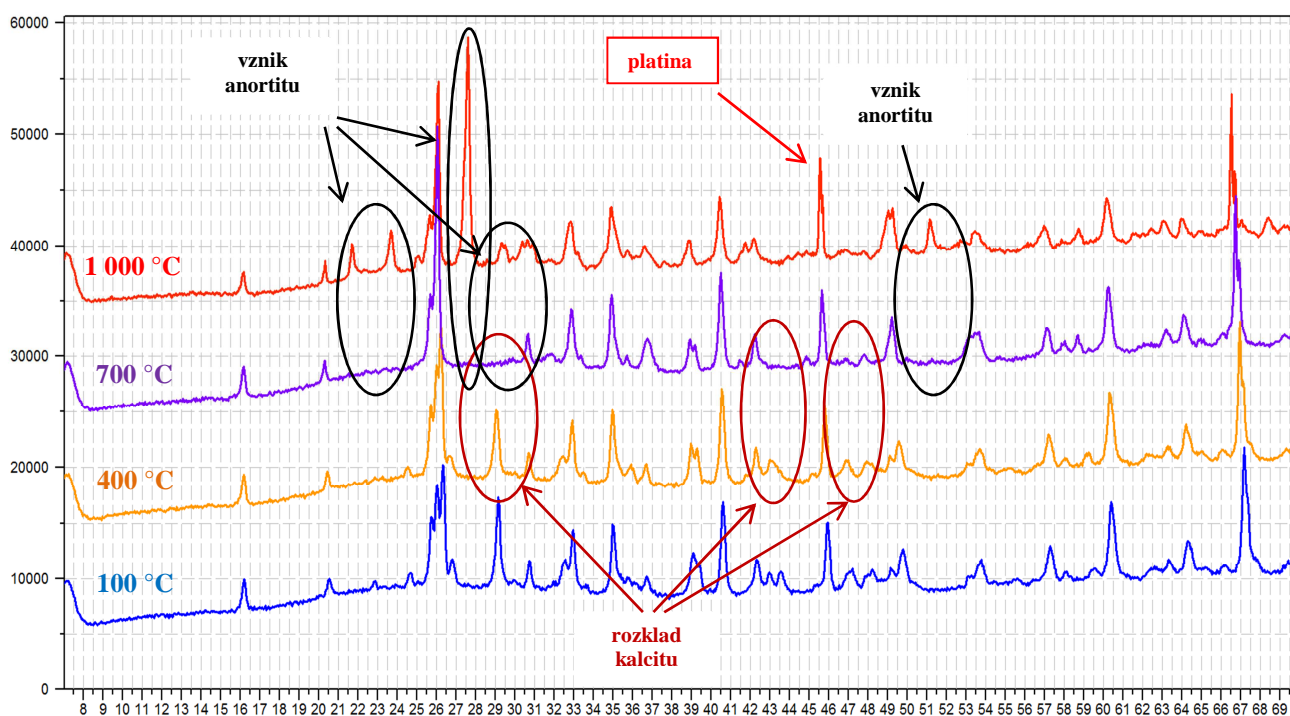
Graf č. 16: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Bílčice před a po kontinuálním zahřívání



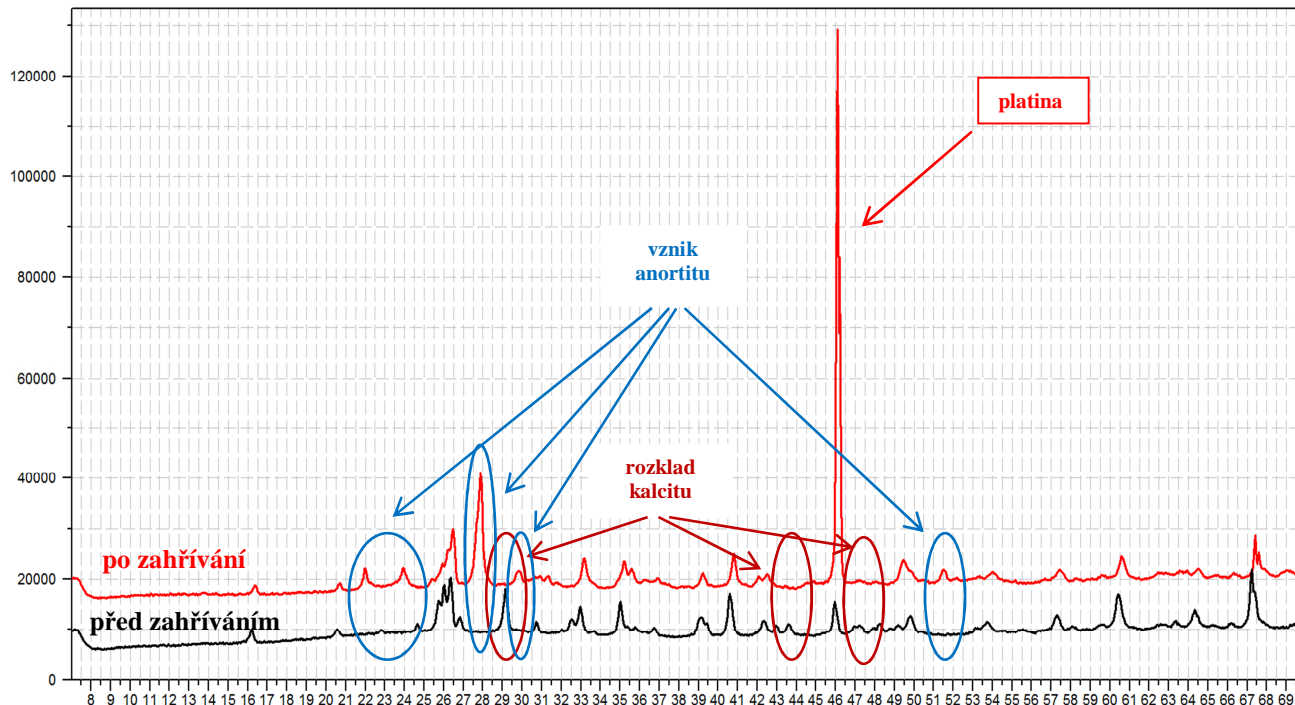
Graf č. 17: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Lomnička při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C (jeden vzorek zahříváný kontinuálně)



Graf č. 18: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Lomnička před a po kontinuálním zahřívání



Graf č. 19: Souhrnně zpracované rentgenogramy sbalkovaného popílku při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C (jeden vzorek zahříváný kontinuálně)



Graf č. 20: Souhrnně zpracované rentgenogramy sbalkovaného popílku před a po kontinuálním zahřívání

5.3.2 Etapa II – část A

V této části experimentálních prací byla pro výrobu zkušebních vzorků použita receptura označená II (viz Tab. č. 34). Vzhledem k tomu, že v této části etapy šlo především o ověření chování a působení vláken v jednotlivých teplotních stupních, byla použita běžná receptura s portlandským cementem a běžně dostupným kamenivem. V této fázi tedy nebyl proveden speciální výběr jednotlivých složek betonu.

Tab. č. 34: Receptura II zatěžovaného betonu Etapy II – část A

složka	kg/m ³
CEM I 42,5 R - Mokrý	350
kamenivo 8 – 16 mm Olbramovice	928
kamenivo 0 – 4 mm Žabčice	894
voda (w = 0,55)	194
plastifikátor ChrysoFluid Optima 206	2,3
polypropylenová vlákna Fibrin 615	2,0

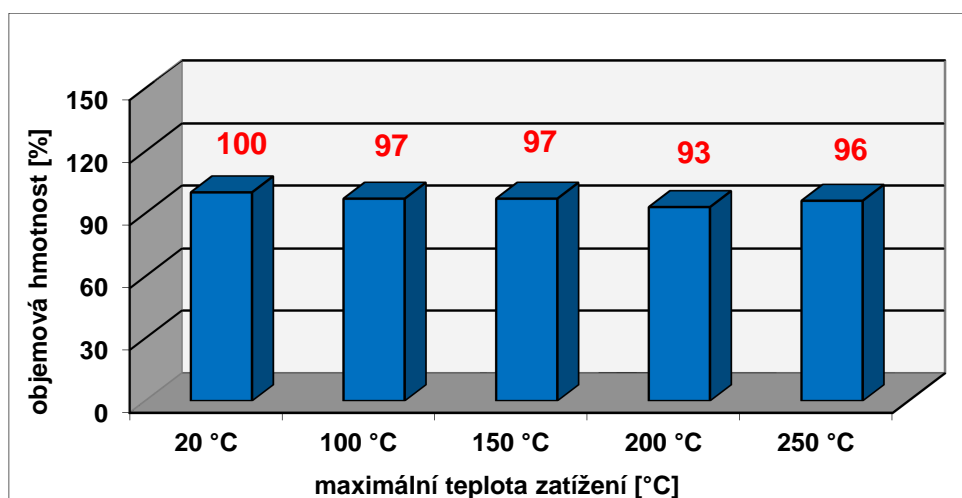
Cílem prací bylo sledování změn fyzikálně-mechanických vlastností zatěžovaného betonu v závislosti na stupni teplotního zatížení a sledování změn polypropylenových vláken při teplotním zatížení v oblasti teploty tání a změn v pórové struktuře betonu. Zatěžování probíhalo v pěti teplotních stupních: 20 °C (normové uložení), 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, vždy s izotermickou výdrží 24 hodin. Po vychladnutí byly vzorky podrobeny testování fyzikálně-mechanických vlastností a sledování změn na mikroskopickém rozhraní.

Objemová hmotnost a pevnost v příčném tahu byla zjišťována na vzorcích tvaru krychle o rozměrech 150 × 150 × 150 mm. Pevnost v tahu ohybem, statický a dynamický modul pružnosti byly zjišťovány na vzorcích tvaru trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm. Pevnost v tlaku byla zjišťována na zlomcích po stanovení pevnosti v tahu ohybem trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm. Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu byla zjišťována pomocí odtrhových zkoušek na zlomcích krychlí po stanovení pevnosti v příčném tahu.

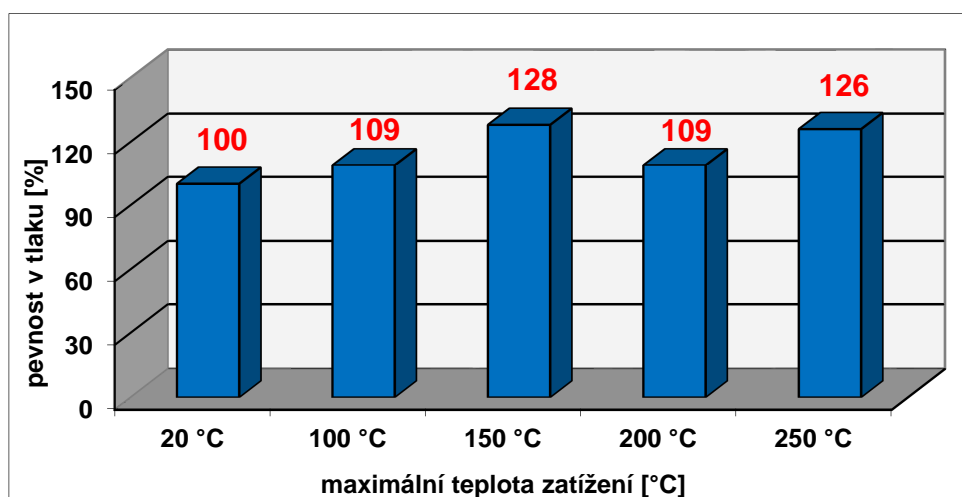
Výsledky fyzikálně – mechanických vlastností jsou uvedeny níže, viz Tab. č. 35 a graficky zpracované v Graf č. 21 – Graf č. 28.

Tab. č. 35: Výsledky fyzikálně – mechanických vlastností vzorků Etapy II – část A

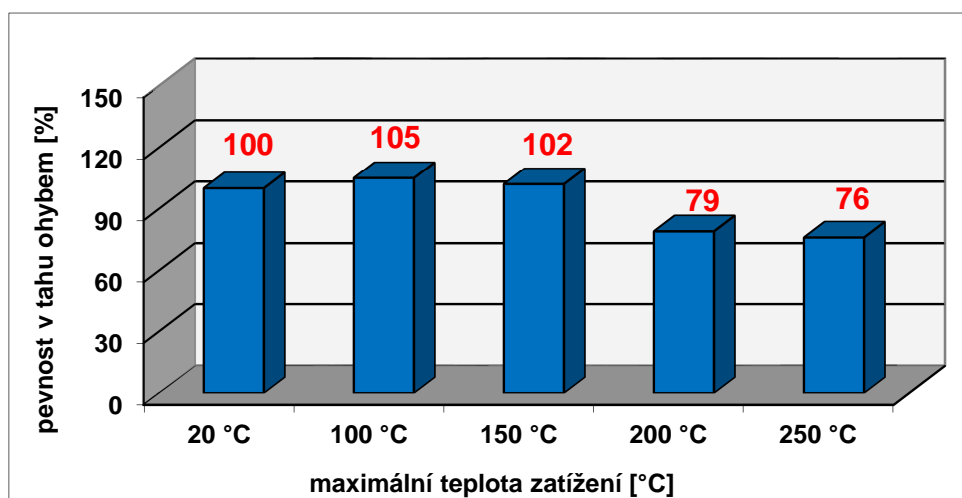
teplotní zatížení	objemová hmotnost [kg/m ³]	pevnost v tlaku [MPa]	pevnost v tahu ohybem [MPa]	pevnost v příčném tahu [MPa]	pevnost v tahu povrchových vrstev betonu [MPa]	statický modul pružnosti [MPa]	dynamický modul pružnosti [MPa]
20 °C	2 010	21,5	4,2	1,80	2,8	23 000	28 262
100 °C	1 940	23,5	4,4	1,85	2,6	26 000	27 586
150 °C	1 940	27,5	4,3	1,90	2,2	22 500	30 018
200 °C	1 870	23,5	3,3	1,75	1,5	20 000	26 149
250 °C	1 930	27,0	3,2	1,80	1,8	25 000	31 523



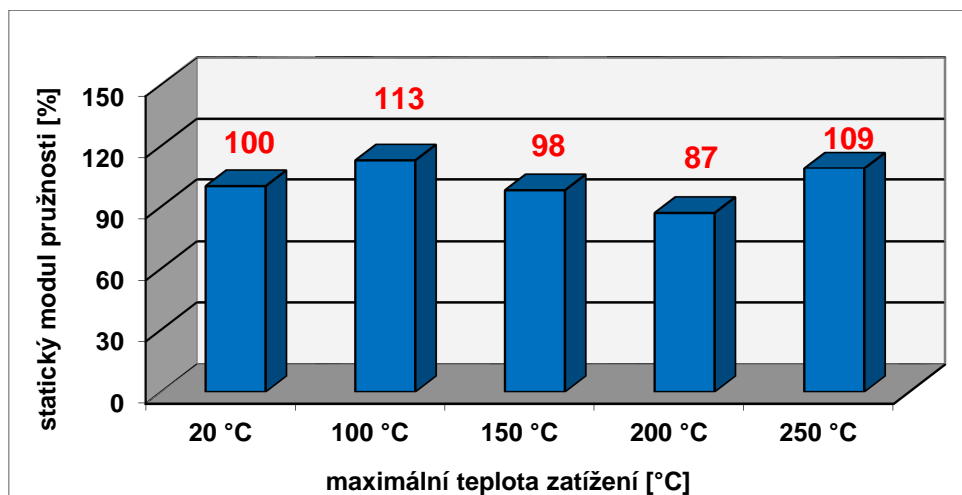
Graf č. 21: Procentuální porovnání objemových hmotností po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



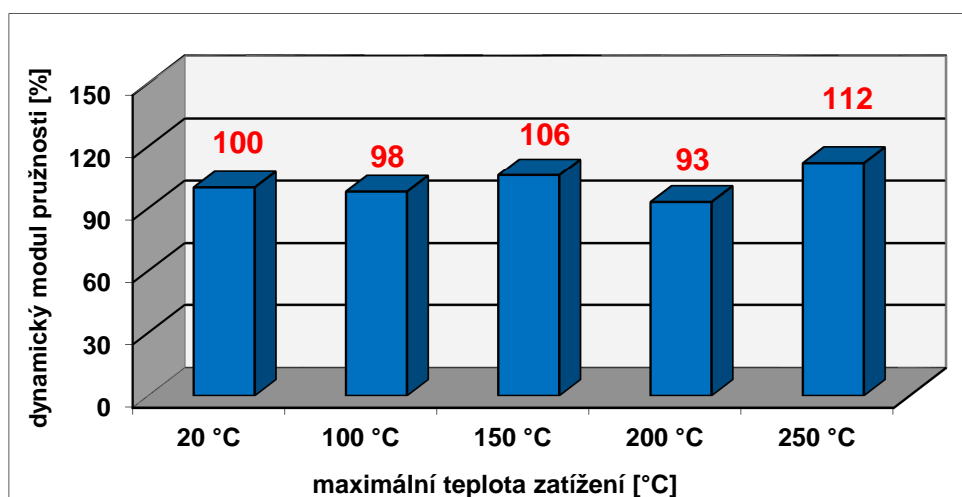
Graf č. 22: Procentuální porovnání pevnosti v tlaku po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



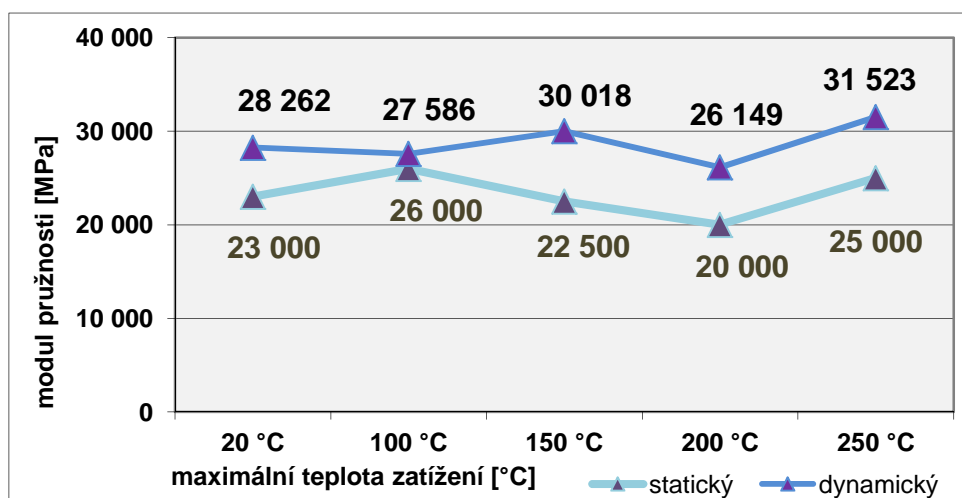
Graf č. 23: Procentuální porovnání pevnosti v tahu ohybem po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



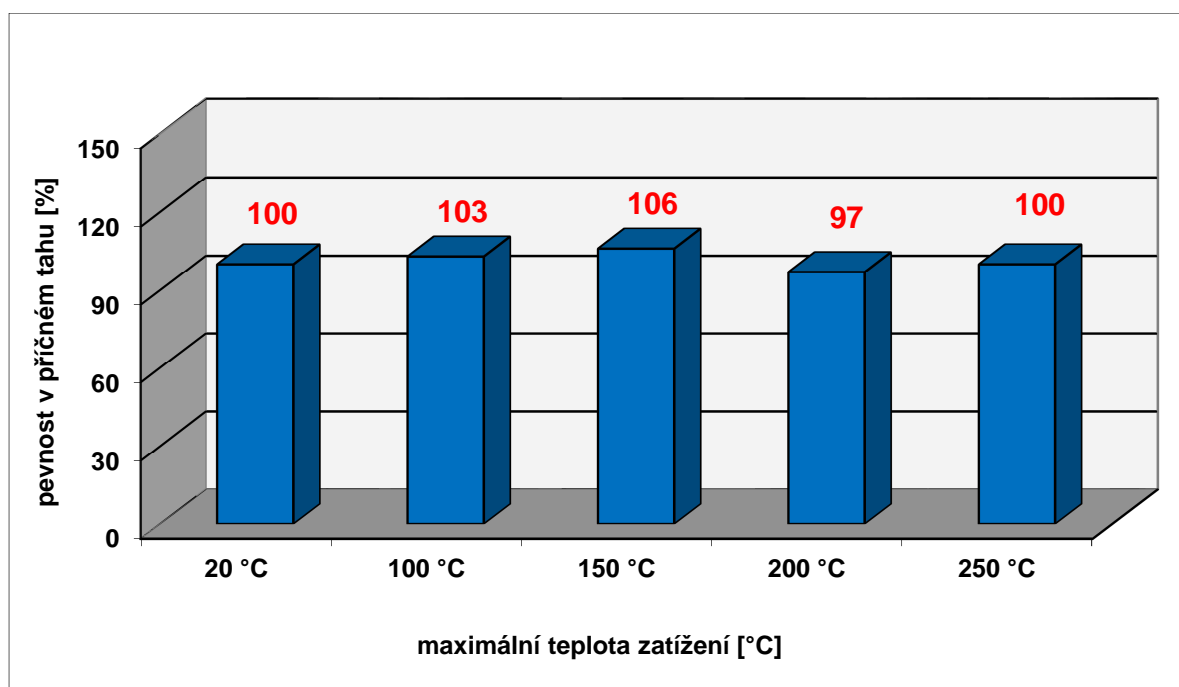
Graf č. 24: Procentuální porovnání statického modulu pružnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



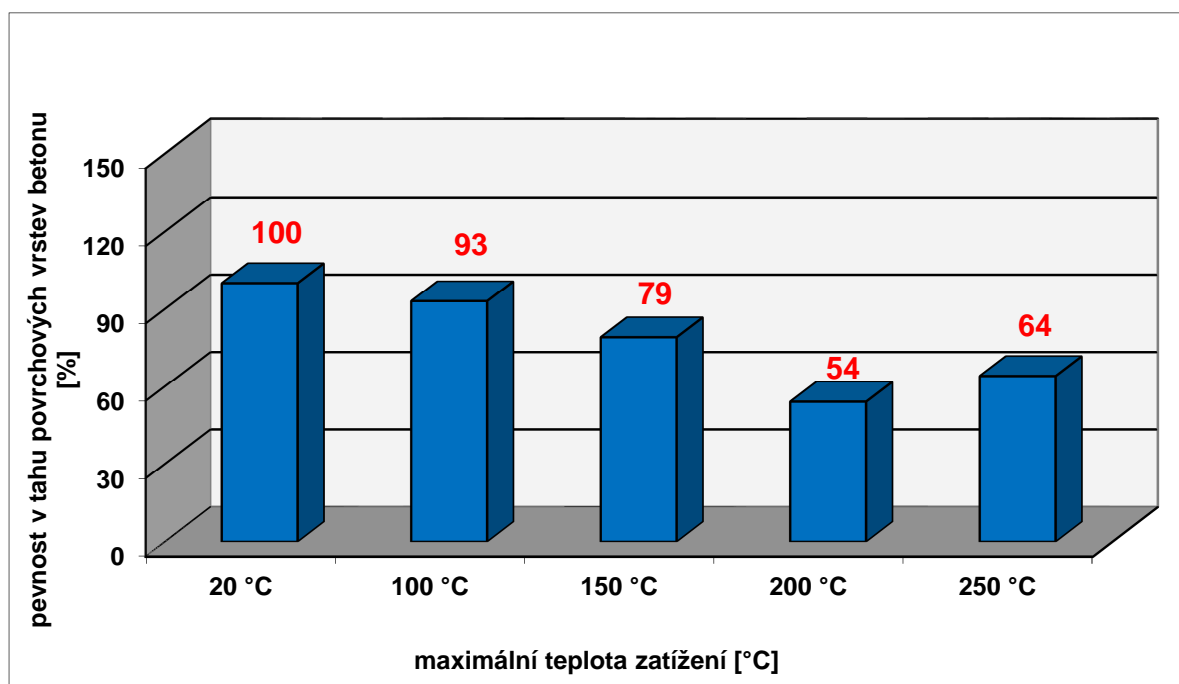
Graf č. 25: Procentuální porovnání dynamického modulu pružnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



Graf č. 26: Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



Graf č. 27: Procentuální porovnání pevnosti v příčném tahu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



Graf č. 28: Procentuální porovnání pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A

Stanovení fyzikálně - mechanických vlastností bylo doplněno o vizuální popis povrchu zatěžovaných vzorků, který byl proveden na vzorcích tvaru trámů o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm. Popis povrchu vzorků je uveden v Tab. č. 36.

Tab. č. 36: Popis vzorků po stupních teplotního zatížení, sledováno vizuálně – povrch vzorků Etapy II – část A

teplotní zatížení	vlákna	povrch
20 °C	- bez porušení, jasně viditelná	- bez poruch
100 °C	- bez porušení, jasně viditelná	- bez poruch
150 °C	- vlákna “vyhořelá”, nebyla zjištěna	- bez poruch
200 °C	- vlákna “vyhořelá”, nebyla zjištěna	- bez poruch - jemně zežloutlá barva
250 °C	- vlákna “vyhořelá”, nebyla zjištěna	- bez poruch - jemně zežloutlá barva

Po zkoušce pevnosti v tahu ohybem na dvou vzorcích tvaru trámčů o rozměrech 100 × 100 × 400 mm byly ze zlomků připraveny výřezy o rozměru 20 × 100 × 100 mm a to po jednom kusu pro každý teplotní stupeň. Povrch těchto výřezů byl speciálně vyleštěn pro zkoušku stanovení množství, velikosti a distribuce vzduchových pórů v betonu, tzv. Spacing Factor. Výsledky stanovení množství, velikosti a distribuce vzduchových pórů v betonu jsou uvedeny v Tab. č. 37.

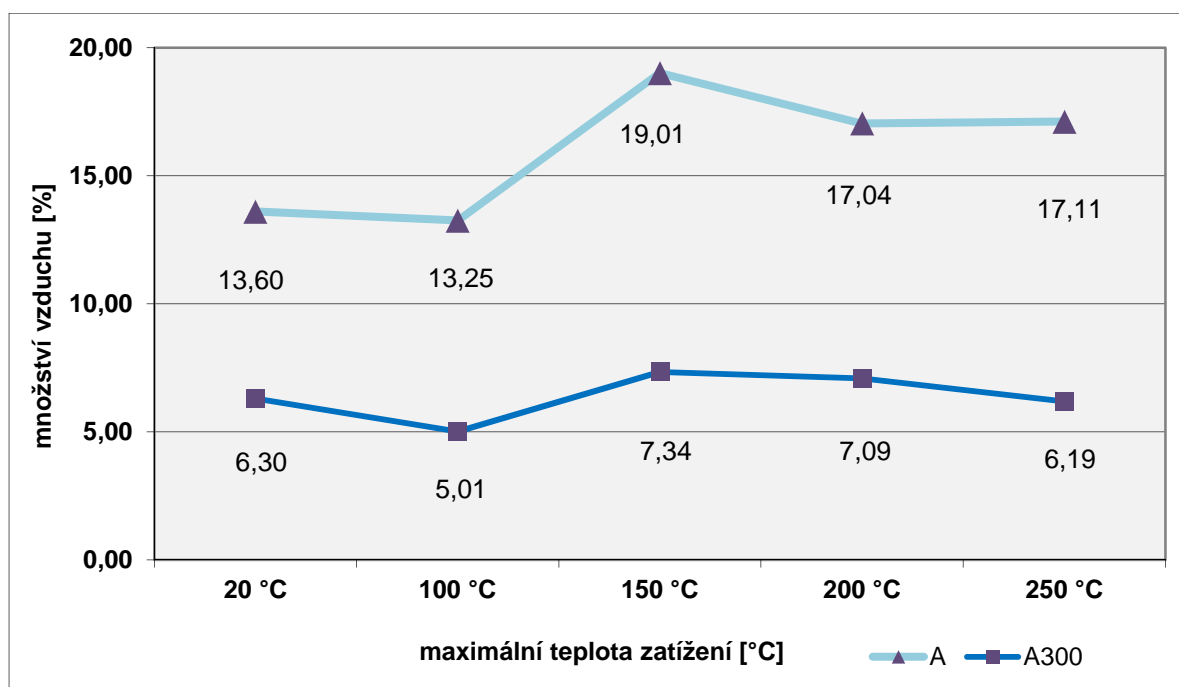
Tab. č. 37: Výsledky stanovení množství, velikosti a distribuce vzduchových pórů vzorků Etapy II – část A

teplotní zatížení	A [%]	A300 [%]	L [%]	zaznamenaný počet tětív ve třídě [μm]			
				0 – 10	15 – 20	25 – 30	35 – 40
20 °C	13,60	6,30	0,08	1	87	100	91
100 °C	13,25	5,01	0,10	3	39	65	56
150 °C	19,01	7,34	0,07	11	34	69	75
200 °C	17,04	7,09	0,08	7	34	82	54
250 °C	17,11	6,19	0,08	9	29	65	61

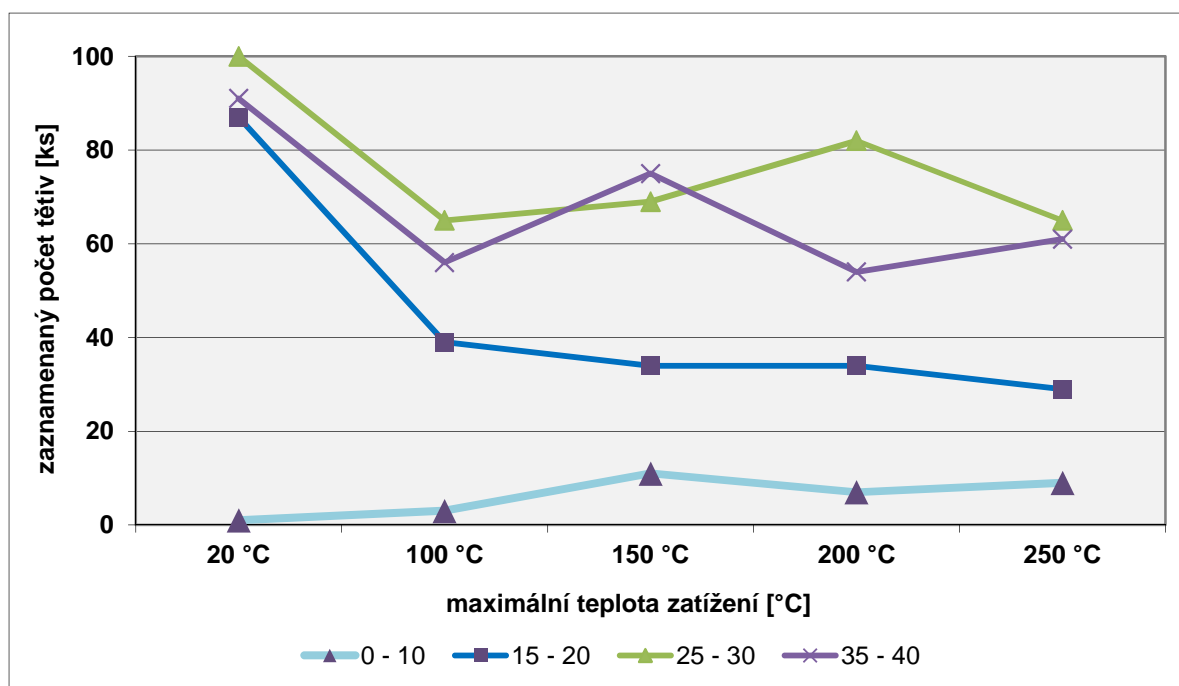
A celkový obsah vzduchu

A300 obsah mikroskopického vzduchu

L součinitel prostorového uložení vzduchových pórů



Graf č. 29: Porovnání celkového množství vzduchu a množství mikroskopického vzduchu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A



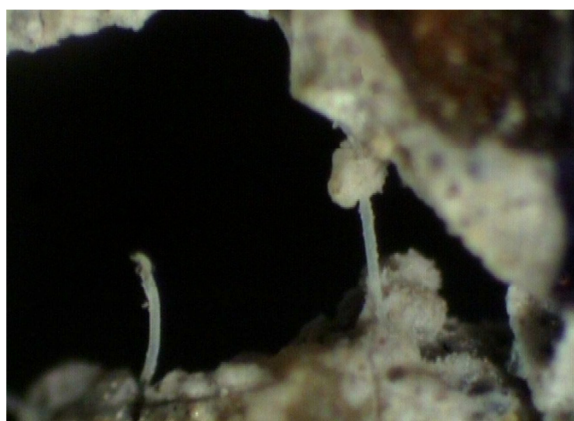
Graf č. 30: Porovnání zaznamenaného počtu tětív prvních čtyř tříd po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A

Po stanovení tzv. Spacing Factoru bylo také provedeno mikroskopické pozorování v příčném řezu vzorku se zaměřením na sledování vláken (tvar vlákna, množství vyprcháání vlákna), mikrostruktury kameniva – porušení, mikrostruktury cementového tmele (množství

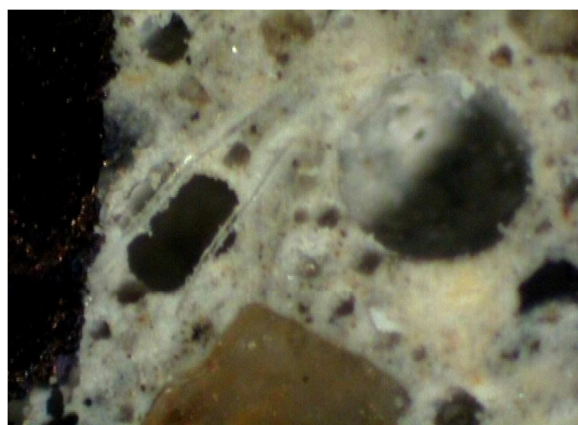
trhlin, jejich velikost a tvar) pomocí optického a elektronového scanovacího mikroskopu, viz Tab. č. 38. Fotodokumentace pořízená z optického mikroskopu je zobrazena na Obr. č. 88 – Obr. č. 97. Fotodokumentace pořízená z elektronového scanovacího mikroskopu je zobrazena na Obr. č. 98 – Obr. č. 109.

Tab. č. 38: Popis vzorků po stupních teplotního zatížení, sledováno mikroskopicky (zvětšení 200 ×) – v řezu vzorků Etapy II – část A

teplotní zatížení	vlákna	cementový tmel	kamenivo
20 °C	- bez porušení, jasně viditelná	- bez poruch	- bez poruch
100 °C	- bez porušení, jasně viditelná	- bez poruch	- bez poruch
150 °C	- “vyhořelá” na povrchu, v jádru vzorku jen lokálně zdeformovaná	- bez poruch	- bez poruch
200 °C	- “vyhořelá” na povrchu i v jádru vzorku	- lokálně mikrotrhlínky	- bez poruch
250 °C	- “vyhořelá” na povrchu i v jádru vzorku	- lokálně mikrotrhlínky	- bez poruch



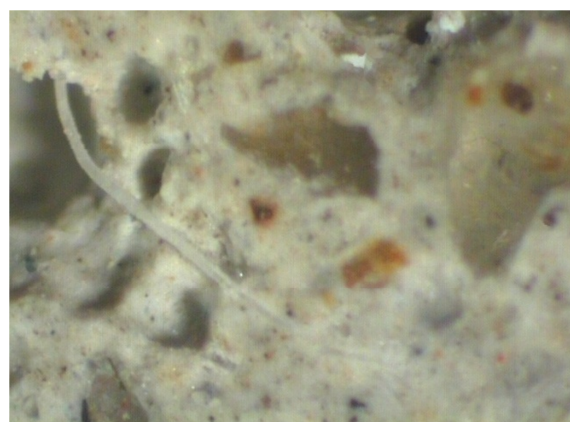
Obr. č. 88: Vlákna bez poškození po 20 °C



Obr. č. 89: Vlákna bez poškození po 20 °C



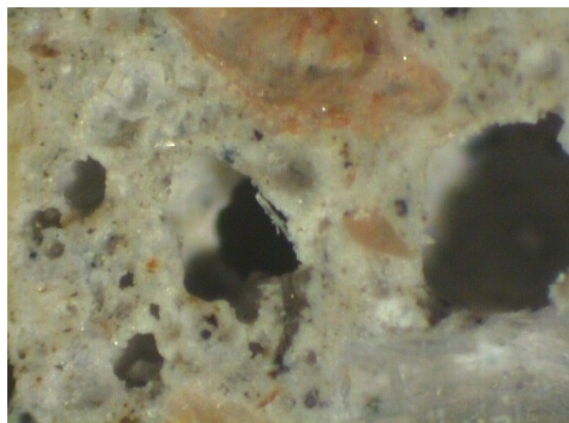
Obr. č. 90: Vlákna bez poškození po 100 °C



Obr. č. 91: Vlákna bez poškození po 100 °C



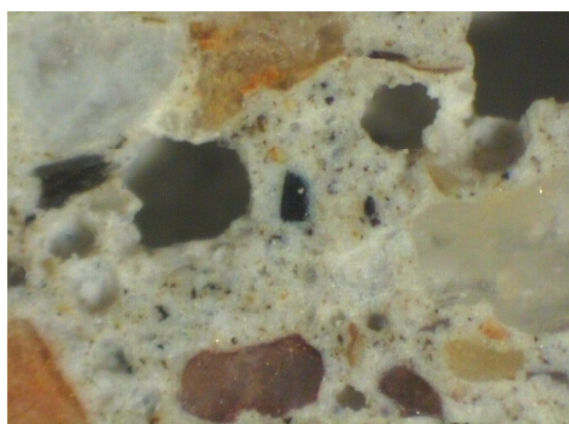
Obr. č. 92: Viditelně zdeformovaná vlákna po 150 °C



Obr. č. 93: Mikrostruktura bez poruch po 150 °C



Obr. č. 94: Mikrotrhlina v cementovém tmelu po 200 °C



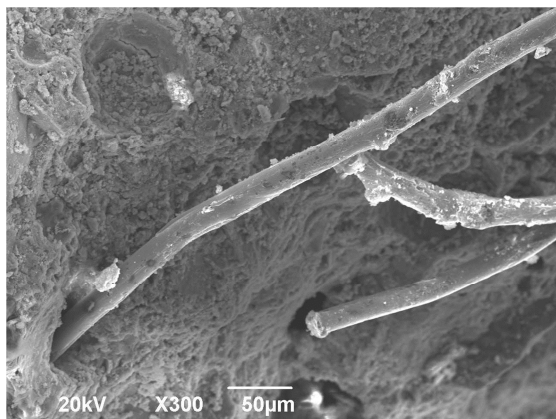
Obr. č. 95: Mikrostruktura bez poruch po 200 °C



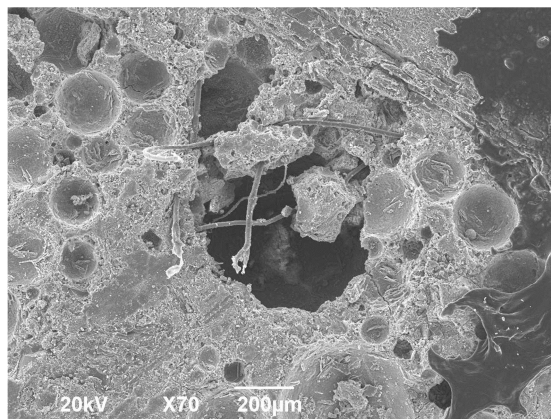
Obr. č. 96: Mikrostruktura bez poruch a bez přítomnosti vláken po 250 °C



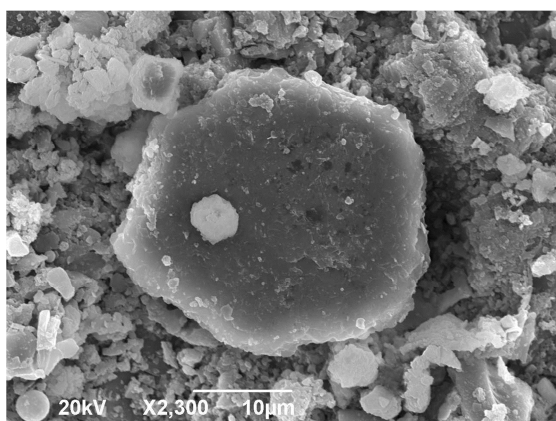
Obr. č. 97: Mikrotrhliny v cementovém tmelu po 250 °C



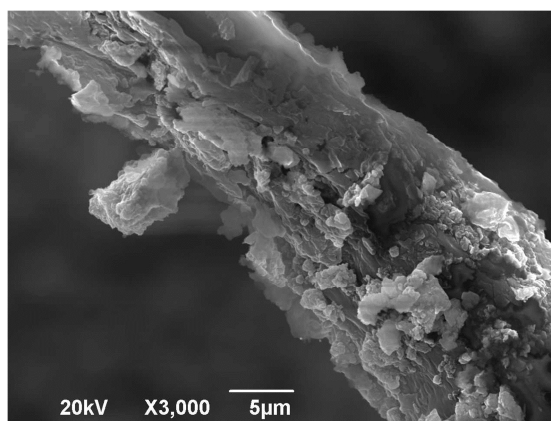
Obr. č. 98: Vlákna bez poškození po 20 °C



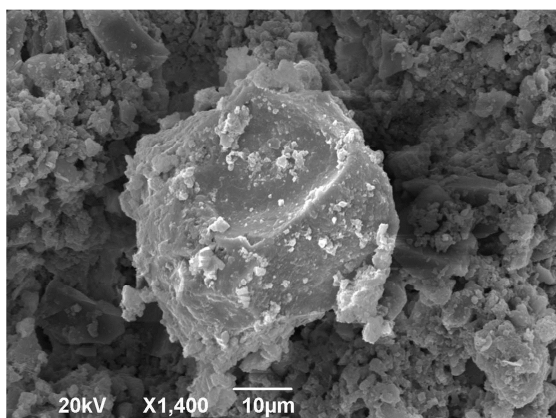
Obr. č. 99: Vlákna bez poškození po 20 °C



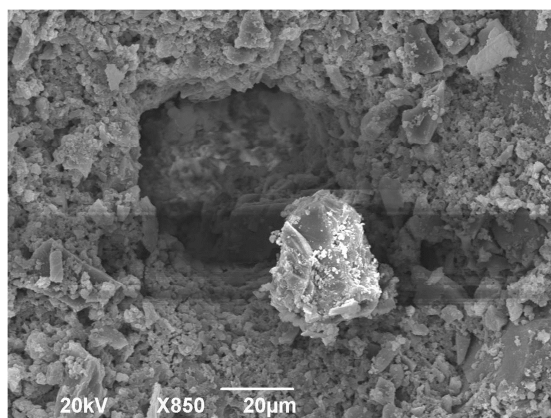
Obr. č. 100: Řez vláknem po 100 °C, bez deformace



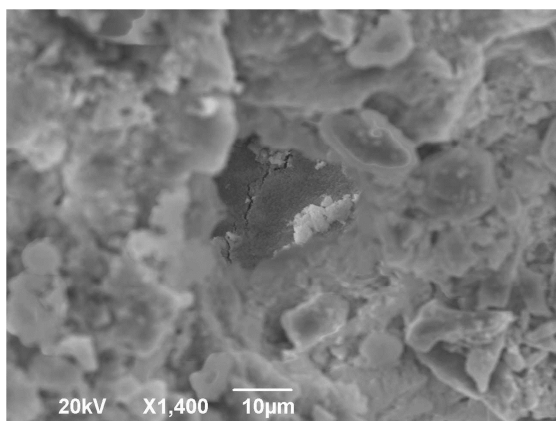
Obr. č. 101: Vzhled vlákna po 100 °C s počínající deformací



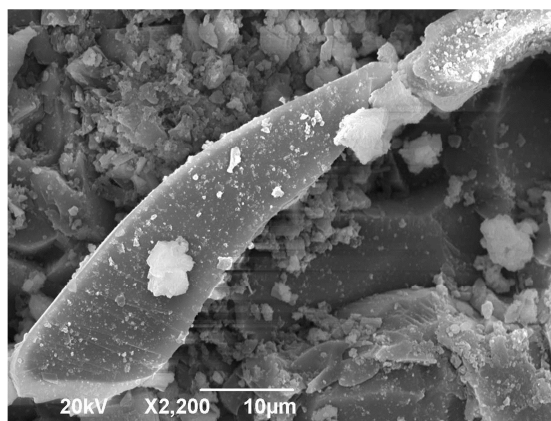
Obr. č. 102: Řez vláknem po 150 °C s počínající deformací



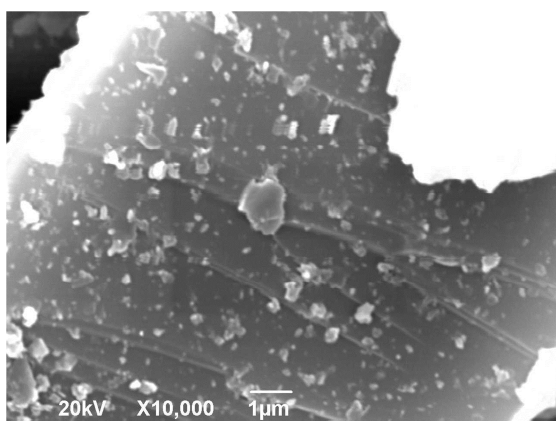
Obr. č. 103: Řez vláknem po 150 °C s rozsáhlejší deformací



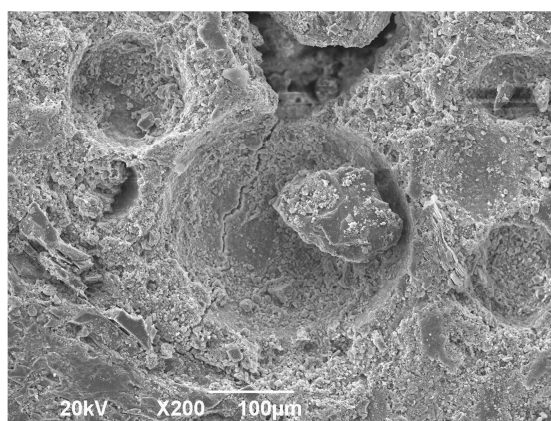
Obr. č. 104: Detail dutiny, pravděpodobně vzniklé „vyhořením“ vlákna s trhlinou v cementovém tmelu po 200 °C



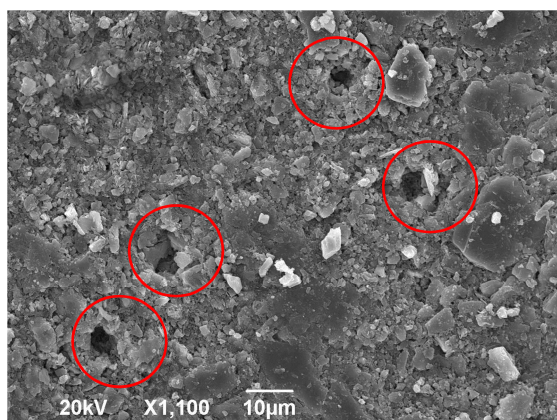
Obr. č. 105: Vzhled vlákna po 150 °C s rozsáhlejší deformací



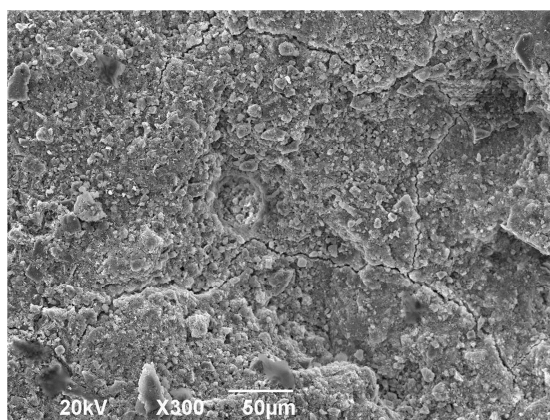
Obr. č. 106: Detail povrchu vlákna po 150 °C



Obr. č. 107: Detail trhliny v dutině cementového tmelu po 250 °C



Obr. č. 108: Detail dutin, pravděpodobně vzniklých „vyhořením“ vláken po 250 °C



Obr. č. 109: Detail sítě trhlin v cementovém tmelu po 250 °C

5.3.3 Etapa II – část B

V části B výběru vhodných vláken a ověření jejich účinnosti bylo navrženo složení jemnozrnného betonu. Jednotlivé složky směsi byly voleny již s ohledem na zvýšenou odolnost vůči vysokým teplotám, kde byl použit vysokopecní cement nižší pevnostní třídy a přírodní hutné těžené kamenivo se sníženým obsahem slídy a oxidů křemene. Základní receptura byla pro všechny směsi stejná (směs II a), jednotlivé receptury se lišily pouze v druhu použitých vláken (směs II b, II c, II d), viz Tab. č. 39.

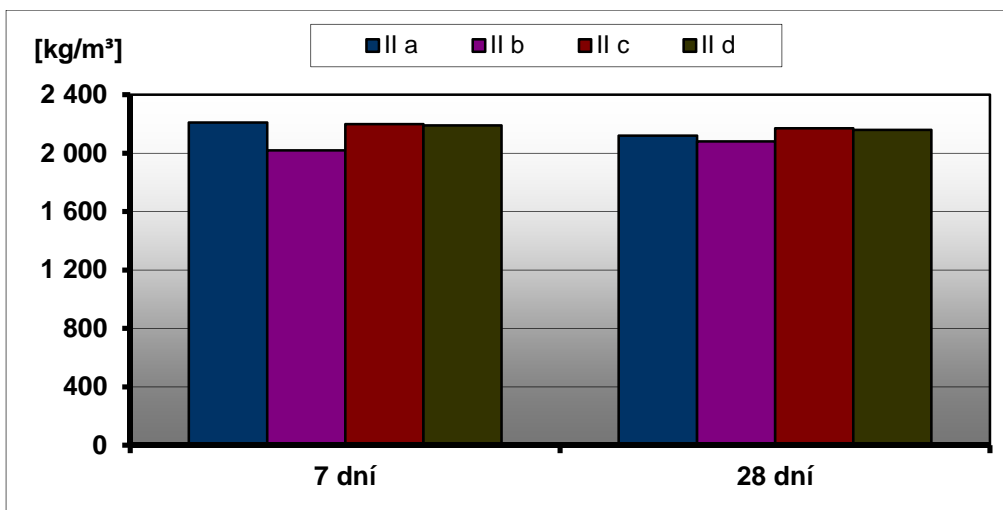
Tab. č. 39: Receptury zatěžovaného betonu Etapy II – část B

složka [kg/m^3] / směs	II a	II b	II c	II d
CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim	586			
kamenivo 0 – 4 mm Náκλο	1 758			
voda (z vodovodního řádu)	293			
polypropylenová vlákna Fibrin 615	-	2,0	-	-
skleněná vlákna Cem-FIL 60/3	-	-	2,0	-
celulózová vlákna UltraFibre 500	-	-	-	2,0

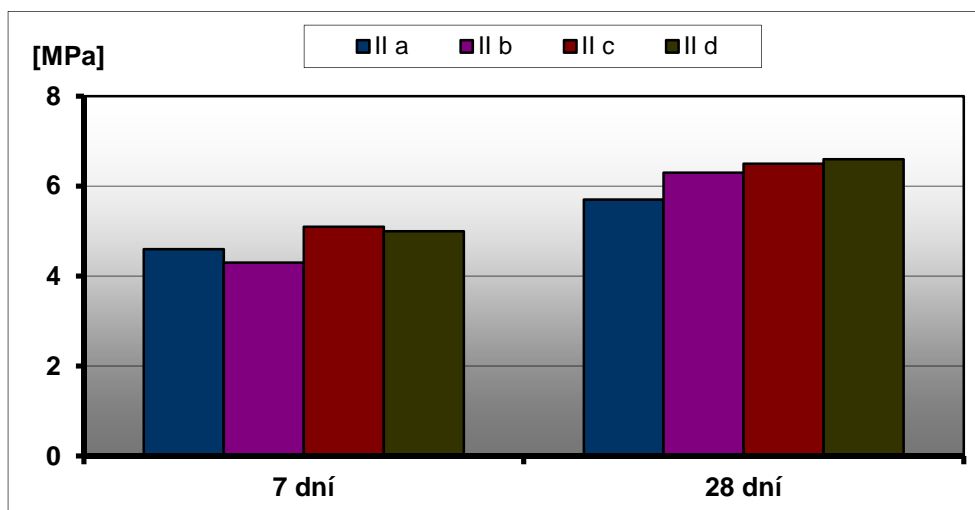
Zkušební vzorky ve tvaru trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byly podrobeny zjišťování základních fyzikálně – mechanických vlastností a to po 7 a 28 dnech od namíchání a po teplotním zatěžování na teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C a 1 000 °C. Po teplotním zatěžování byla navíc provedena detailní fotodokumentace povrchů se zaměřením na sledování vzniklých trhlin a velikosti jejich rozevření.

Tab. č. 40: Přehled výsledků fyzikálně – mechanických vlastností po 7 a 28 dnech od namíchání směsí Etapy II – část B

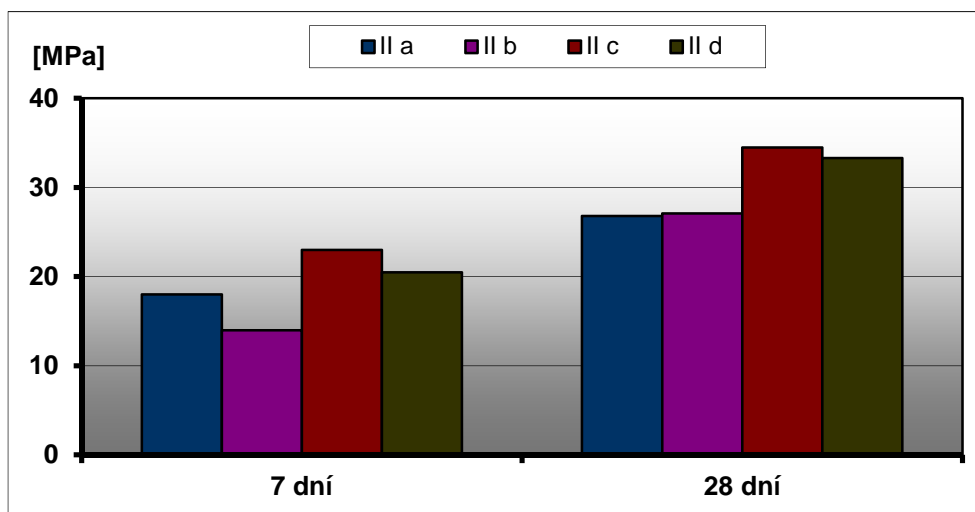
označení směsi	objemová hmotnost [kg/m^3]		pevnost v tahu za ohybu [MPa]		pevnost v tlaku [MPa]	
	7 dní	28 dní	7 dní	28 dní	7 dní	28 dní
II a	2 210	2 120	4,6	5,7	18,0	26,8
II b	2 020	2 080	4,3	6,3	14,0	27,1
II c	2 200	2 170	5,1	6,5	23,0	34,5
II d	2 190	2 160	5,0	6,6	20,5	33,3



Graf č. 31: Grafický přehled výsledků objemových hmotností vzorků Etapy II – část B



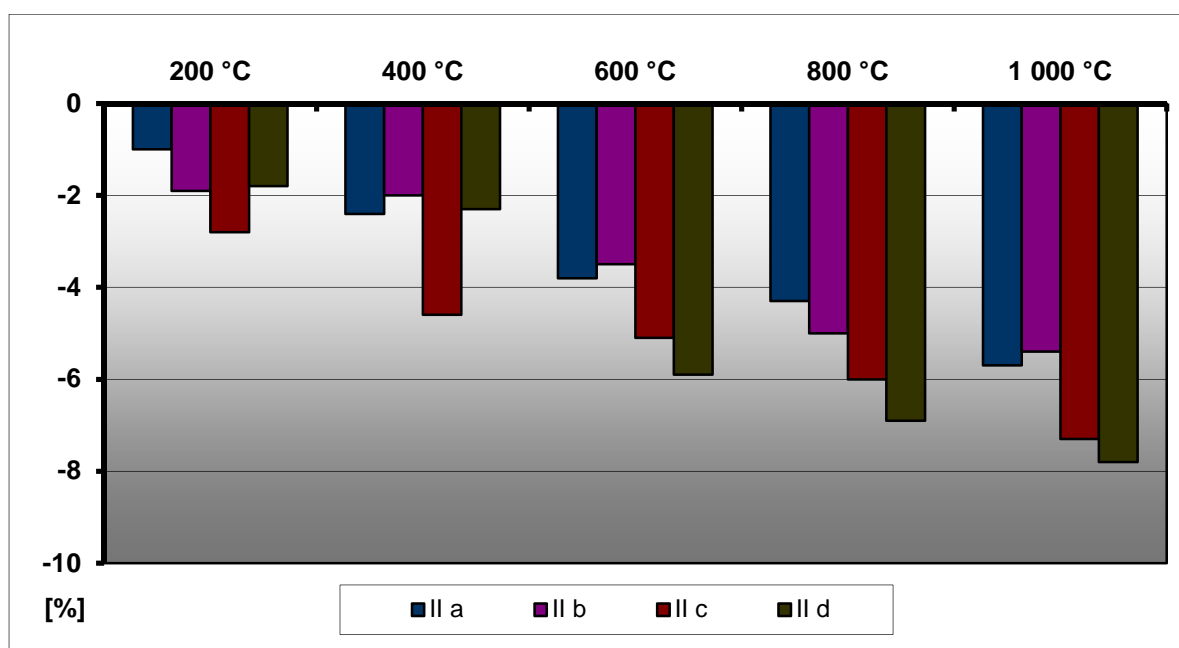
Graf č. 32: Grafický přehled výsledků časových pevností v tahu za ohybu vzorků Etapy II – část B



Graf č. 33: Grafický přehled výsledků časových pevností v tlaku vzorků Etapy II – část B

Tab. č. 41: Přehled výsledků změny objemové hmotnosti po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B

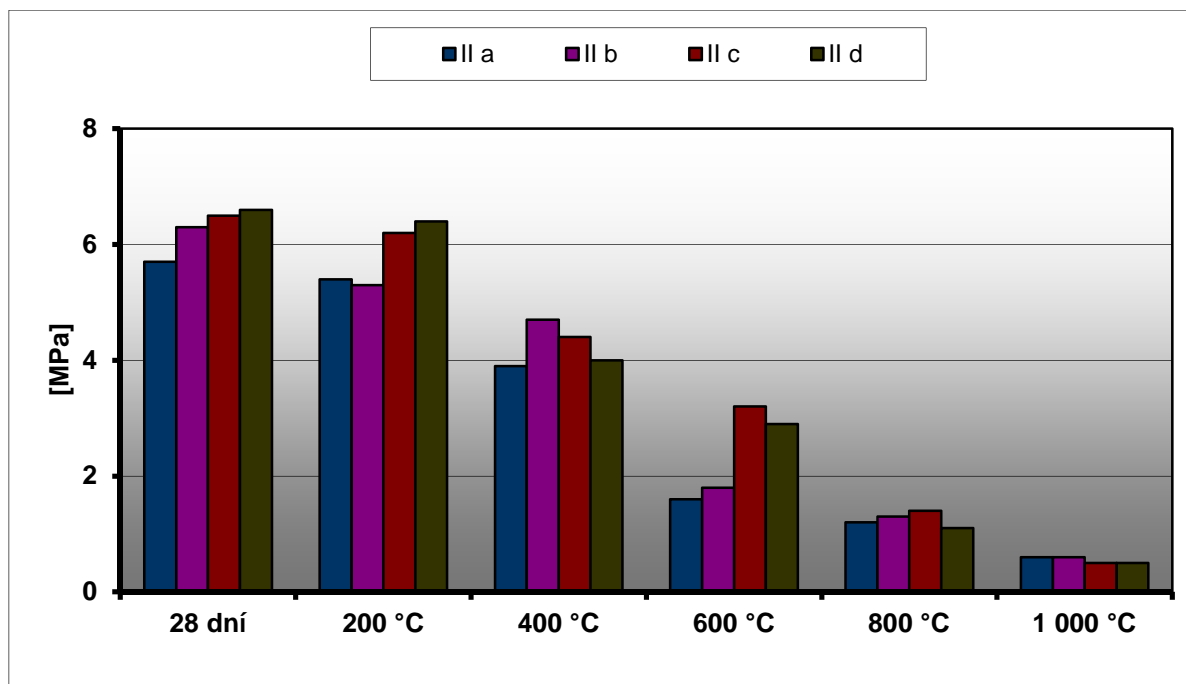
označení směsi	teplotní zatížení [°C]	objemová hmotnost [kg/m ³]		
		před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]
II a	200	2 070	2 050	- 1,0
	400	2 100	2 050	- 2,4
	600	2 090	2 010	- 3,8
	800	2 090	2 000	- 4,3
	1 000	2 110	1 990	- 5,7
II b	200	2 080	2 040	- 1,9
	400	2 020	1 980	- 2,0
	600	2 010	1 940	- 3,5
	800	2 020	1 920	- 5,0
	1 000	2 030	1 920	- 5,4
II c	200	2 150	2 090	- 2,8
	400	2 180	2 080	- 4,6
	600	2 140	2 030	- 5,1
	800	2 170	2 040	- 6,0
	1 000	2 190	2 030	- 7,3
II d	200	2 180	2 140	- 1,8
	400	2 150	2 100	- 2,3
	600	2 210	2 080	- 5,9
	800	2 180	2 030	- 6,9
	1 000	2 190	2 020	- 7,8



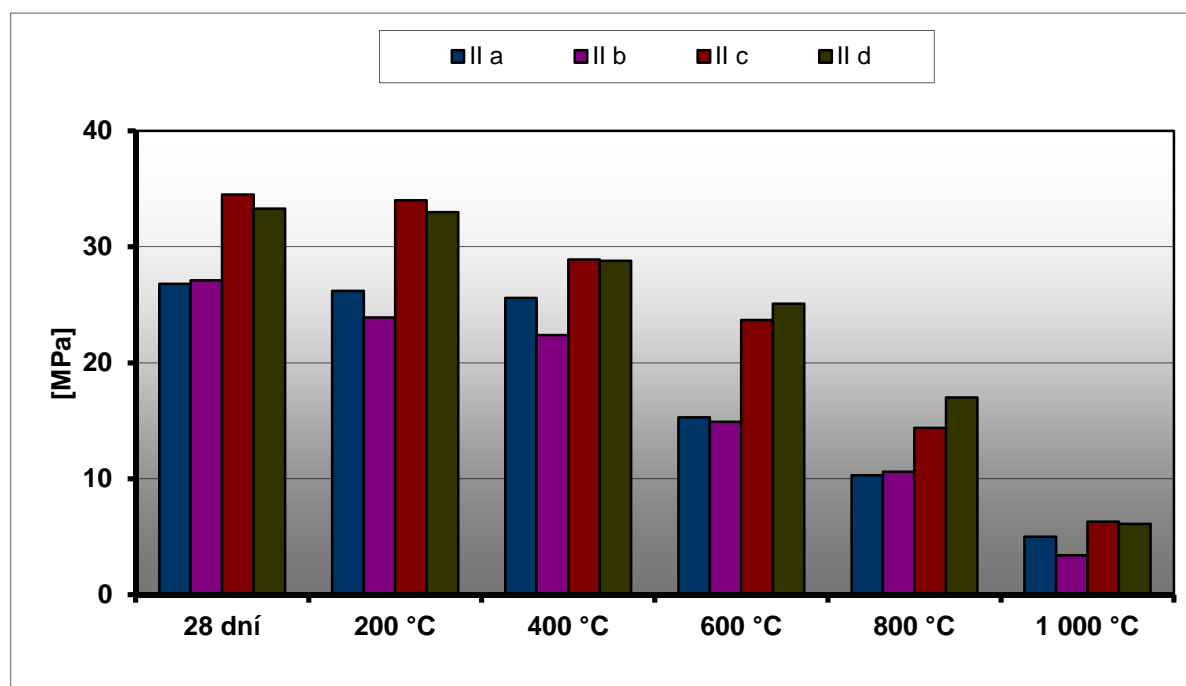
Graf č. 34: Grafický přehled poklesů objemových hmotností po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B

Tab. č. 42: Přehled změny fyzikálně – mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků
Etapy II – část B

označení směsi	teplotní zatížení [°C]	pevnost v tahu za ohybu [MPa]			pevnost v tlaku [MPa]		
		před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]	před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]
II a	200	5,7	5,4	- 5,3	26,8	26,2	- 2,2
	400		3,9	- 31,6		25,6	- 4,5
	600		1,6	- 71,9		15,3	- 42,9
	800		1,2	- 78,9		10,3	- 61,6
	1 000		0,6	- 89,5		5,0	- 81,3
II b	200	6,3	5,3	- 15,9	27,1	23,9	- 11,8
	400		4,7	- 25,4		22,4	- 17,3
	600		1,8	- 71,4		14,9	- 45,0
	800		1,3	- 79,4		10,6	- 60,9
	1 000		0,6	- 90,5		3,4	- 87,5
II c	200	6,5	6,2	- 4,6	34,5	34,0	- 1,4
	400		4,4	- 32,3		28,9	- 16,2
	600		3,2	- 50,8		23,7	- 31,3
	800		1,4	- 78,5		14,4	- 58,3
	1 000		0,5	- 92,3		6,3	- 81,7
II d	200	6,6	6,4	- 3,0	33,3	33,0	- 0,9
	400		4,0	- 39,4		28,8	- 13,5
	600		2,9	- 56,1		25,1	- 24,6
	800		1,1	- 83,3		17,0	- 48,9
	1 000		0,5	- 92,4		6,1	- 81,7



Graf č. 35: Grafický přehled výsledků pevnosti v tahu za ohybu po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B



Graf č. 36: Grafický přehled výsledků pevnosti v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B

Na Obr. č. 110 – Obr. č. 133 je fotodokumentace povrchů po jednotlivých stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část B.



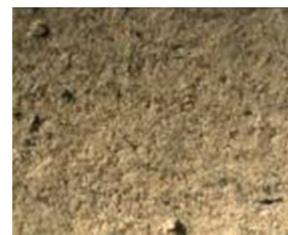
Obr. č. 110: II a - 28 dní



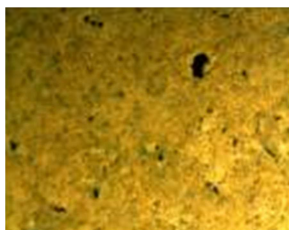
Obr. č. 111: II b - 28 dní



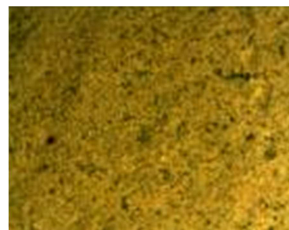
Obr. č. 112: II c - 28 dní



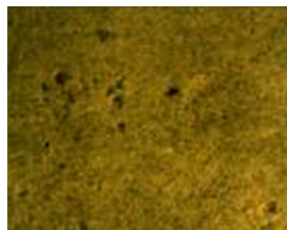
Obr. č. 113: II d - 28 dní



Obr. č. 114: II a - 200 °C



Obr. č. 115: II b - 200 °C



Obr. č. 116: II c - 200 °C



Obr. č. 117: II d - 200 °C



Obr. č. 118: II a - 400 °C



Obr. č. 119: II b - 400 °C



Obr. č. 120: II c - 400 °C



Obr. č. 121: II d - 400 °C



Obr. č. 122: II a - 600 °C



Obr. č. 123: II b - 600 °C



Obr. č. 124: II c - 600 °C



Obr. č. 125: II d - 600 °C



Obr. č. 126: II a - 800 °C



Obr. č. 127: II b - 800 °C



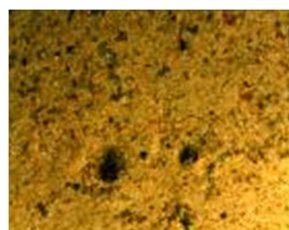
Obr. č. 128: II c - 800 °C



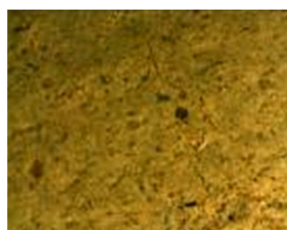
Obr. č. 129: II d - 800 °C



Obr. č. 130: II a-1 1000 °C



Obr. č. 131: II b-1 1000 °C



Obr. č. 132: II c-1 1000 °C



Obr. č. 133: II d-1 1000 °C

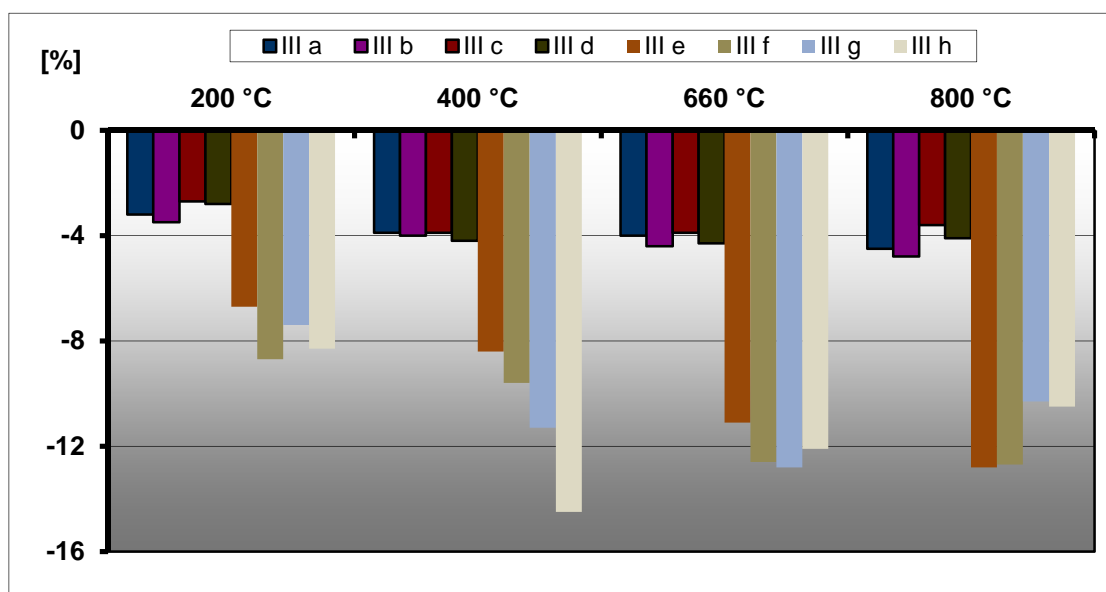
5.3.4 Etapa III – část A

V rámci etapy III – část A byly připraveny série zkušebních vzorků z osmi různých směsí (III a, III b, III c, III d, III e, III f, III g, III h), které jsou kombinací dvou druhů kameniva (čedičové, lehké kamenivo Liapor) a čtyř druhů cementů, viz Tab. č. 43.

Tab. č. 43: Receptury zatěžovaného betonu Etapy III – část A

složka [kg/m ³] / směs	III a	III b	III c	III d	III e	III f	III g	III h
CEM I 42,5 R – Mokrá	350	-	-	-	375	-	-	-
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R – Mokrá	-	350	-	-	-	375	-	-
CEM II/B-S 32,5 R – Holcim	-	-	350	-	-	-	375	-
CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim	-	-	-	350	-	-	-	375
kamenivo 0 – 4 mm Bílčice	1 070				500			
kamenivo 4 – 8 mm Bílčice	1 050				-			
kamenivo Liapor 1 – 4/500 [m ³]	-				0,24			
kamenivo Liapor 4 – 8/600 [m ³]	-				0,40			
superplastifikátor Mapefluid N200	6,3				4,5			
voda (z vodovodního řádu)	175				125			

Zkušební vzorky ve tvaru trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byly zatěžovány na teploty 200 °C, 400 °C, 660 °C a 800 °C s nárůstem 10 °C/min a teplotní výdrží po dobu 30 minut. Na zkušebních vzorcích byla provedena diagnostika před a po teplotním zatížení, kdy byly provedeny následující zkoušky: objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, zjištění procentuálního porušení povrchu vzorku, měření rychlosti šíření vln pomocí ultrazvuku.



Graf č. 37: Procentuální porovnání poklesu objemové hmotnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A

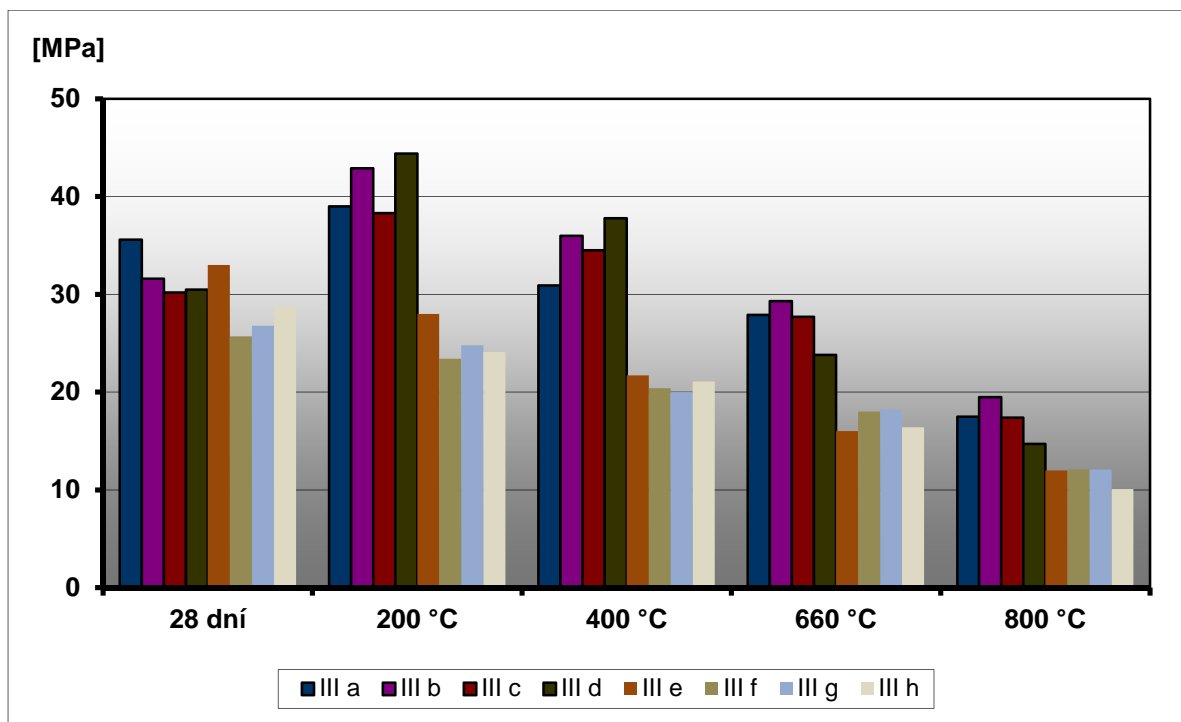
Tab. č. 44: Přehled výsledků změny objemové hmotnosti po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A

označení směsi	teplotní zatížení [°C]	objemová hmotnost [kg/m ³]		
		před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]
III a	200	2 535	2 454	- 3,2
	400	2 544	2 446	- 3,9
	660	2 513	2 413	- 4,0
	800	2 560	2 444	- 4,5
III b	200	2 561	2 471	- 3,5
	400	2 519	2 417	- 4,0
	660	2 546	2 433	- 4,4
	800	2 535	2 413	- 4,8
III c	200	2 544	2 476	- 2,7
	400	2 540	2 441	- 3,9
	660	2 541	2 441	- 3,9
	800	2 543	2 451	- 3,6
III d	200	2 557	2 485	- 2,8
	400	2 558	2 450	- 4,2
	660	2 545	2 435	- 4,3
	800	2 551	2 447	- 4,1
III e	200	1 696	1 583	- 6,7
	400	1 686	1 544	- 8,4
	660	1 652	1 468	- 11,1
	800	1 720	1 500	- 12,8
III f	200	1 687	1 540	- 8,7
	400	1 614	1 459	- 9,6
	660	1 639	1 433	- 12,6
	800	1 650	1 441	- 12,7
III g	200	1 642	1 520	- 7,4
	400	1 635	1 451	- 11,3
	660	1 687	1 471	- 12,8
	800	1 671	1 499	- 10,3
III h	200	1 697	1 556	- 8,3
	400	1 675	1 432	- 14,5
	660	1 675	1 472	- 12,1
	800	1 634	1 462	-10,5

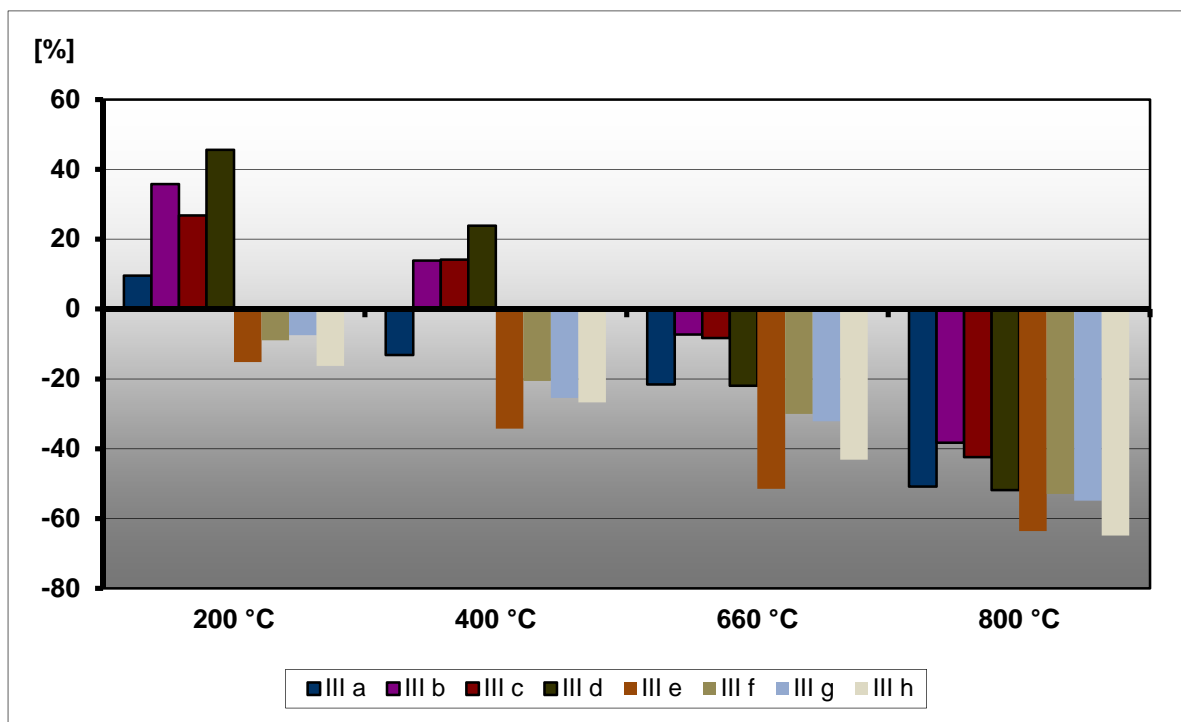
Pozn.: Hodnoty objemových hmotností jednotlivých směsí jsou vyjádřeny v jednotkách oproti normovým požadavkům, kdy je požadováno zaokrouhlení na celé desítky. Důvodem je získání přesnějších výsledků s markantnějšími rozdíly.

Tab. č. 45: Přehled výsledků změny fyzikálně-mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A

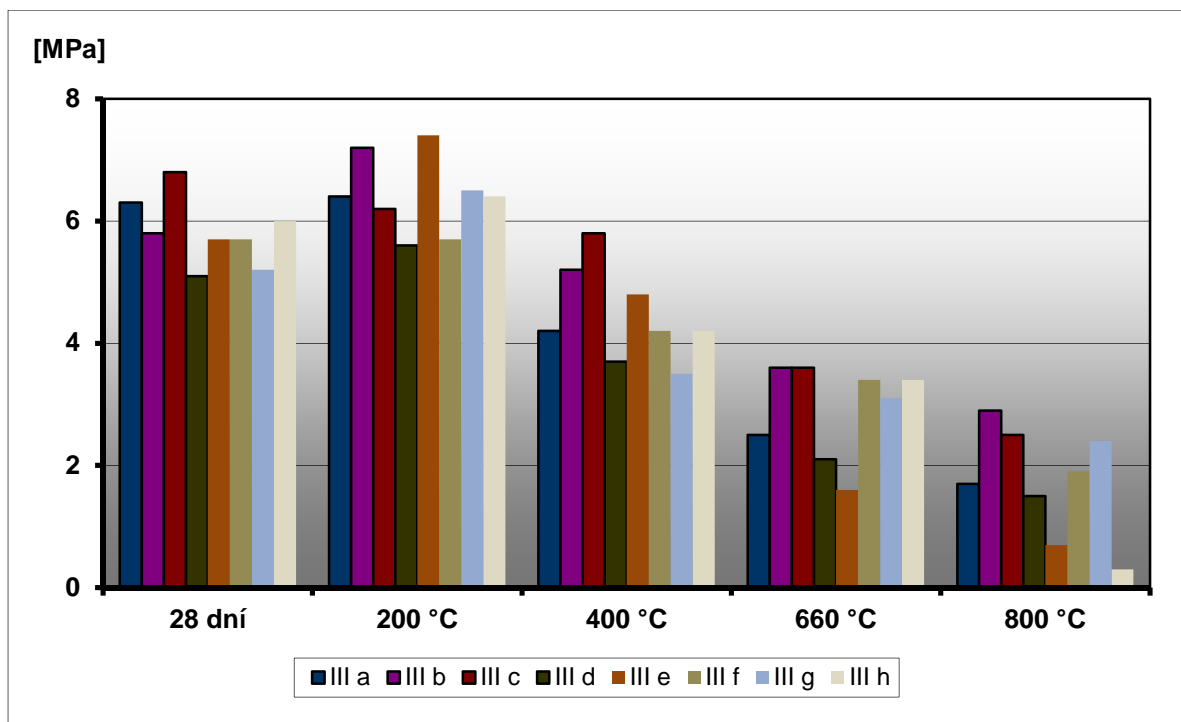
označení směsi	teplotní zatížení [°C]	pevnost v tlaku [MPa]			pevnost v tahu za ohybu [MPa]		
		referenční 28 dní	po teplotním zatížení	změna [%]	referenční 28 dní	po teplotním zatížení	změna [%]
III a	200	35,6	39,0	+ 9,6	6,3	6,4	+ 1,6
	400		30,9	- 13,2		4,2	- 33,3
	660		27,9	- 21,6		2,5	- 60,3
	800		17,5	- 50,8		1,7	- 73,0
III b	200	31,6	42,9	+ 35,8	5,8	7,2	+ 24,1
	400		36,0	+ 13,9		5,2	- 10,3
	660		29,3	- 7,3		3,6	- 37,9
	800		19,5	- 38,3		2,9	- 50,0
III c	200	30,2	38,3	+ 26,8	6,8	6,2	- 8,8
	400		34,5	+ 14,2		5,8	- 14,7
	660		27,7	- 8,3		3,6	- 47,1
	800		17,4	- 42,4		2,5	- 63,2
III d	200	30,5	44,4	+ 45,6	5,1	5,6	+ 9,8
	400		37,8	+ 23,9		3,7	- 27,5
	660		23,8	- 22,0		2,1	- 58,8
	800		14,7	- 51,8		1,5	- 70,6
III e	200	33,0	28,0	- 15,2	5,7	7,4	+ 29,8
	400		21,7	- 34,2		4,8	- 15,8
	660		16,0	- 51,5		1,6	- 71,9
	800		12,0	- 63,6		0,7	- 87,7
III f	200	25,7	23,4	- 8,9	5,7	5,7	0,0
	400		20,4	- 20,6		4,2	- 26,3
	660		18,0	- 30,0		3,4	- 40,4
	800		12,1	- 52,9		1,9	- 66,7
III g	200	26,8	24,8	- 7,5	5,2	6,5	+ 25,0
	400		20,0	- 25,4		3,5	- 32,7
	660		18,2	- 32,1		3,1	- 40,4
	800		12,1	- 54,9		2,4	- 53,8
III h	200	28,8	24,1	- 16,3	6,0	6,4	+ 6,7
	400		21,1	- 26,7		4,2	- 30,0
	660		16,4	- 43,1		3,4	- 43,3
	800		10,1	- 64,9		0,3	- 95,0



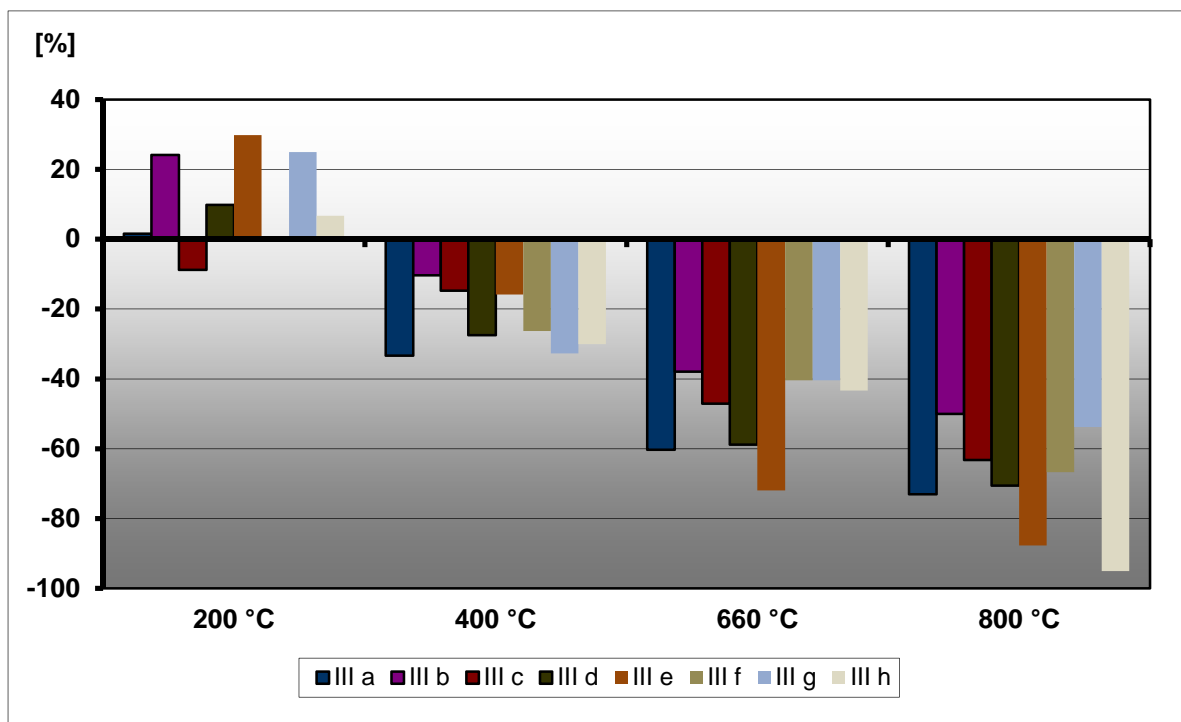
Graf č. 38: Grafický přehled výsledků pevnosti v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A



Graf č. 39: Procentuální porovnání poklesu pevnosti v tlaku po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A



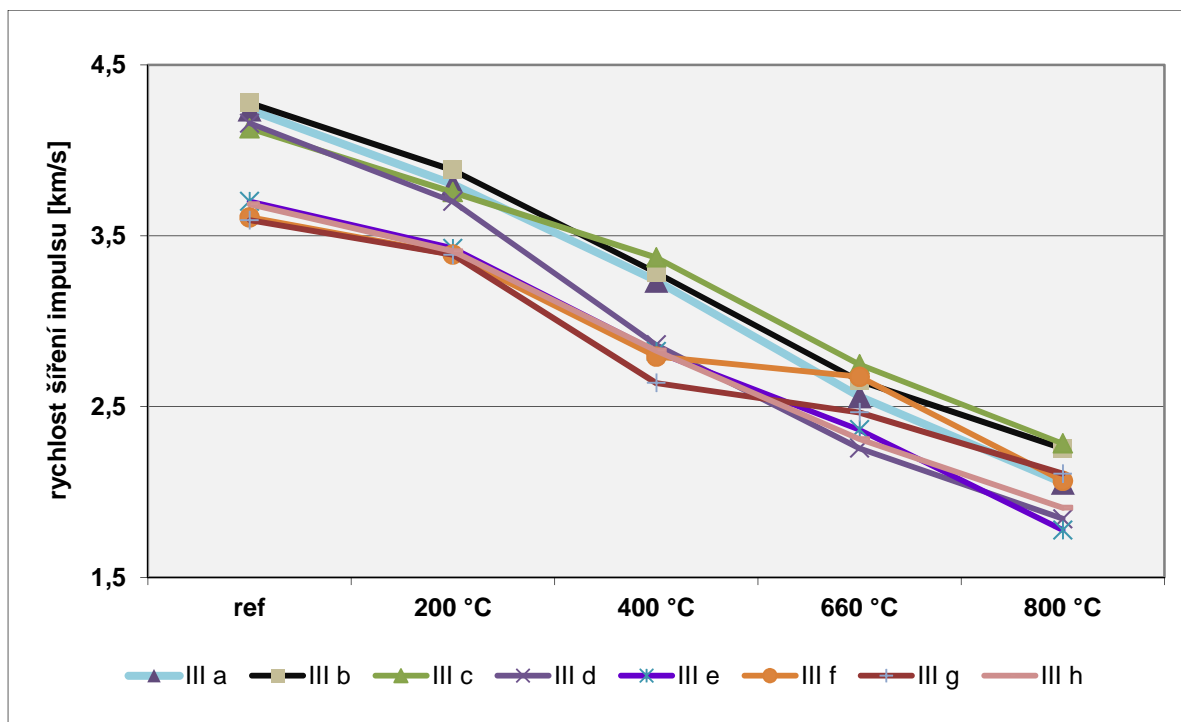
Graf č. 40: Grafický přehled výsledků pevnosti v tahu za ohybu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A



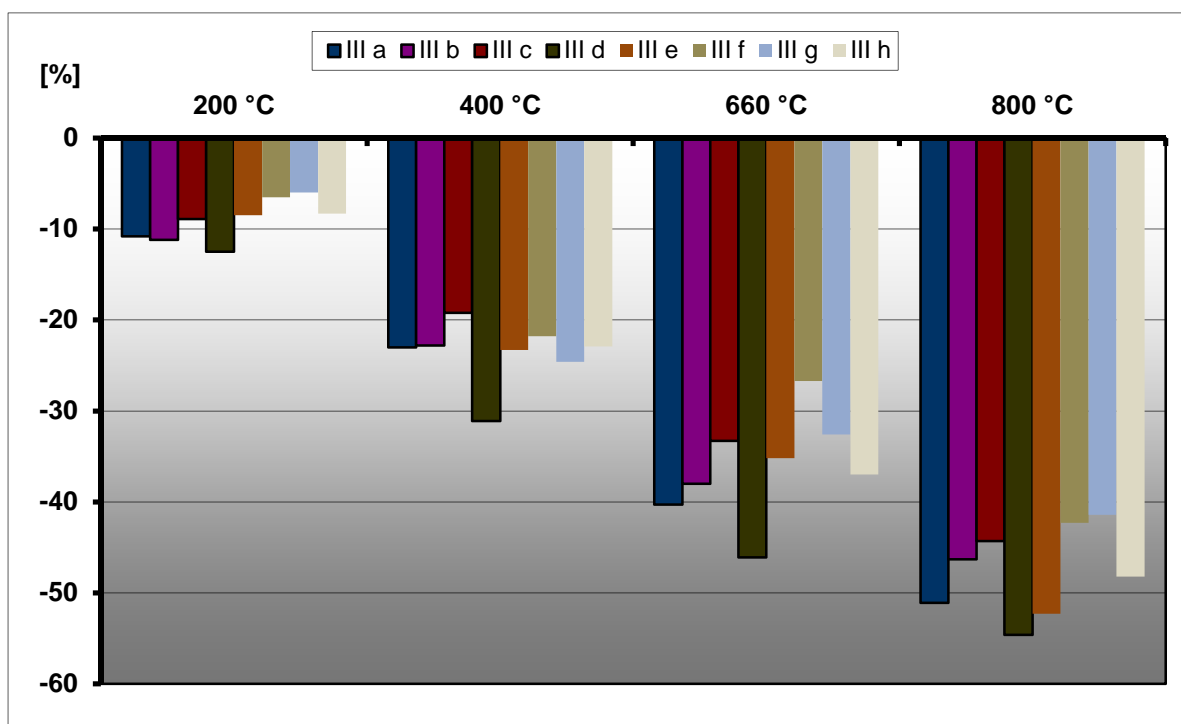
Graf č. 41: Procentuální porovnání poklesu pevnosti v tahu za ohybu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A

Tab. č. 46: Přehled výsledků změny rychlosti šíření impulzů po teplotním zatížení vzorků
Etapy III – část A

označení směsi	teplotní zatížení [°C]	rychlost šíření impulzu v_L [km/s]			
		před teplotním zatížením		po teplotním zatížení	změna [%]
		jednotlivá	průměr		
III a	200	4,261	4,238	3,801	- 10,8
	400	4,204		3,237	- 23,0
	660	4,286		2,559	- 40,3
	800	4,200		2,054	- 51,1
III b	200	4,374	4,277	3,884	- 11,2
	400	4,253		3,283	- 22,8
	660	4,277		2,651	- 38,0
	800	4,204		2,256	- 46,3
III c	200	4,121	4,128	3,754	- 8,9
	400	4,171		3,372	- 19,2
	660	4,118		2,747	- 33,3
	800	4,102		2,284	- 44,3
III d	200	4,230	4,158	3,700	- 12,5
	400	4,152		2,861	- 31,1
	660	4,189		2,256	- 46,1
	800	4,061		1,843	- 54,6
III e	200	3,743	3,700	3,426	- 8,5
	400	3,680		2,822	- 23,3
	660	3,650		2,365	- 35,2
	800	3,726		1,777	- 52,3
III f	200	3,626	3,607	3,389	- 6,5
	400	3,571		2,793	- 21,8
	660	3,648		2,675	- 26,7
	800	3,582		2,066	- 42,3
III g	200	3,605	3,591	3,388	- 6,0
	400	3,500		2,638	- 24,6
	660	3,659		2,466	- 32,6
	800	3,598		2,107	- 41,4
III h	200	3,717	3,684	3,409	- 8,3
	400	3,667		2,827	- 22,9
	660	3,667		2,309	- 37,0
	800	3,684		1,908	- 48,2

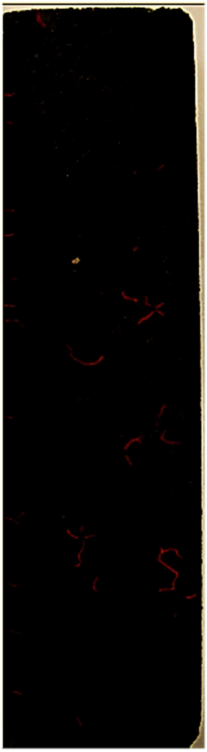

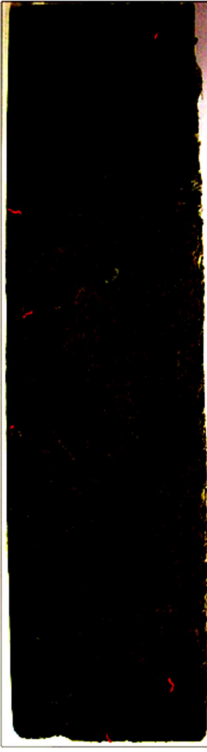


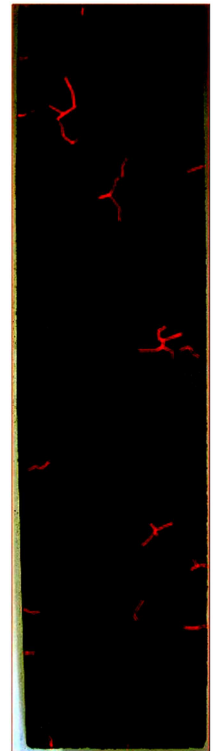




Graf č. 42: Grafický přehled rychlosti šíření impulsu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A

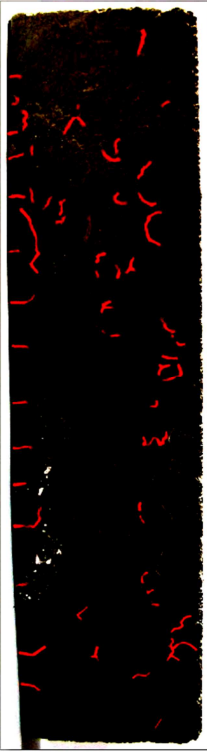
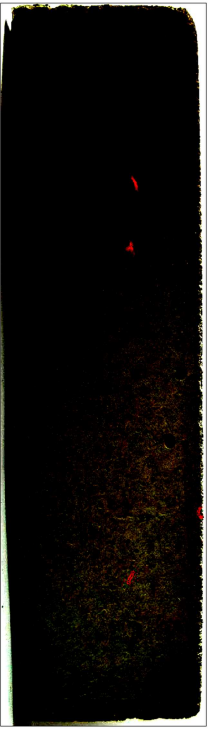

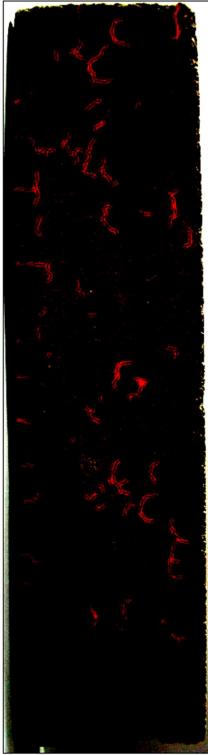
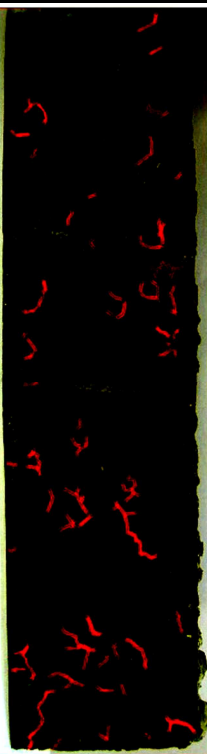
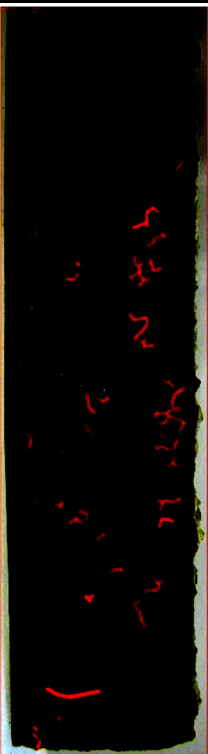
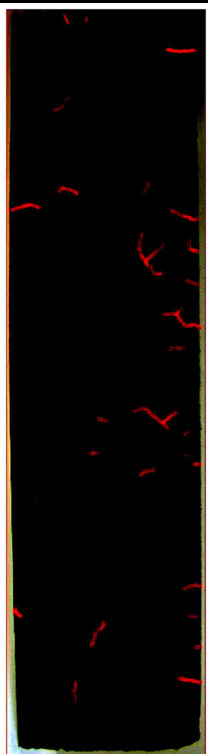
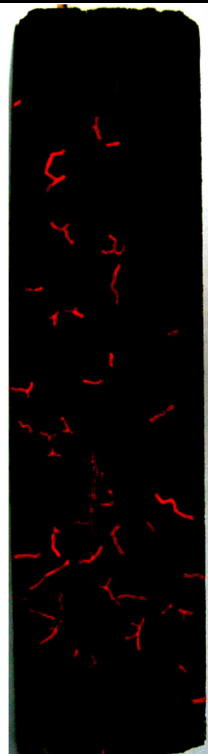


Graf č. 43: Procentuální porovnání poklesu rychlosti šíření impulsu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A

Tab. č. 47: Přehled porušení povrchu vzorků včetně upravené fotodokumentace s vyznačenými trhlinami po teplotním zatížení na 660 °C vzorků Etapy III – část A

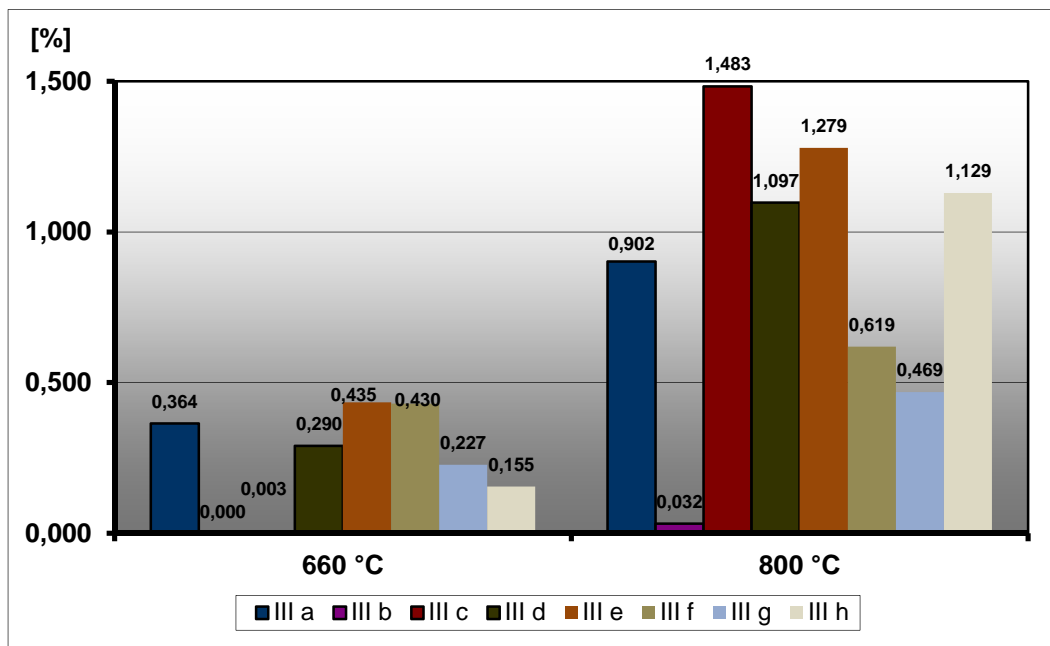
III a	III b	III c	III d
			
0,364 %	0,000 %	0,003 %	0,290 %
III e	III f	III g	III h
			
0,435 %	0,430 %	0,227 %	0,155 %

Tab. č. 48: Přehled porušení povrchu vzorků včetně upravené fotodokumentace s vyznačenými trhlinami po teplotním zatížení na 800 °C vzorků Etapy III – část A

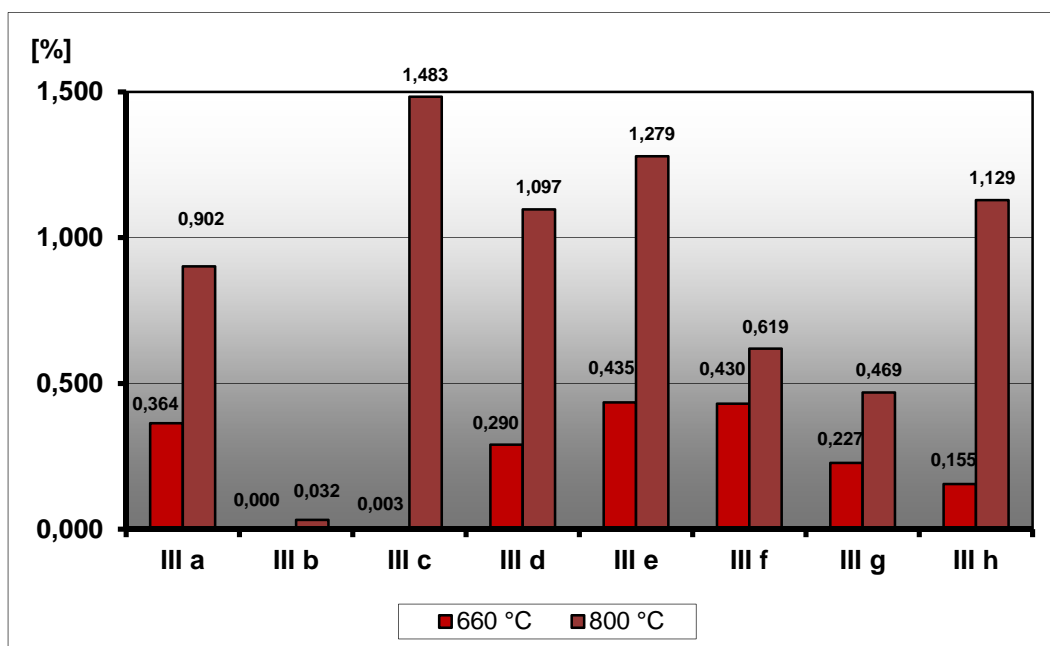
III a	III b	III c	III d
			
0,902 %	0,032 %	1,483 %	1,097 %
III e	III f	III g	III h
			
1,279 %	0,619 %	0,469 %	1,129 %

Tab. č. 49: Souhrn porušení povrchu vzorků v % po teplotním zatížení na 660 °C a 800 °C vzorků Etapy III – část A

označení směsi	III a	III b	III c	III d	III e	III f	III g	III h
teplotní zatížení [°C]								
660 °C	0,364	0,000	0,003	0,290	0,435	0,430	0,227	0,155
800 °C	0,902	0,032	1,483	1,097	1,279	0,619	0,469	1,129



Graf č. 44: Grafický přehled porušení povrchu vzorků po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A, vztaheno vzhledem k úrovni teplotního zatížení



Graf č. 45: Grafický přehled porušení povrchu vzorků po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A, vztaheno vzhledem k jednotlivé směsi

5.3.5 Etapa III – část B

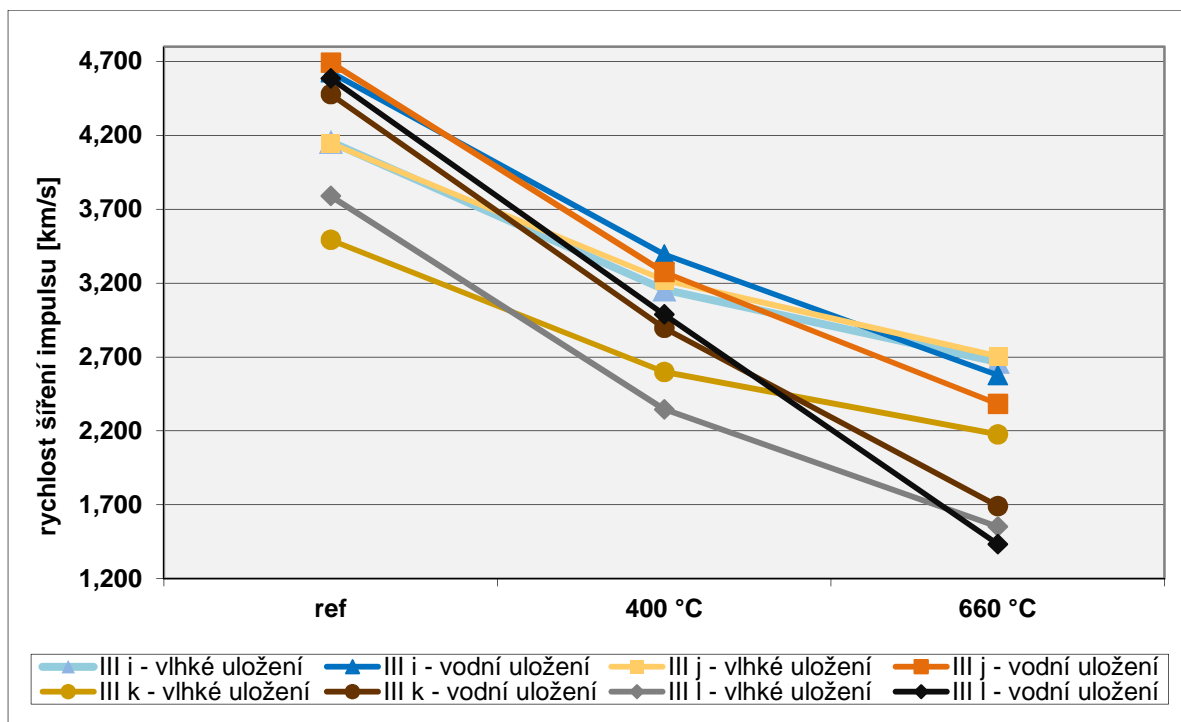
V rámci této části etapy byly připraveny série zkušebních vzorků (III i, III j, III k, III l), jejichž složení vycházelo z receptury namíchané v předešlé etapě (III d). Jednotlivé směsi se lišily v použité rozptýlené výztuži (polypropylenová, nízkouhlíková ocelová) a ve způsobu uložení vzorků (vlhko, voda). Polovina vzorků byla uložena do vlhkého prostředí (vlhkost vyšší než 80 %, teplota ± 20 °C) a druhá polovina do vodního uložení na dobu 28 dní. Zkušební vzorky ve tvaru trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byly zatěžovány na teploty 400 °C a 660 °C s nárůstem 10 °C/min a teplotní výdrží po dobu 60 minut. Poté byly vzorky vytaženy z pece a ponechány v běžném laboratorním prostředí až do vychladnutí. Na zkušebních vzorcích byla provedena diagnostika před a po teplotním zatížení, kdy byly provedeny následující zkoušky: objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, měření rychlosti šíření vln pomocí ultrazvuku, nasákavost.

Tab. č. 50: Receptury zatěžovaného betonu Etapy III – část B

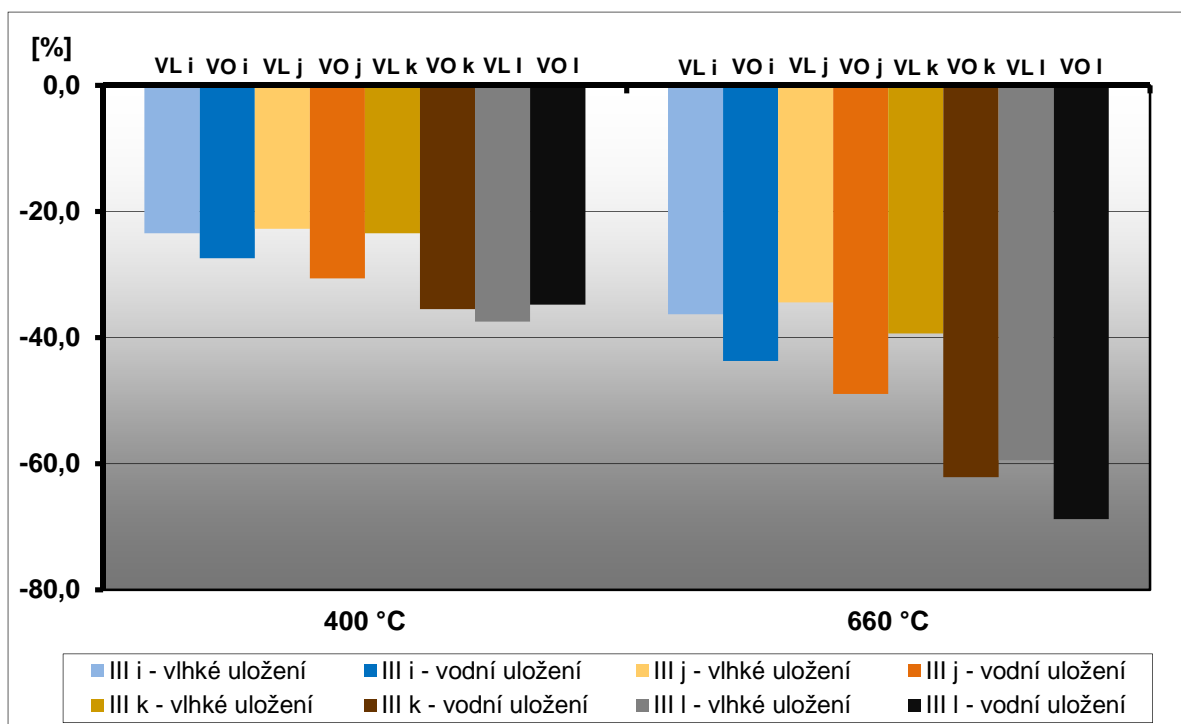
složka [kg/m ³] / směs	III i	III j	III k	III l
CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim	350			
kamenivo 0 – 4 mm Bílčice	1 070			
kamenivo 4 – 8 mm Bílčice	1 070			
superplastifikátor Mapefluid N200	3,5			
voda (z vodovodního řádu)	175			
polypropylenová vlákna Fibrin 315	-	1	2	-
ocelová vlákna CAR25CDM	-	-	-	50

Tab. č. 51: Přehled výsledků změny rychlosti šíření ultrazvukového impulsu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část B

označení směsi	teplotní zatížení [°C]	rychlost šíření impulsu v_L [km/s]					
		vlhké uložení			vodní uložení		
		před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]	před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]
III i	400	4,125	3,157	- 23,5	4,674	3,394	- 27,4
	660	4,187	2,667	- 36,3	4,578	2,577	- 43,7
III j	400	4,169	3,221	- 22,7	4,717	3,274	- 30,6
	660	4,123	2,705	- 34,4	4,665	2,382	- 48,9
III k	400	3,394	2,599	- 23,4	4,490	2,897	- 35,5
	660	3,590	2,177	- 39,4	4,465	1,691	- 62,1
III l	400	3,752	2,346	- 37,5	4,579	2,988	- 34,7
	660	3,826	1,552	- 59,4	4,591	1,434	- 68,8



Graf č. 46: Grafický přehled rychlosti šíření impulsu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část B



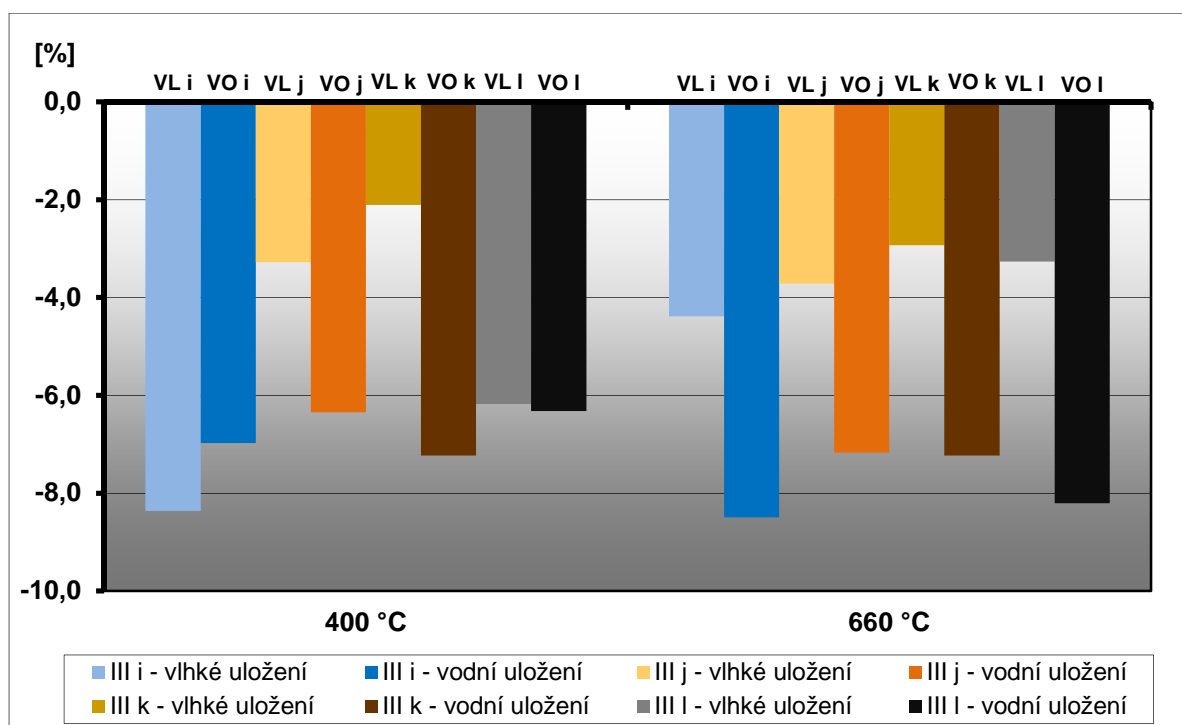
Graf č. 47: Procentuální porovnání změny rychlosti šíření impulsu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B

Tab. č. 52: Přehled výsledků a změn fyzikálně – mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část B

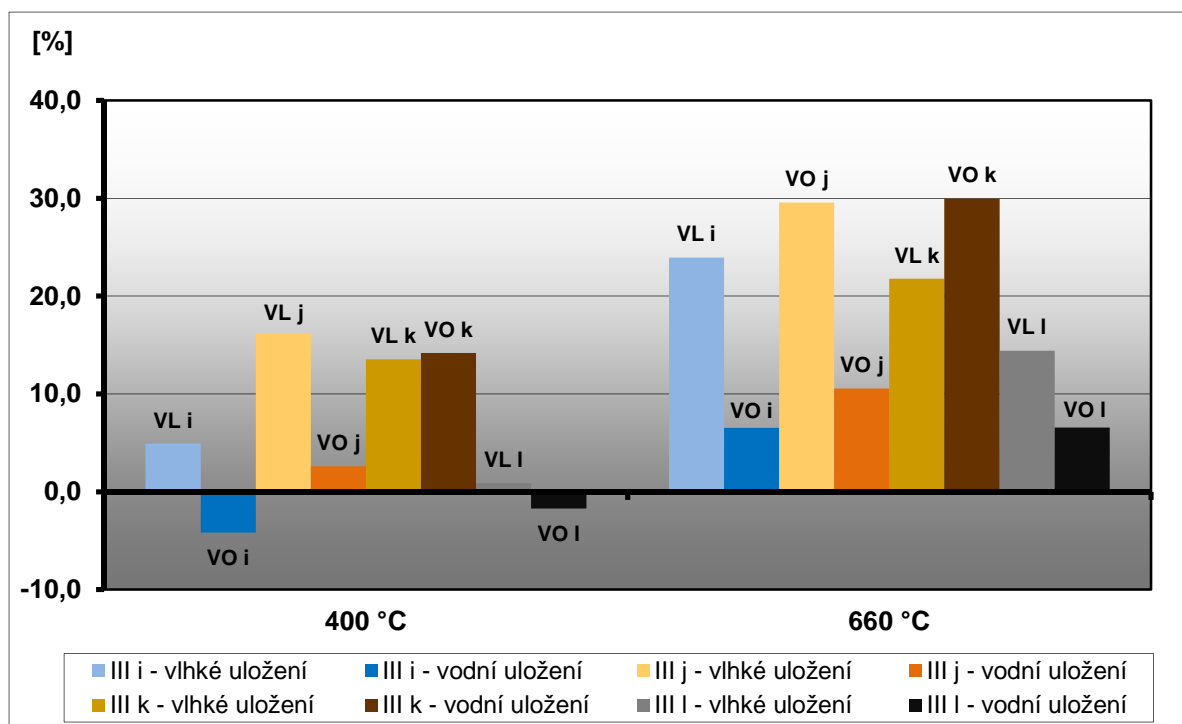
označení směsi	teplotní zatížení [°C]	vlhké uložení			vodní uložení		
		před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]	před teplotním zatížením	po teplotním zatížení	změna [%]
objemová hmotnost [kg/m³]							
III i	400	2 630	2 410	- 8,4	2 580	2 400	- 7,0
	660	2 510	2 400	- 4,4	2 590	2 370	- 8,5
III j	400	2 440	2 360	- 3,3	2 520	2 360	- 6,3
	660	2 420	2 330	- 3,7	2 510	2 330	- 7,2
III k	400	2 370	2 320	- 2,1	2 490	2 310	- 7,2
	660	2 390	2 320	- 2,9	2 490	2 310	- 7,2
III l	400	2 590	2 430	- 6,2	2 530	2 370	- 6,3
	660	2 450	2 370	- 3,3	2 560	2 350	- 8,2
nasákavost [%]							
III i	400	6,31	6,62	+ 4,9	7,20	6,90	- 4,2
	660		7,82	+ 23,9		7,67	+ 6,5
III j	400	6,19	7,19	+ 16,2	6,91	7,09	+ 2,6
	660		8,02	+ 29,6		7,64	+ 10,6
III k	400	6,80	7,72	+ 13,5	6,34	7,24	+ 14,2
	660		8,28	+ 21,8		8,24	+ 30,0
III l	400	6,80	6,86	+ 0,9	7,63	7,50	- 1,7
	660		7,78	+ 14,4		8,13	+ 6,6
pevnost v tahu za ohybu [MPa]							
III i	400	6,4	4,2	- 34,4	8,9	5,6	- 37,1
	660		3,6	- 43,8		3,3	- 62,9
III j	400	6,2	4,8	- 22,6	8,9	5,2	- 41,6
	660		3,3	- 46,8		3,3	- 62,9
III k	400	3,1	2,4	- 22,6	5,5	4,8	- 12,7
	660		1,3	- 58,1		2,2	- 60,0
III l	400	5,6	4,6	- 17,9	7,5	4,7	- 37,3
	660		2,4	- 57,1		3,6	- 52,0
pevnost v tlaku [MPa]							
III i	400	33,9	33,8	- 0,3	44,7	48,4	+ 8,3
	660		25,2	- 25,7		30,3	- 32,2
III j	400	37,7	34,7	- 8,0	51,7	58,3	+ 12,8
	660		26,2	- 30,5		31,9	- 38,3
III k	400	21,6	27,8	+ 28,7	25,2	44,2	+ 75,4
	660		18,2	- 15,7		24,5	- 2,8
III l	400	27,7	30,5	+ 10,1	36,4	48,6	+ 33,5
	660		20,8	- 24,9		31,3	- 14,0

Pozn.: vlhké uložení - dále značeno VL

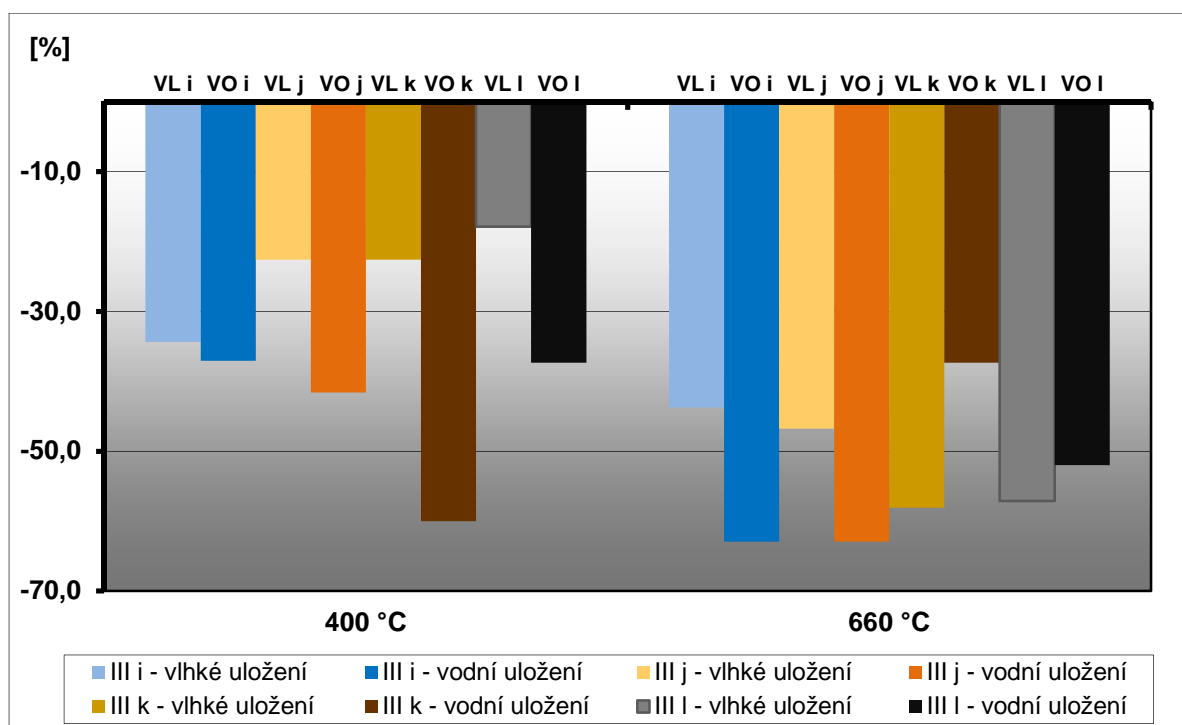
vodní uložení - dále značeno VO



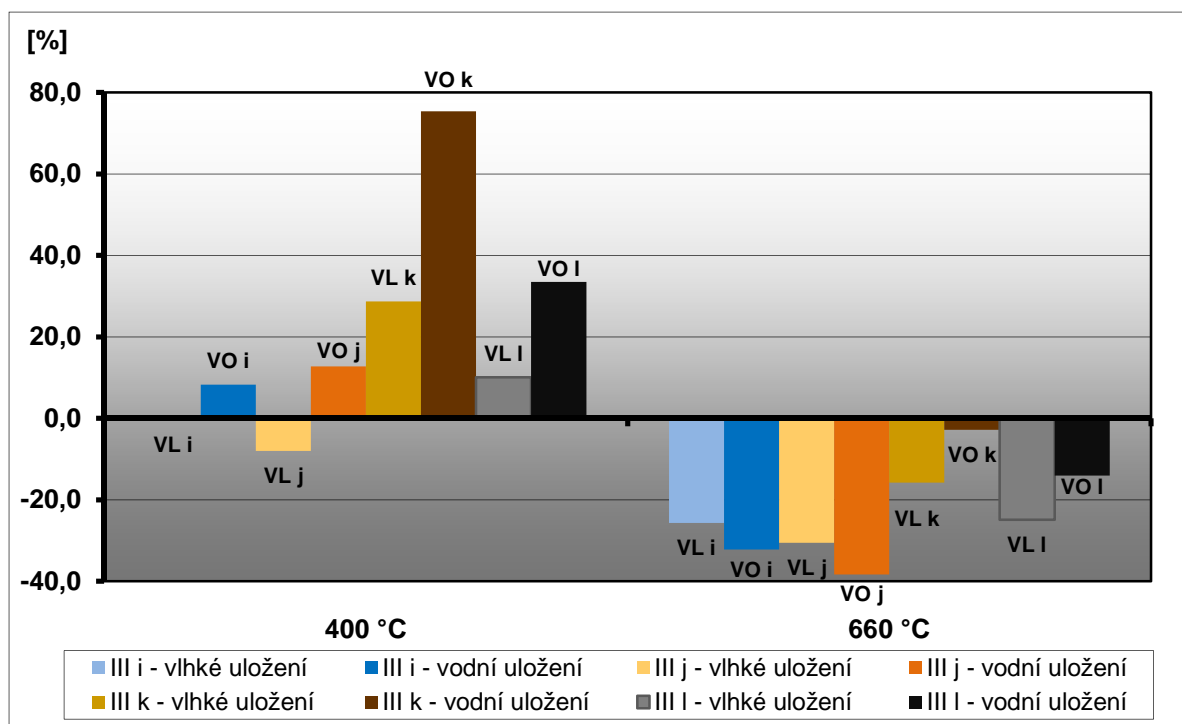
Graf č. 48: Procentuální porovnání změny objemové hmotnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B



Graf č. 49: Procentuální porovnání změny nasákavosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B



Graf č. 50: Procentuální porovnání změny pevnosti v tahu ohybem po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B



Graf č. 51: Procentuální porovnání změny pevnosti v tlaku po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B

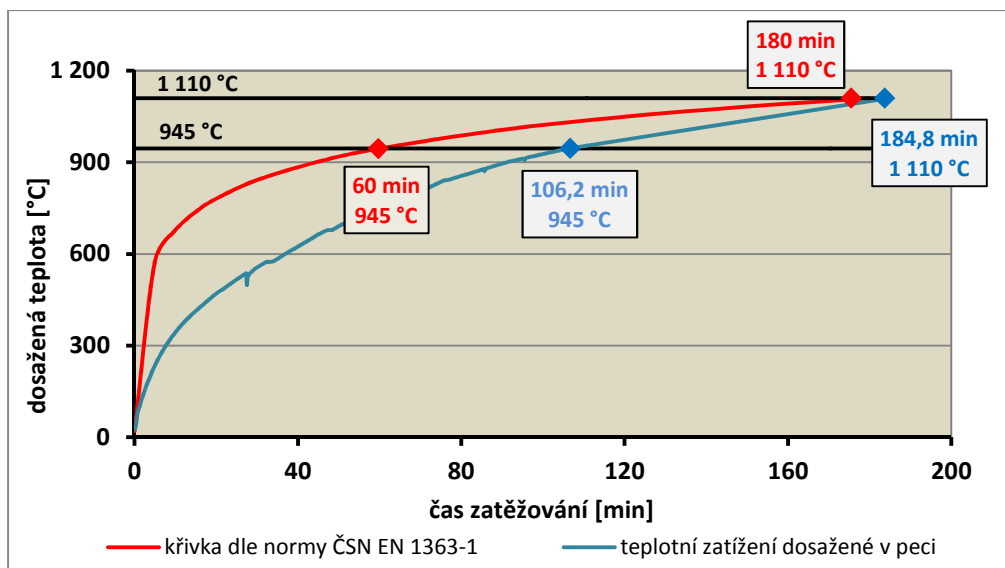
5.3.6 Etapa III – část C

V této části etapy byly teplotně zatěžovány zkušební vzorky tvaru krychle o rozměrech 100×100×100 mm ze čtyř odlišných receptur. Nově byly připraveny tři receptury (III m, III n, III o) a byla také využita receptura již zkoušená v rámci etapy II – část A. Složení se liší v množství cementu, záměsové vody a maximálním zrnů kameniva. Do dvou směsí byla navíc přidána polypropylenová vlákna a do jedné provzdušňovací přísada (vliv pórovité matrice).

Tab. č. 53: Receptury zatěžovaného betonu Etapy III – část C

složka [kg/m ³] / směs	II	III m	III n	III o
CEM I 42,5 R – Mokrý	350	390	340	380
kamenivo 0 – 4 mm Žabčice	894	820	950	860
kamenivo 4 – 8 mm Olbramovice	-	405	950	860
kamenivo 8 – 16 mm Olbramovice	928	460	-	-
voda (z vodovodního řádu)	194	182	153	209
plastifikátor ChrysoPlast 760	-	3,1	-	-
plastifikátor ChrysoPlast 460	-	-	1,36	1,52
plastifikátor ChrysoFluid Optima 206	2,3	-		
provzdušňovací přísada Chryso Air A	-	1,1	-	-
polypropylenová vlákna Fibrin 615	2,0	-		
polypropylenová vlákna Fibrin 315	-	-	-	1,0

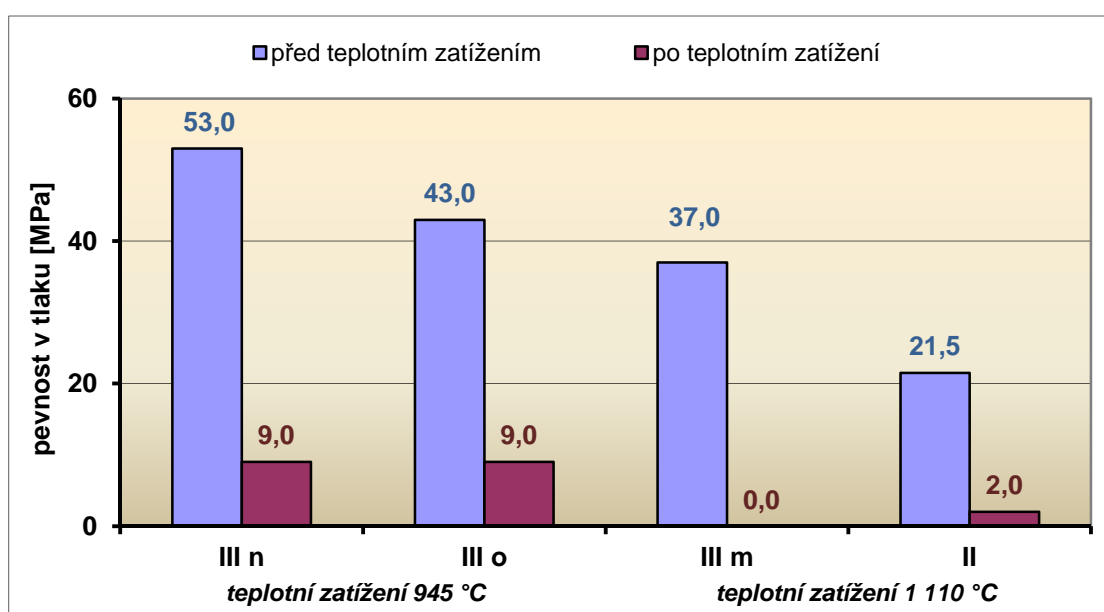
Vzorky byly teplotně zatěžovány v laboratorní peci s teplotním gradientem podle ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. Zatěžovací teplotní křivka vycházela z normové křivky, ale vzhledem k nedostatečnému tepelnému výkonu použité pece se nepodařilo dosáhnout stejně strmého nárůstu teplot (viz Graf č. 52). První série vzorků (III n, III o) byla zatížena na maximální teplotu 945 °C bez izotermické výdrže, které bylo dosaženo za 106,2 minut od počátku zatěžování. Vzhledem k tomu, že nedošlo k destrukci vzorků, byla maximální teplota u druhé série vzorků zvýšena na 1 110 °C bez izotermické výdrže (dosaženo za 184,8 minut). Po ohřátí byly vzorky samovolně ochlazený na běžnou laboratorní teplotu ± 20 °C. Poté byla provedena vizuální prohlídka vzorků a byly zjištěny objemová hmotnost a pevnost v tlaku.



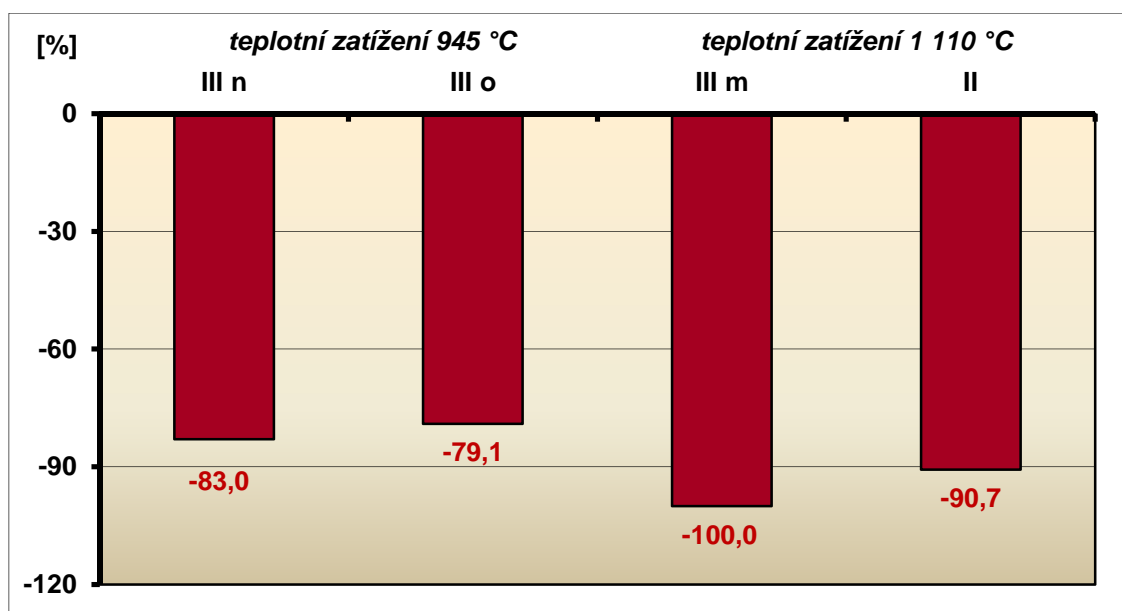
Graf č. 52: Srovnání naměřených teplot při zatěžování s teplotní křivkou dle ČSN EN 1363-1

Tab. č. 54: Přehled výsledků změny fyzikálně – mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část C

označení směsi	objemová hmotnost [kg/m ³]			pevnost v tlaku [MPa]		
	před	po	změna [%]	před	po	změna [%]
945 °C						
III n	2 330	2 300	- 1,2	53,0	9,0	- 83,0
III o	2 290	2 260	- 1,3	43,0	9,0	- 79,1
1 110 °C						
III m	2 270	<i>destrukce</i>		37,0	<i>destrukce</i>	
II	2 120	1 810	- 14,6	21,5	2,0	- 90,7



Graf č. 53: Grafický přehled pevností v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část C



Graf č. 54: Procentuální porovnání poklesu pevnosti v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část C



Obr. č. 134: Detail výrazně porušeného povrchu vzorku směsi II po teplotním zatížení až do teploty 1110 °C – povrch vzorku je protkán sítí trhlin



Obr. č. 135: Detail vzorku směsi III m po teplotním zatížení až do teploty 1110 °C – destrukce vzorku

5.3.7 Etapa IV

V poslední etapě byly vzorky tvaru krychle o rozměrech 100 × 100 × 100 mm zatíženy přímým plamenem. Zatěžování byly podrobeny vzorky pěti odlišných receptur, které se lišily druhem kameniva, pojivem, různou rozptýlenou výztuží a použitím příměsí. Receptura II již byla teplotně zatěžována v rámci etapy II – část A na maximální teplotu 250 °C a receptury III i, III j, III l byly teplotně zatěžovány v rámci etapy III – část B na teploty 400 °C a 660 °C. Nová receptura IV pro tuto etapu byla navržena jako samozhutnitelný beton (SCC) s přídavkem popílku.

Tab. č. 55: Receptury zatěžovaného betonu Etapy IV

složka [kg/m ³] / směs	II	III i	III j	III l	IV
CEM I 42,5 R – Mokrý	350		-		360
CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim	-		350		-
kamenivo 0 – 4 mm Žabčice	894		-		930
kamenivo 0 – 4 mm Bílčice	-		1 070		-
kamenivo 4 – 8 mm Olbramovice	-		-		200
kamenivo 4 - 8 mm Bílčice	-		1 070		-
kamenivo 8 – 16 mm Olbramovice	928		-		510
voda (z vodovodního řádu)	194		175		174
superplastifikátor Mapefluid N200	-		3,5		-
plastifikátor ChrysoFluid Optima 206	2,3		-		5,5
popílek Dětmárovice	-		-		90
polypropylenová vlákna Fibrin 615	2,0		-		-
polypropylenová vlákna Fibrin 315	-	-	1	-	-
ocelová vlákna CAR25CDM	-	-	-	50	-

Od každé receptury byly zatěžování podrobeny vždy dvě skupiny vzorků, které se lišily různou vlhkostí. Další vzorky zatěžovaných receptur byly vždy paralelně se zatížením přímým plamenem vloženy do sušárny pro stanovení aktuální vlhkosti zatěžovaných vzorků (viz Tab. č. 56). V průběhu zatěžování byly vzorky vizuálně sledovány a byly zaznamenány probíhající změny. Před zatěžováním a v časových etapách po 10 minutách byl fotograficky zdokumentován exponovaný povrch. Rozložení teplot ve vzorku bylo také v průběhu zatěžování dokumentováno pomocí termografické kamery.

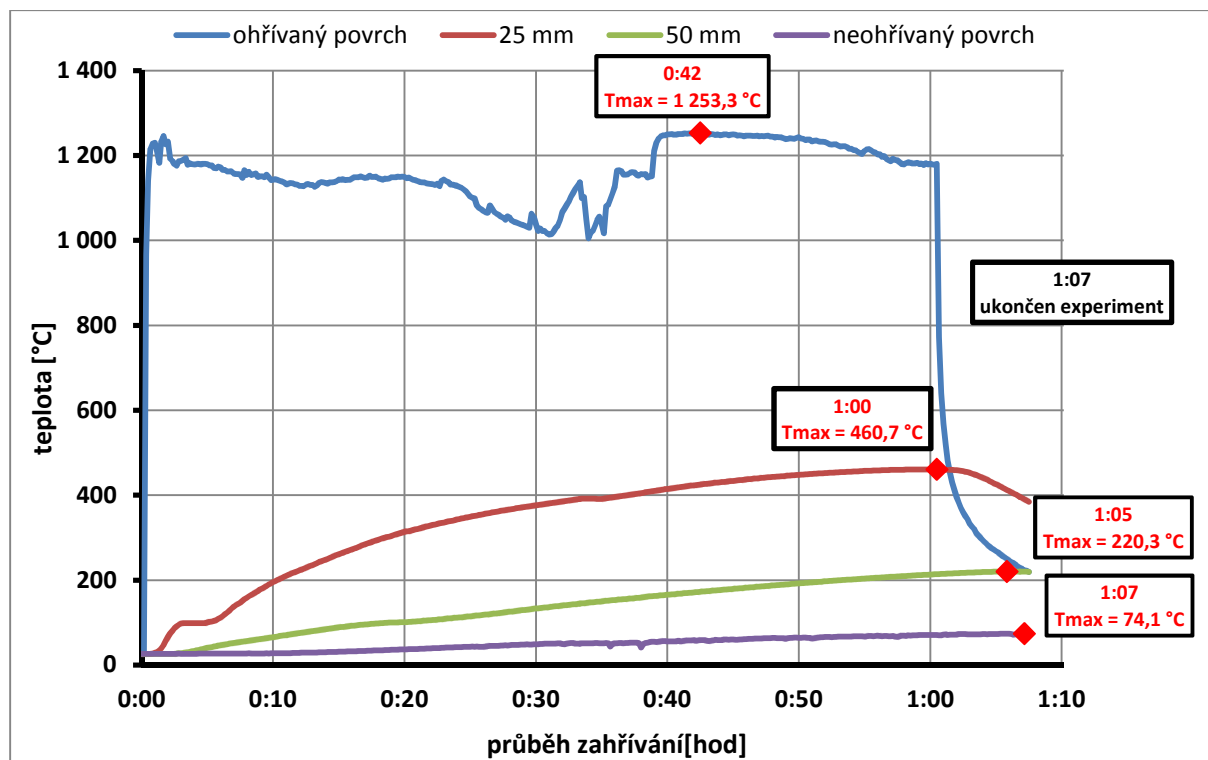
Po zatížení a vychladnutí byla provedena diagnostika vzorků skládající se z:

- vizuální sledování vzorku
- zaznamenání sítě trhlin s fotografickým záznamem
- změření maximální hloubky odprýsknutého betonu v případě, že nastane explozivní odprýsknutí

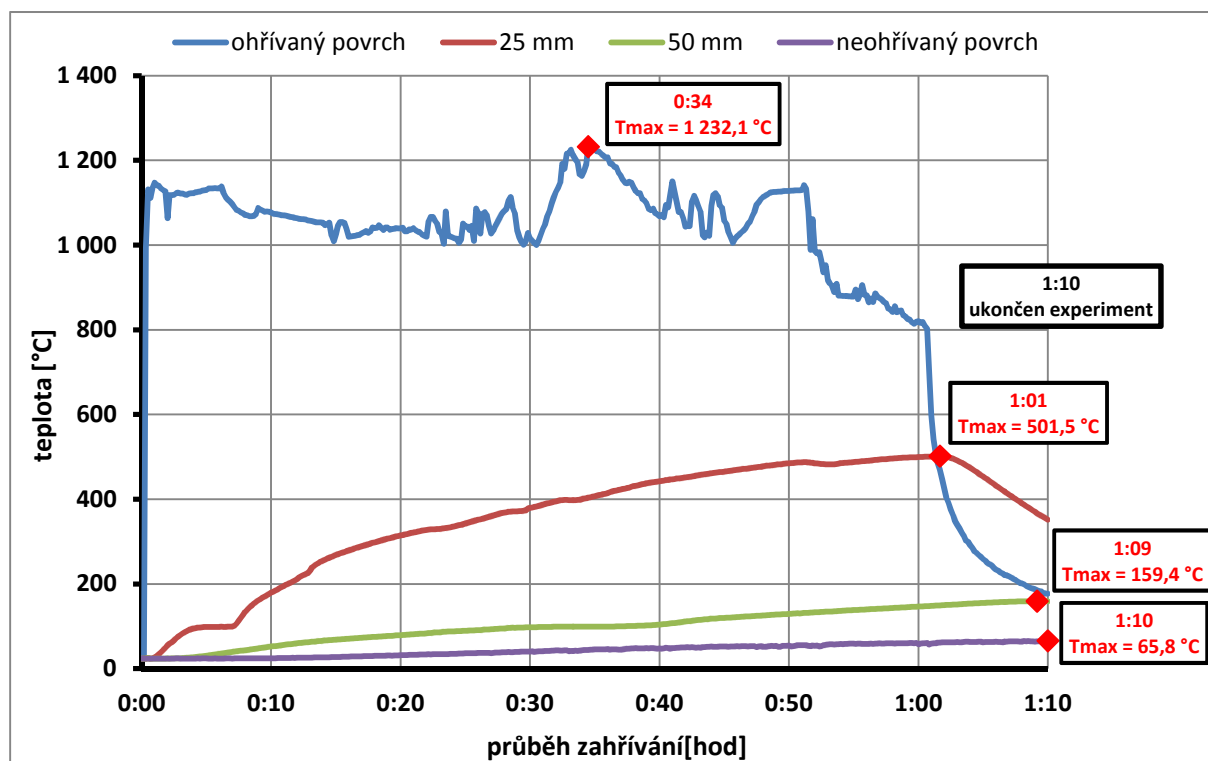
Tab. č. 56: Vlhkosti jednotlivých vzorků z vlhkého a vodního uložení

receptura	uložení	m_w [g]	m_d [g]	vlhkost w_m [%]
II	VLHKÉ	2 011,70	1 927,16	4,4
III i		2 508,86	2 418,56	3,7
III j		2 599,50	2 497,77	4,1
III l		2 514,25	2 444,33	2,9
IV		2 285,96	2 194,18	4,2
II	VODNÍ	2 071,65	1 946,84	6,4
III i		2 529,09	2 405,83	5,1
III j		2 616,60	2 500,86	4,6
III l		2 547,55	2 429,47	4,9
IV		2 291,54	2 194,50	4,4

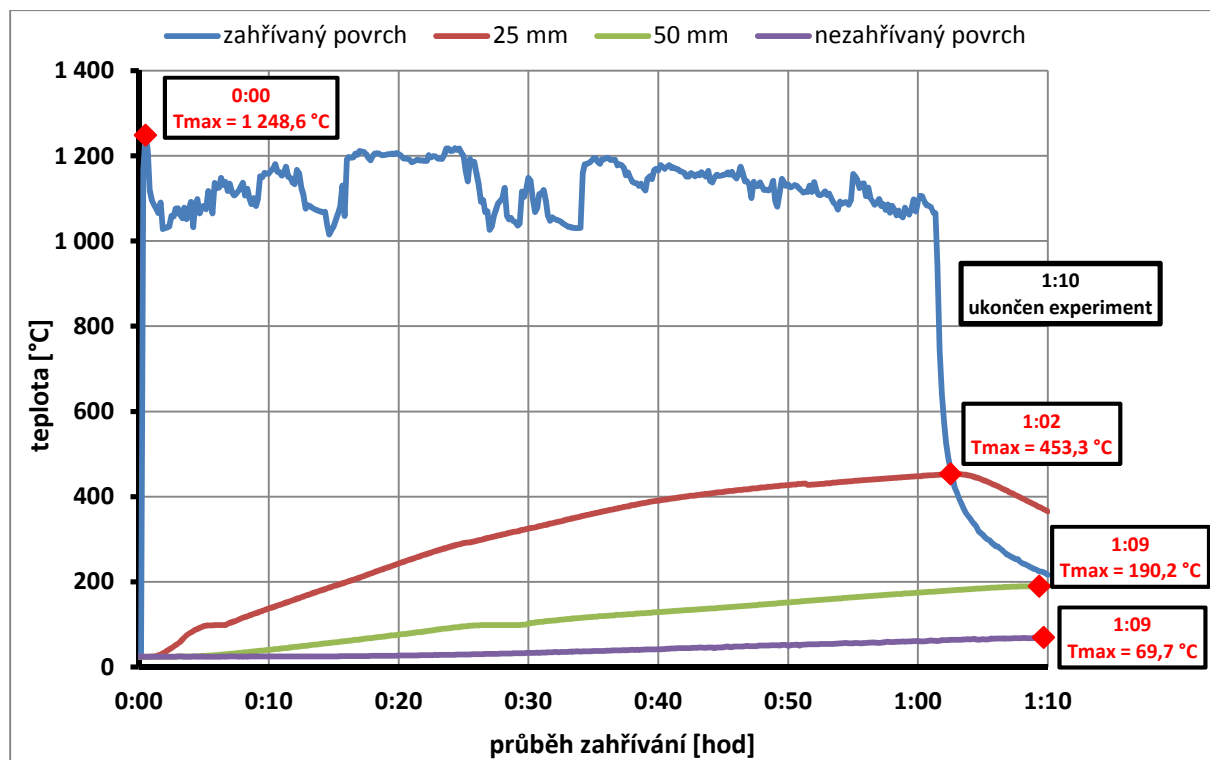
Teploty jednotlivých vzorků v průběhu zahřívání byly snímány pomocí termočlánků TT-K-24-SLE (typ K, materiál Cr-Al, teplotní rozsah 0 °C – 1 250 °C, přesnost $\pm 1,1$ °C) a zaznamenány do záznamového zařízení Kimo HD 200 (čtyřkanálový modul s termočlánkovými čidly). Naměřené hodnoty jsou vykresleny v následujících Graf č. 55 – Graf č. 64. Rozložení teplot bylo také v průběhu zatěžování snímáno pomocí termografické kamery FLIR. Snímky vzorků z termografické kamery ihned po ukončení experimentů jsou na Obr. č. 136 – Obr. č. 145.



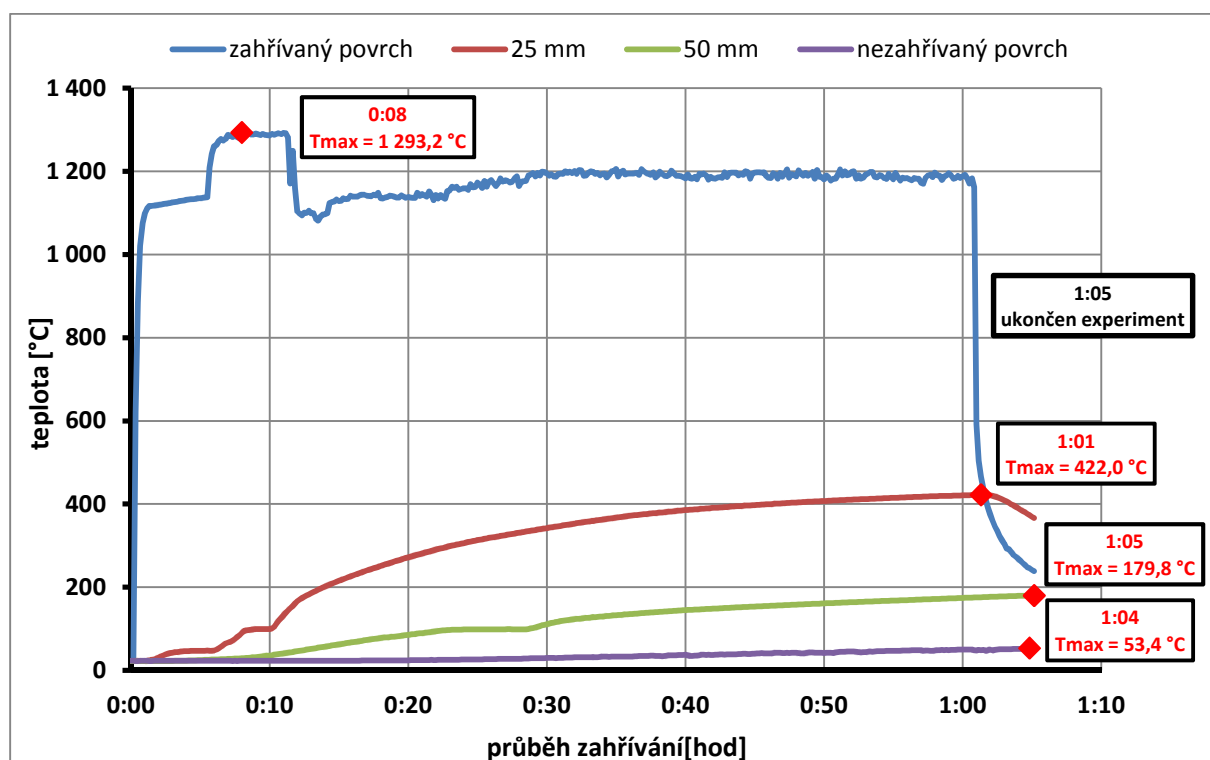
Graf č. 55: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury II (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice) – vlhké uložení



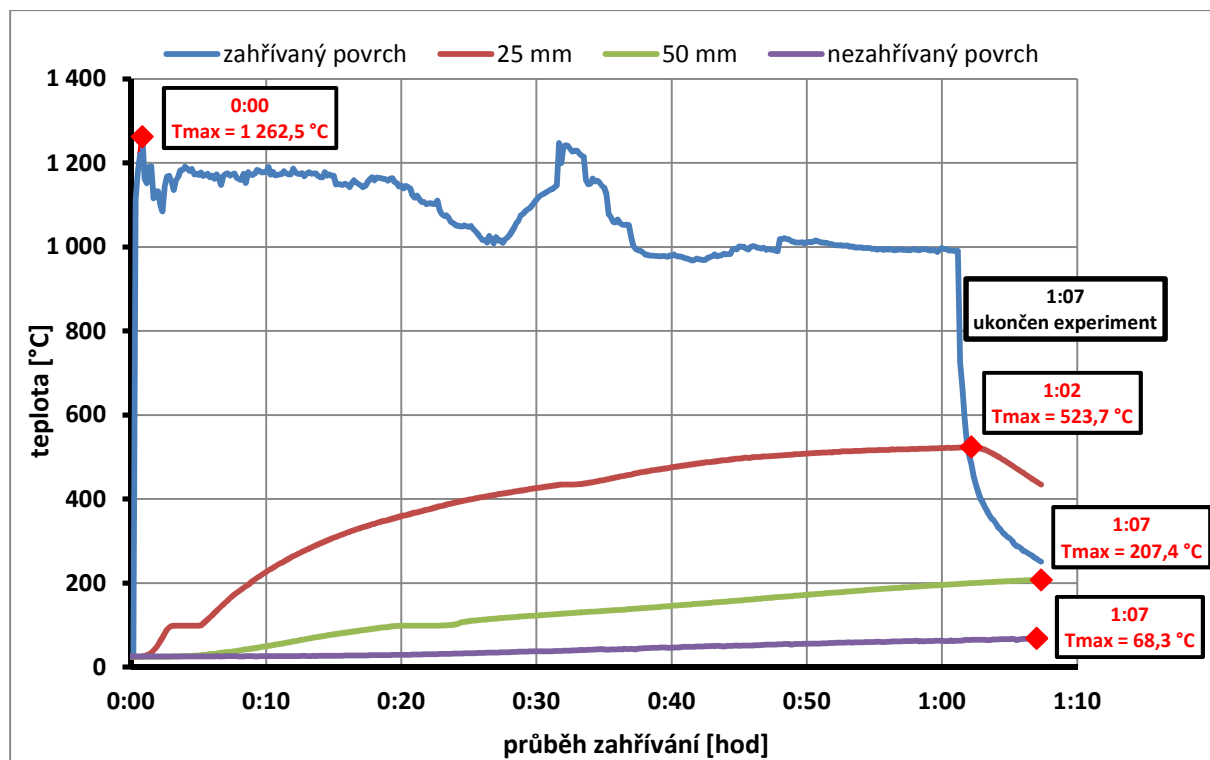
Graf č. 56: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury II (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice) – vodní uložení



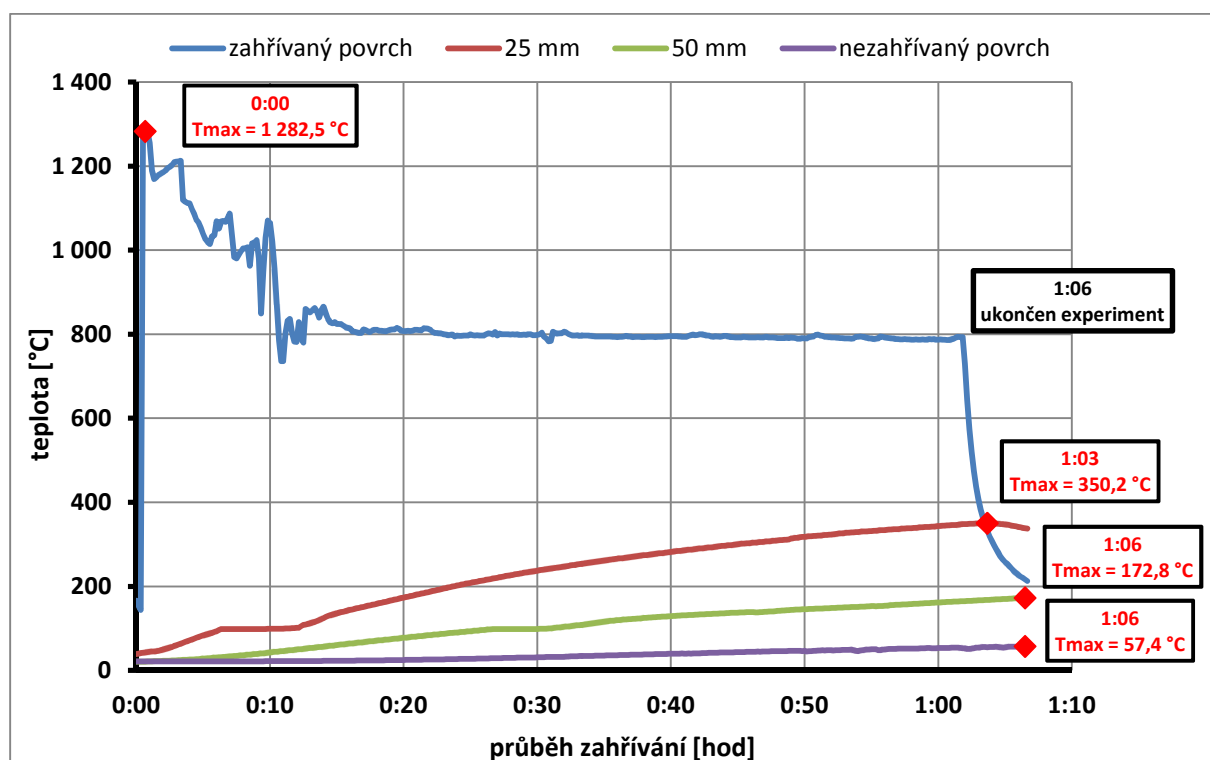
Graf č. 57: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III i (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice) – vlhké uložení



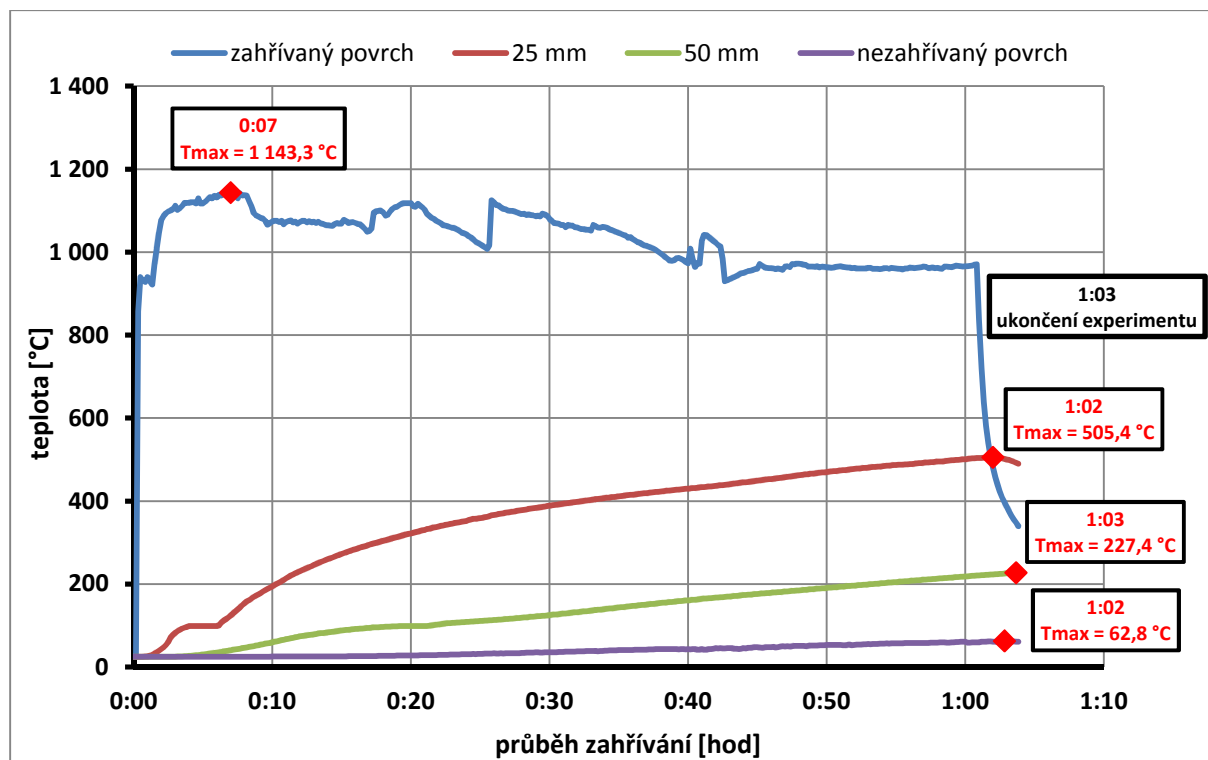
Graf č. 58: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III i (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice) – vodní uložení



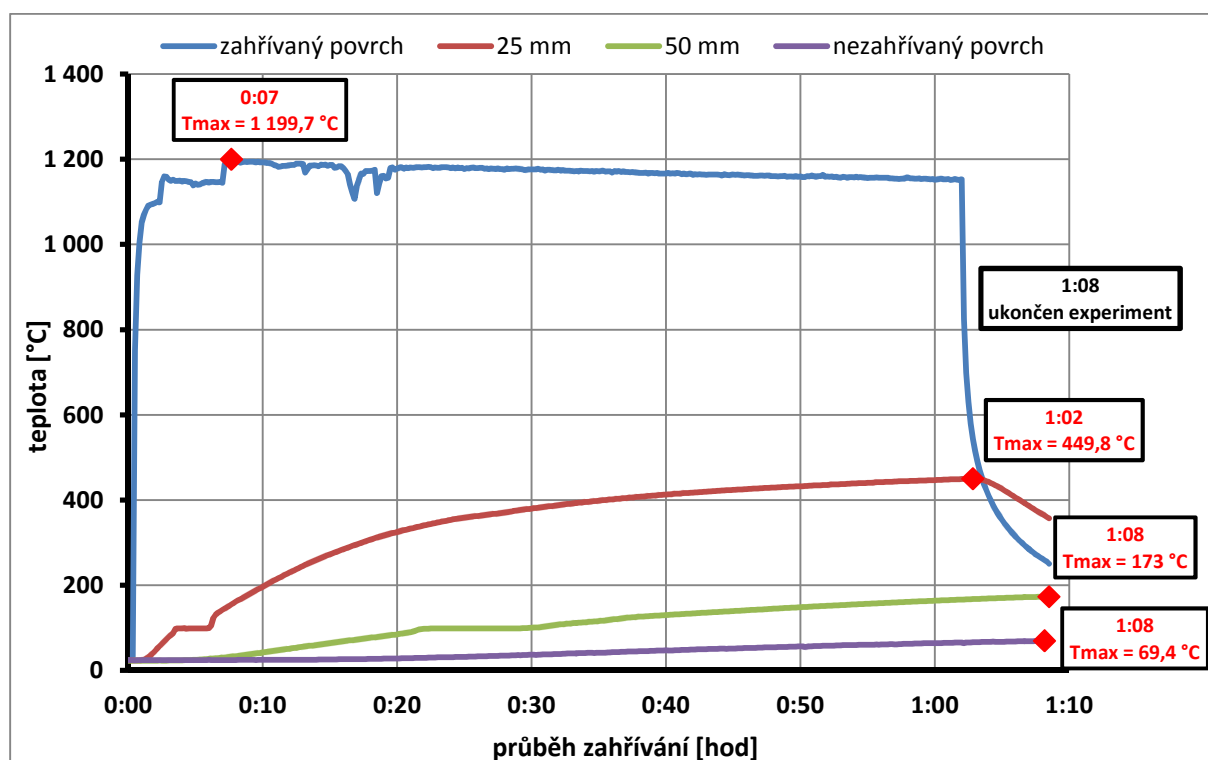
Graf č. 59: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III j (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, polypropylenová vlákna) – vlhké uložení



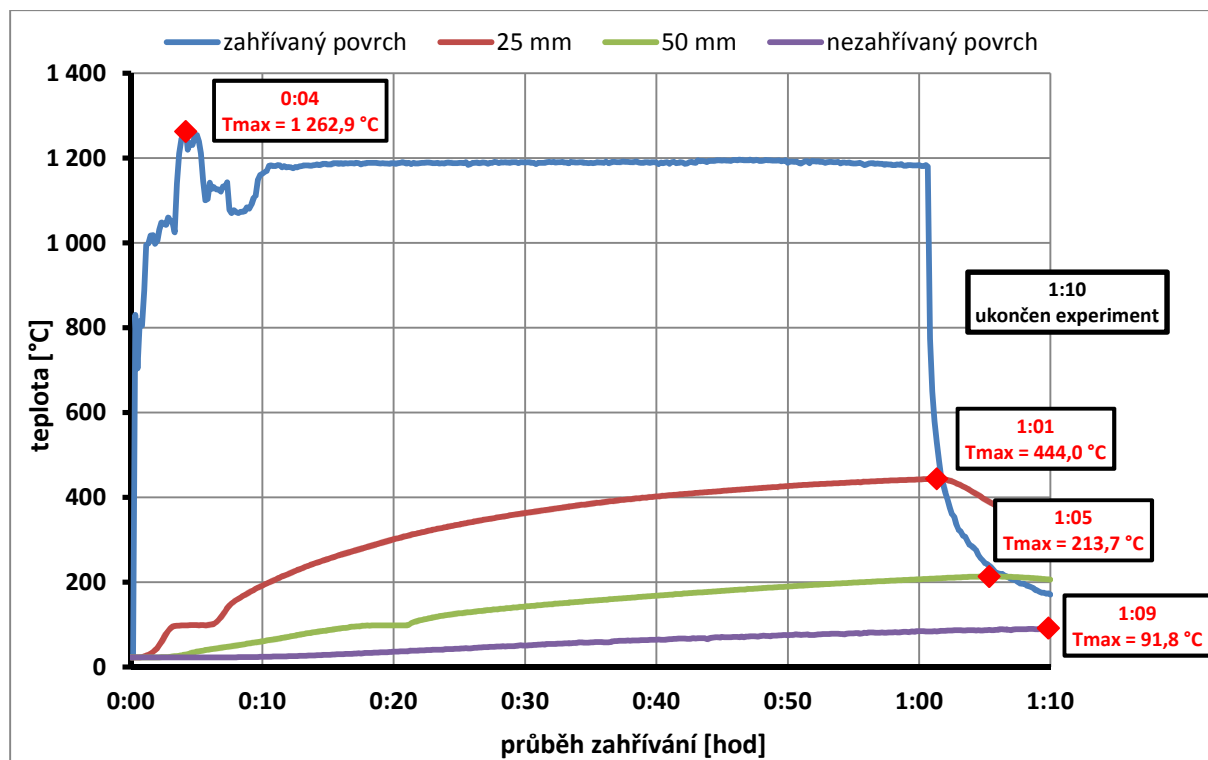
Graf č. 60: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III j (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, polypropylenová vlákna) – vodní uložení



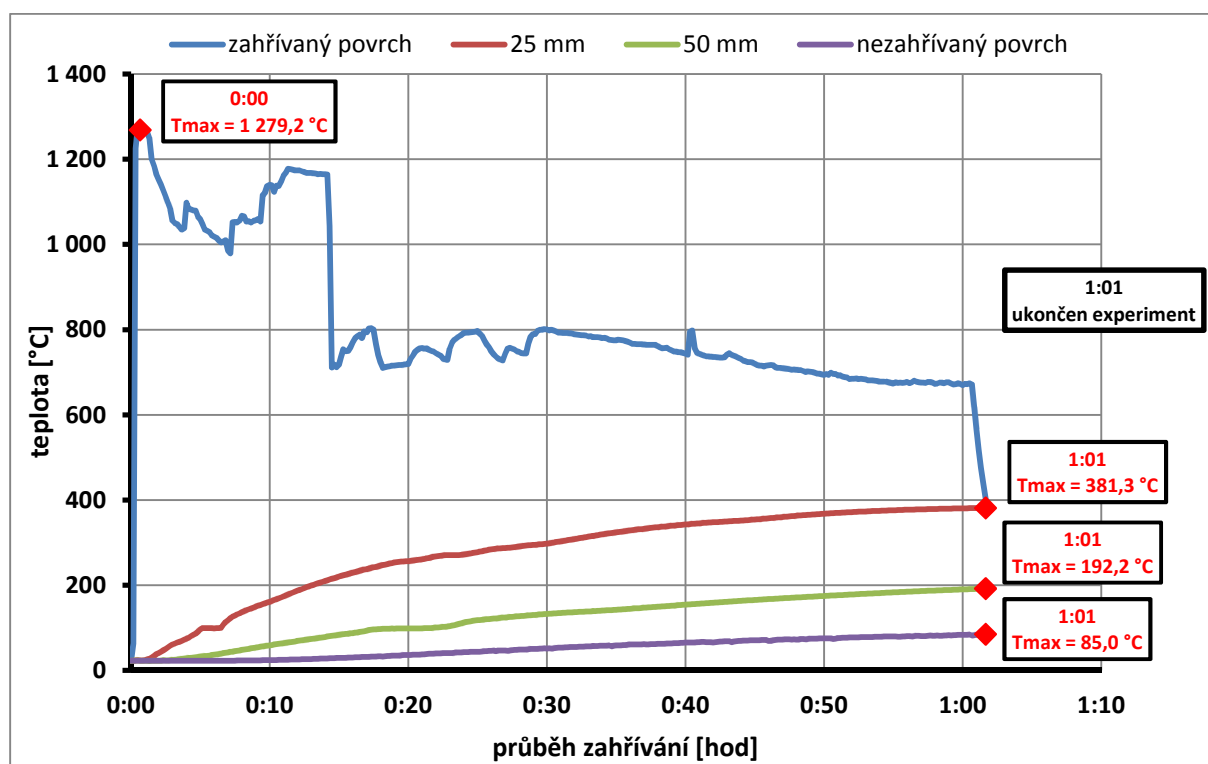
Graf č. 61: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III 1 (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, ocelová vlákna) – vlhké uložení



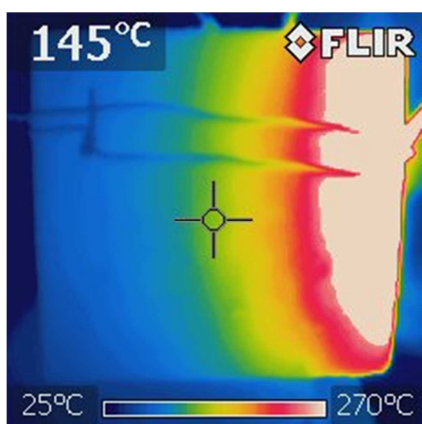
Graf č. 62: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III 1 (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, ocelová vlákna) – vodní uložení



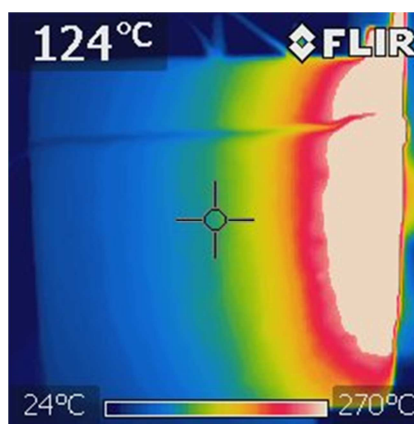
Graf č. 63: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury IV (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice, popílek) – vlhké uložení



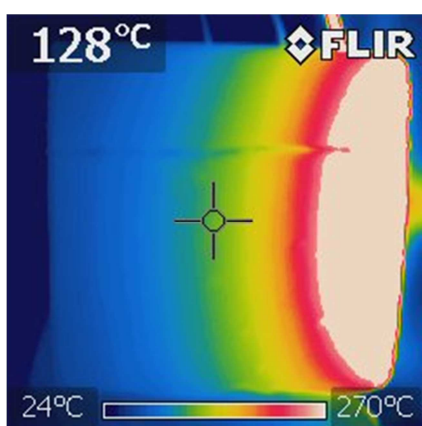
Graf č. 64: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury IV (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice, popílek) – vodní uložení



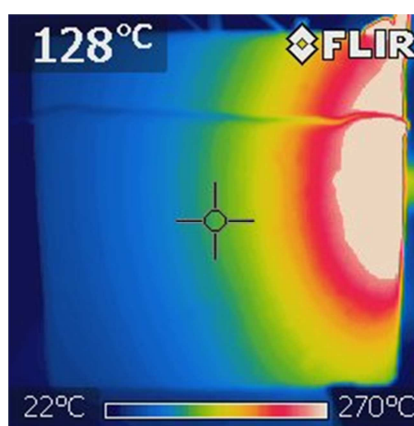
Obr. č. 136: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek II – vlhké uložení



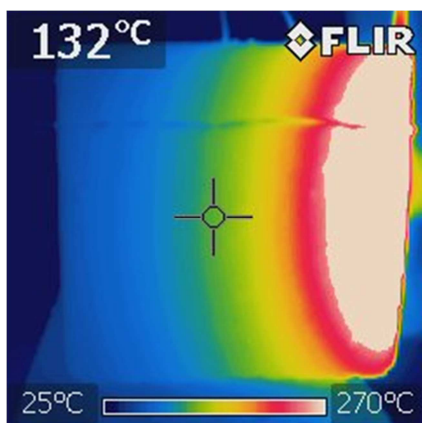
Obr. č. 137: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek II – vodní uložení



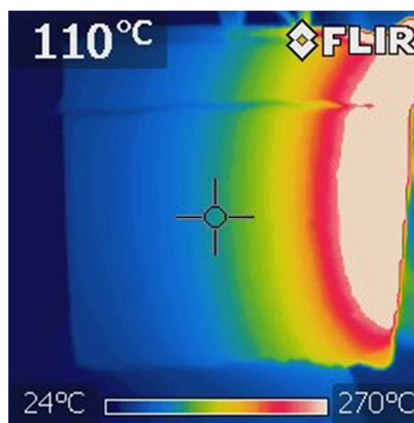
Obr. č. 138: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III i – vlhké uložení



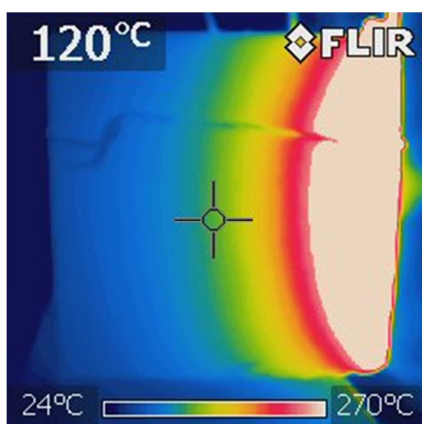
Obr. č. 139: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III i – vodní uložení



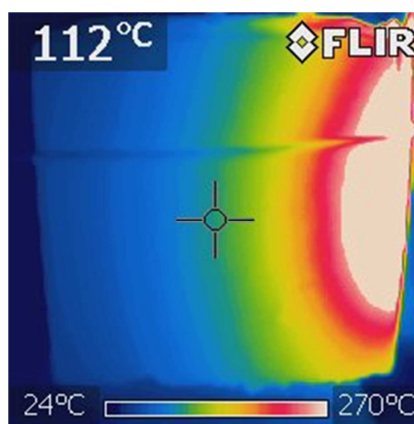
Obr. č. 140: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III j – vlhké uložení



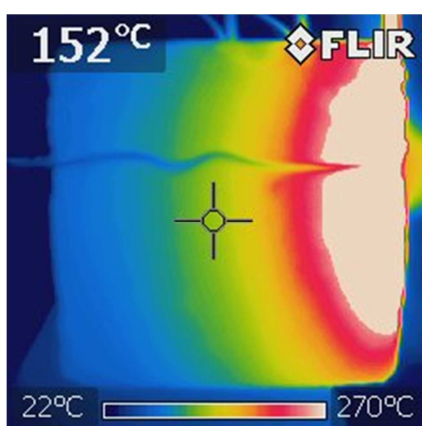
Obr. č. 141: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III j – vodní uložení



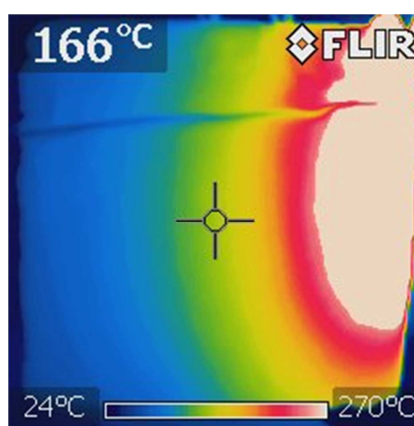
Obr. č. 142: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III l – vlhké uložení



Obr. č. 143: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III l – vodní uložení



Obr. č. 144: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek IV – vlhké uložení



Obr. č. 145: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek IV – vodní uložení

V Tab. č. 57 a Tab. č. 58 je popsáno chování jednotlivých vzorků v průběhu zahřívání. Popis vzorků po teplotním zatížení je v tabulce Tab. č. 59 a fotodokumentace jednotlivých vzorků po teplotním zatížení je na Obr. č. 146 – Obr. č. 155.

Tab. č. 57: Popis jednotlivých vzorků v průběhu zahřívání – vlhké uložení

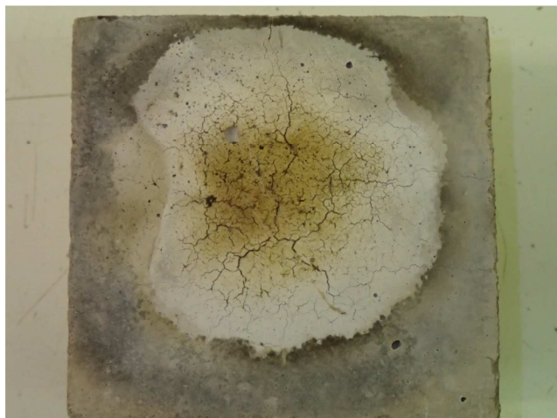
receptura	průběh zahřívání [min]	popis
II	7	- vznik první trhliny na straně s termočládky, kudy uniká vlhkost
III i	-	bez výrazných změn v průběhu zahřívání
III j	-	bez výrazných změn v průběhu zahřívání
III l	-	bez výrazných změn v průběhu zahřívání
IV	1	- explozivní odprýsknutí (hloubka cca 5 mm)
	2	- další explozivní odprýsknutí
	4	- únik vlhkosti z bočních stěn vzorku, rozsáhlý únik vlhkosti a vodní páry v místě druhého termočládku

Tab. č. 58: Popis jednotlivých vzorků v průběhu zahřívání – vodní uložení

receptura	průběh zahřívání [min]	popis
II	0 – 1	- odstřelují malé šupinky cementového tmele
	3	- únik vlhkosti z bočních stěn vzorku, rozsáhlý únik vlhkosti a vodní páry v místě druhého termočlánku
	11	- únik vlhkosti a vodní páry v místě třetího termočlánku
III i	0 – 1	- odstřelují malé šupinky cementového tmele
	1 – 2	- 2× explozivní odprýsknutí (hloubka cca 10 mm)
	3	- explozivní odprýsknutí
	4	- únik vlhkosti z bočních stěn vzorku, rozsáhlý únik vlhkosti a vodní páry v místě druhého termočlánku
III j	10	- únik vlhkosti z boční stěny vzorku
III l	0 – 1	- odstřelují malé šupinky cementového tmele
	4 – 5	- únik vlhkosti z bočních stěn vzorku, rozsáhlý únik vlhkosti a vodní páry v místě druhého termočlánku
IV	0 – 1	- odstřelují malé šupinky cementového tmele
	1	- explozivní odprýsknutí
	4	- únik vlhkosti z bočních stěn vzorku, rozsáhlý únik vlhkosti a vodní páry v místě druhého termočlánku

Tab. č. 59: Popis vzorků po teplotním zatížení

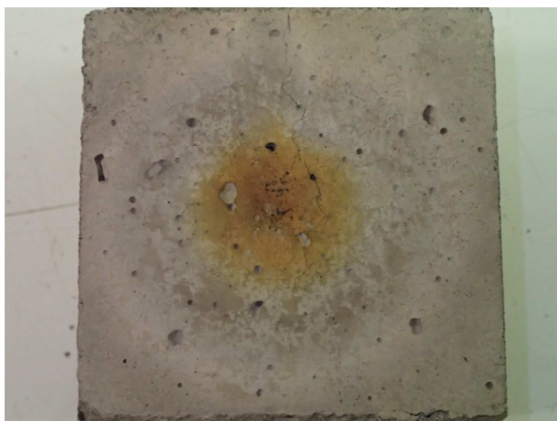
receptura	uložení	maximální hloubka odprýsknutí [mm]	popis
II	VLHKÉ	-	- síť trhlin v exponovaném povrchu, lokální trhliny v bočních stěnách
III i		-	- síť trhlin v exponovaném povrchu, kolmá trhlina v povrchu s termočlánky
III j		-	- síť trhlin v exponovaném povrchu
III l		-	- síť trhlin v exponovaném povrchu, kolmá trhlina v povrchu s termočlánky
IV		5,1	- odprysk vrstvy betonu z exponované strany - lokální trhliny v bočních stěnách - trhliny ve tmelu i kamenivu odprýsklého povrchu
II	VODNÍ	-	- síť trhlin v exponovaném povrchu, lokální trhliny v bočních stěnách
III i		9,7	- odprysk vrstvy betonu z exponované strany - trhliny jen v cementovém tmelu odprýsklého povrchu
III j		-	- síť trhlin v exponovaném povrchu
III l		-	- síť trhlin v exponovaném povrchu
IV		7,6	- odprysk vrstvy betonu z exponované strany - lokální trhliny v bočních stěnách - trhliny ve tmelu i kamenivu odprýsklého povrchu



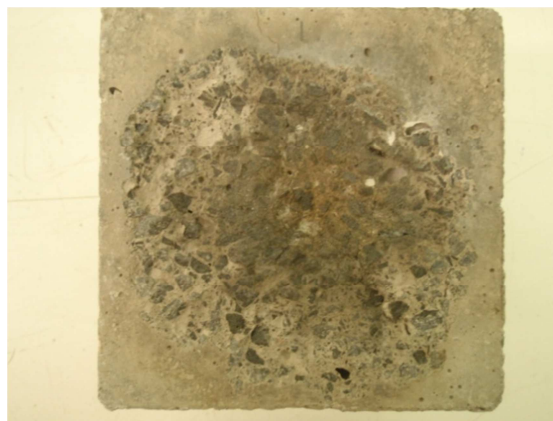
Obr. č. 146: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek II – vlhké uložení (vlhkost 4,4 %, maximální teplota 1 253 °C)



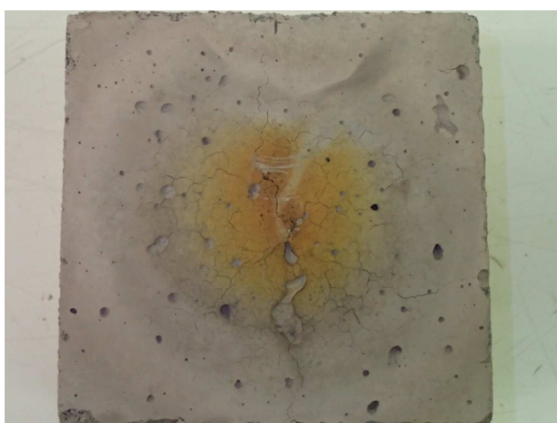
Obr. č. 147: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek II – vodní uložení (vlhkost 6,4 %, maximální teplota 1 232 °C)



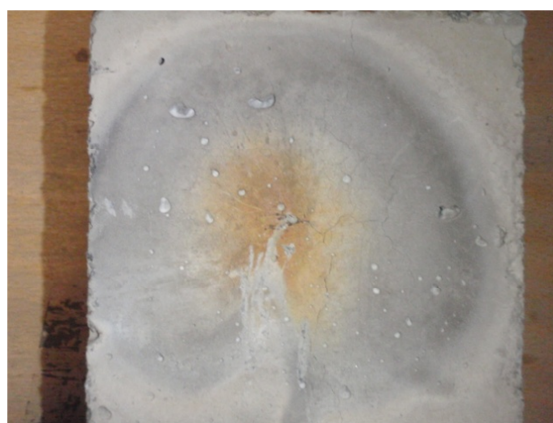
Obr. č. 148: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III i – vlhké uložení (vlhkost 3,7 %, maximální teplota 1 248 °C)



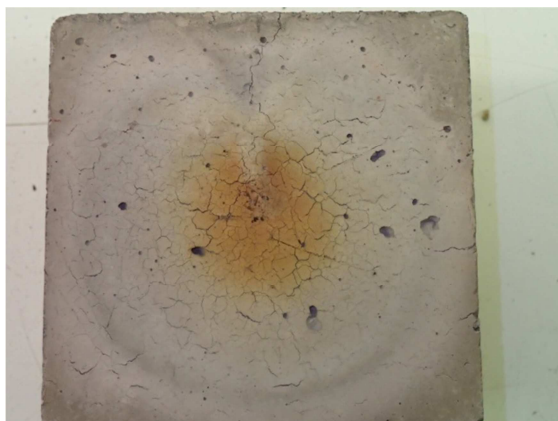
Obr. č. 149: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III i – vodní uložení (vlhkost 5,1 %, maximální teplota 1 293 °C)



Obr. č. 150: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III j – vlhké uložení (vlhkost 4,1 %, maximální teplota 1 262 °C)



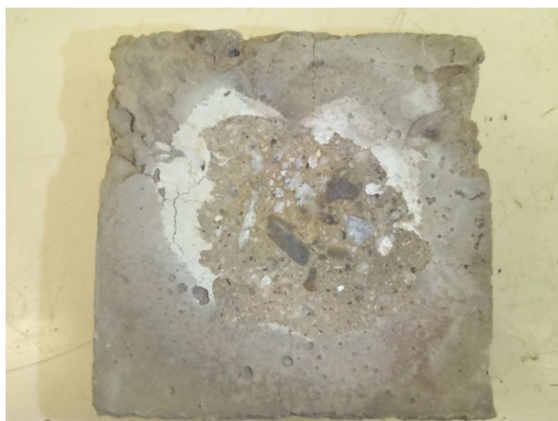
Obr. č. 151: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III j – vodní uložení (vlhkost 4,6 %, maximální teplota 1 282 °C)



Obr. č. 152: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III 1 – vlhké uložení (vlhkost 2,9 %, maximální teplota 1 143 °C)



Obr. č. 153: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III 1 – vodní uložení (vlhkost 4,9 %, maximální teplota 1 199 °C)



Obr. č. 154: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek IV – vlhké uložení (vlhkost 4,2 %, maximální teplota 1 262 °C)



Obr. č. 155: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek IV – vodní uložení (vlhkost 4,4 %, maximální teplota 1 279 °C)

6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

6.1 Etapa I – Výběr vhodného kameniva, sestavení testování odolnosti

Úkolem první etapy byl výběr vhodného kameniva a sestavení testování odolnosti. Bylo vybráno sedm vzorků dostupných druhů kameniv do betonu, tyto byly postupně podrobeny teplotnímu zatížení na různé teplotní stupně s následným testováním pomocí vybraných zkoušek.

6.1.1 Stanovení pevnosti stlačením ve válci

Při porovnání výsledků zkoušky, která by měla být ve své podstatě nejvíce vypovídající o stabilitě kameniva při vysokých teplotách, lze zjistit, že absolutně nejvyšších hodnot pevnosti stlačením ve válci je dosahováno u těžného kameniva Náklo a to ve všech teplotních stupních zatížení. Následuje čedičové kamenivo Bílčice. Toto je však porovnání absolutních hodnot pevností.

Podstatně důležitější je procentuální porovnání pevností vztažených ke vzorkům nezatíženým – referenčním (= 100 %). Největší poklesy pevností zaznamenaly ve všech teplotních stupních kameniva Olbramovice, Lomnička a betonový recyklát (400 °C – pokles o 22 – 36 %, 700 °C – pokles o 40 – 62 %, 1 000 °C – pokles o 74 – 83 %). Z přírodních kameniv je na tom těžné kamenivo Náklo o něco lépe, ale nejmenší poklesy pevnosti z přírodních kameniv dosáhlo čedičové kamenivo Bílčice (400 °C – pokles o 15 %, 700 °C – pokles o 7 %, 1 000 °C – pokles o 27 %).

U dvou vzorků umělého kameniva došlo k mnohem menším poklesům pevnosti, resp. k nárůstu. U lehkého kameniva Liapor došlo ve všech teplotních stupních k mírnému nárůstu pevnosti (400 °C – o 11 %, 700 °C – o 12,7 %, 1 000 °C – o 13,5 %). U sbalkovaného popílku došlo k výraznému nárůstu pevnosti po teplotě 1 000 °C – nárůst o 55 %. Nárůst pevností u těchto umělých kameniv lze u teplot 400 °C a 700 °C odůvodnit ztrátou vody bez poškození mikrostruktury zrn a tím pádem zpevněním materiálu. Při 1 000 °C již pravděpodobně došlo k částečnému zpevnění struktury materiálu slinováním.

Pokud by se mělo vyhodnotit nejvíce odolné kamenivo pouze na základě této zkoušky, byl by to *sbalkovaný popílek*. Naopak nejméně odolný by v tomto případě byl *betonový recyklát*.

6.1.2 Úbytek hmotnosti

Sledování úbytku hmotnosti byla spíše doprovodná zkouška. Také neukázala žádné neočekávané výsledky. K největšímu úbytku hmotnosti došlo u umělých kameniv Liapor a sbalkovaný popílek (po 1 000 °C – 15 % a 13 %). Z důvodu poměrně vysoké pórovitosti a tudíž i nasákavosti těchto kameniv byl úbytek hmotnosti způsoben odpařením vlhkosti ze zrn

těchto kameniv. K velkému úbytku hmotnosti došlo také u betonového recyklátu (po 1 000 °C – 8 %). Tyto výsledky však byly očekávané a souvisí se ztrátou vlhkosti poměrně pórovitých vzorků kameniv. U ostatních vzorků kameniva byla ztráta hmotnosti do 1 % po 1 000 °C, kdy nejnižší hodnoty bylo dosaženo u kameniva čedič (0,4 % po 1 000 °C).

6.1.3 Omezený síťový rozbor

Výsledky omezeného síťového rozboru jsou značně variabilní, především po maximálním stupni teplotního zatížení na 1 000 °C a to jak u síta 4,0 mm, tak i u síta 0,25 mm.

U propadu sítem 4,0 mm došlo k absolutně nejvyššímu nárůstu u kameniva Lomnička (700 °C – nárůst o 1 440 %, 1 000 °C – nárůst o 22 000 %), hned v závěsu je kamenivo Olbramovice asi s pětinovými nárůsty než v případě kameniva Lomnička. K vysokému nárůstu propadu došlo také u betonového recyklátu (700 °C – nárůst o 135 %, 1 000 °C – nárůst o 1 540 %). Nejmenší nárůst propadů byl zaznamenán u těžného kameniva Náklo a lehkého kameniva Liapor (po 1 000 °C – 1,8 % a 3,4 %).

U propadu sítem 0,25 mm bylo dosaženo obdobného trendu. Nejvyššího nárůstu propadu po 1 000 °C však bylo dosaženo u betonového recyklátu (nárůst o 8 980 %), dále pak kamenivo Lomnička (700 °C – nárůst o 466 %, 1 000 °C – nárůst o 3 420 %) a kamenivo Olbramovice (700 °C – nárůst o 327 %, 1 000 °C – nárůst o 1 590 %). Nejmenší nárůst propadů byl zaznamenán u těžného kameniva Náklo a čedičového kameniva Bílčice (po 1 000 °C – 34,3 % a 14,3 %).

Pokud by se mělo vyhodnotit nejvíce odolné kamenivo pouze na základě této zkoušky, bylo by to *těžné kamenivo Náklo*. Naopak nejméně odolné by v tomto případě bylo *kamenivo Lomnička*.

6.1.4 Objemová hmotnost zrn

Objemová hmotnost zrn byla sledována ve třech variantách – objemová hmotnost zrn, objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně, objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených. Předpokladem bylo, že se vzrůstající teplotou se bude zvyšovat pórovitost zrn kameniva a tím pádem se budou snižovat objemové hmotnosti kameniva. V konečném pozorování to tak u většiny vzorků kameniva bylo, avšak rozdíly jednotlivých objemových hmotností jsou spíše zanedbatelné. Je nutné poznamenat, že i samotné zjišťování těchto hodnot je dosti náročné na preciznost provedení.

6.1.5 Nasákavost

Změna nasákavosti v závislosti na stupni teplotního zatížení měla očekávaný vývoj. Se zvyšující se teplotou se zvyšovala i pórovitost jednotlivých vzorků kameniva a tím pádem rostla i jejich nasákavost. Je nutné se vyjádřit k hodnotám nasákavosti u umělých kameniv po 1 000 °C oproti hodnotám nasákavosti po 700 °C. Hodnoty po 1 000 °C jsou cca o ¼ nižší než

po 700 °C, což má souvislost s částečným slinováním zrn kameniva. Tím došlo k částečnému uzavření struktury zrn, což vedlo ke snížení nasákavosti. U vzorků přírodních kameniv měla zvyšující se teplota za následek nárůst nasákavosti, avšak v zanedbatelných mezích, kdy u všech vzorků bylo dosaženo po 1 000 °C nasákavosti cca 2 %. Výjimkou je vzorek betonového recyklátu, kde nasákavost po 1 000 °C dosahovala hodnoty 11 %.

Lze vyhodnotit, že co se týče změny nasákavosti v závislosti na teplotě, je nejstabilnější *čedičové kamenivo Bílčice*, u kterého se hodnoty nasákavosti po všech teplotních stupních pohybovaly kolem 1 %. Naopak nejméně stabilním z hlediska nasákavosti je *betonový recyklát*.

6.1.6 Makroskopické a mikroskopické pozorování

Pozorování z hlediska mikroskopie mělo doplňovat makroskopická pozorování a odhalit případné mikrotrhliny nebo nesoudržné částičky jednotlivých zrn, které nebyly viditelné pouhým okem. Ukázalo se, že tato dvě pozorování spolu úzce korespondují, a mikroskopem byly odhaleny jen zanedbatelné defekty. Nejčastější poruchou byly trhliny v zrnech kameniva, v některých případech (většinou až po 1 000 °C) i celkový rozpad zrn. Ve vzorku betonového recyklátu docházelo k porušení tranzitní zóny mezi kamenivem a cementovým tmelem. U sbalkovaného popílku bylo zjištěno odlupování jednotlivých popílkových zrníček, avšak v minimální míře. U lehkého kameniva Liapor bylo po 1 000 °C zjištěno minimální oddělování prachových částic z jednotlivých zrn.

Na základě makroskopického i mikroskopického pozorování lze vyhodnotit, že nejstabilnějšími kamenivy jsou *čedičové kamenivo Bílčice* (bez rozpadu zrn, minimální změna barvy), *lehké kamenivo Liapor* a *sbalkovaný popílek* (výrazná barevná změna, ale minimální vznik defektů). U ostatních vzorků kameniva došlo ke vzniku trhlin a celkovému rozpadu zrn v různé míře.

6.1.7 RTG difrakční analýza

Ze všech vzorků kameniva byla provedena rentgenová difrakční analýza po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C a po následném ochlazení. Z rentgenogramu nezatěžovaného vzorku (100 °C) byly stanoveny přítomné minerály ve vzorku. V dalších rentgenogramech po (400 °C, 700 °C, 1 000 °C) byly zaznamenány změny, ke kterým došlo při zatížení na danou teplotu a následném ochlazení.

U kameniva Olbramovice byly identifikovány β -křemen, živcové minerály, stopové množství kaolinitu a biotitu. Jediná změna, která byla identifikována (po zahřátí vzorku na 700 °C), byl rozklad kaolinitu. K rozkladu kaolinitu (odstranění strukturní chemicky vázané vody – dehydroxilace, jejíž obsah je 14 %) dochází při teplotě okolo 560 °C, když přechází na metakaolinit. Metakaolinit je rentgenoamorfni – nekystalická fáze a proto již není v difraktogramech po 700 °C a 1 000 °C detekován (zjištění v souladu s [90]).

U kameniva Lomnička byly identifikovány β -křemen, živcové minerály, stopové množství kaolinitu, slídové minerály a maghemit. Po zahřátí na 700 °C došlo, stejně jako u

kameniva Olbramovice, k rozkladu kaolinitu. Po zahřátí na 700 °C byla také zaznamenána dehydratace maghemitu (minerál, v němž je obsažena γ modifikace oxidu železitého, minerál podobný limonitu [91]).

U kameniva Náklo byly identifikovány β -křemen, živcové minerály a stopové množství kaolinitu a biotitu. Jediná změna, která byla identifikována (po zahřátí vzorku na 700 °C), byl opět rozklad kaolinitu.

V betonovém recyklátu byly identifikovány β -křemen, živcové minerály, stopové množství kalcitu a biotitu. Po zahřátí vzorku na 1 000 °C byl identifikován částečný rozklad kalcitu. K disociaci kalcitu dochází v rozmezí teplot 700 °C – 900 °C (zjištění v souladu s [90]).

Ve sbalkovaném popílku byly identifikovány mullit, β -křemen a stopové množství kalcitu. Po zahřátí vzorku na 1 000 °C byl identifikován částečný rozklad kalcitu. Výraznější změnou detekovanou po zahřátí na 1 000 °C byl vznik anortitu. Ke vzniku anortitu dochází při teplotách mezi 800 °C – 900 °C a přítomnost tohoto minerálu svědčí o počínajícím slinování (zjištění v souladu s [90]).

U kameniva Bílčice byly identifikovány andezit, augit, titanaugit a nefelin. Po jednotlivých stupních teplotního zatížení nebyly zjištěny žádné výrazné změny, které by bylo nutné komentovat.

Rentgenogramy lehkého kameniva Liapor byly po všech stupních teplotního zahřívání totožné, kdy byl identifikován pouze β -křemen.

Pro následnou vysokoteplotní rentgenovou difrakční analýzu v teplotní komoře při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C, 1 000 °C a také při pokojové teplotě před zahříváním a po zahřívání byly vybrány tři vzorky kameniva (Bílčice – nejstabilnější přírodní kamenivo, Lomnička – nejméně stabilní přírodní kamenivo, sbalkovaný popílek – umělé kamenivo).

U kameniva Bílčice byl při teplotách mezi 700 °C a 1 000 °C zaznamenán vznik hematitu, který byl identifikován při aktuální teplotě 1 000 °C ale i po ochlazení vzorku. Ke vzniku hematitu došlo pravděpodobně oxidací magnetitu, který je v kamenivu Bílčice přítomen (viz Tab. č. 29).

U kameniva Lomnička byly zaznamenány změny při teplotách mezi 400 °C a 700 °C. Byl zaznamenán rozklad kaolinitu, který byl identifikován již v rentgenogramu vzorku zahřátého na 700 °C a po ochlazení. Poměrně zajímavé bylo zaznamenání částečného tavení živců – počátek pyroplastického stavu (snížení příslušných píků). Tato změna je však reversibilní, když po ukončení zahřívání a následném ochlazení byly opět identifikovány příslušné píky živcových minerálů.

U sbalkovaného popílku bylo zaznamenáno nejvíce změn. Především je nutné okomentovat přítomnost platiny v průběhu celého zahřívání. Výskyt platiny byl z důvodu nedokonalé přípravy zkušební vzorku, který se do teplotní komory umísťuje na platinovou folii. Část platinové folie byla odhalena, a proto je platina identifikována i v jednotlivých

rentgenogramech. Mezi teplotami 400 °C a 700 °C došlo k rozkladu kalcitu. Významnou změnou je vznik anortitu mezi teplotami 700 °C a 1 000 °C. Ke vzniku anortitu dochází za přítomnosti CaO při teplotách mezi 800 °C – 900 °C a přítomnost tohoto minerálu svědčí o počínajícím slinování [90].

Po shrnutí výsledků provedených rentgenových analýz jednotlivých vzorků kameniva se jednoznačně jako teplotně nejstabilnější jeví kamenivo *Liapor* (na rentgenogramech nebyly zaznamenány žádné změny). Nejvíce změn bylo zaznamenáno u *sbalkovaného popílku* (rozklad kalcitu, vznik anortitu) a to jak na rentgenogramech po zahřátí a následném ochlazení, tak na vysokoteplotních rentgenogramech při aktuálních teplotách (v teplotní komoře). Vznik anortitu však svědčí o částečném slinování materiálu, což je změna spíše pozitivní, protože tak dochází ke zpevnění struktury.

6.1.8 Celkové shrnutí etapy I

Cílem této etapy bylo vybrat nejvhodnější kamenivo do tepelně odolných cementových kompozitů na základě souboru několika zkoušek. Byla tedy sestavena testovací metodika, která má být na základě dosažených výsledků vhodně modifikována.

Ze souboru přírodních kameniv dosáhlo, v závislosti na teplotním zatěžování, jednoznačně nejstabilnějších výsledků *čedičové kamenivo Bílčice*. S nejhorší stabilitou po teplotním zatížení se projevila kameniva Lomnička a Olbramovice. Co se týče umělých kameniv (Liapor, sbalkovaný popílek), obstála v průběhu testování tepelné odolnosti obě kameniva velmi dobře. Přece jenom větší potenciál však naznačuje *sbalkovaný popílek*, především z důvodu výrazného nárůstu pevnosti stlačením ve válci po 1 000 °C.

Sestavená metodika ukázala možnosti testování tepelné odolnosti kameniva a bylo s její pomocí získáno mnoho zajímavých výsledků. Na základě vyhodnocení výsledků však lze říci, že některé zkoušky lze z navržené metodiky vypustit. Především vzhledem k jejich náročnosti a vzhledem k nedosažení vypovídajících diferencí ve výsledcích. Zkoušky, které lze z metodiky vypustit jsou:

- stanovení úbytku hmotnosti
- stanovení objemových hmotností zrn kameniva
- nasákavost

Za podstatné zkoušky v metodice testování tepelné odolnosti kameniva považují:

- stanovení pevnosti stlačením ve válci
- omezený síťový rozbor
- pozorování makroskopické i mikroskopické

6.2 Etapa II – Výběr vhodných vláken a ověření jejich účinnosti

6.2.1 Etapa II – část A

V etapě II – část A výběru vhodných vláken a ověření jejich účinnosti byly vzorky z cementového betonu s polypropylenovou rozptýlenou výztuží podrobeny teplotnímu zatížení v laboratorní sušárně na maximální teploty 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C. Po tomto teplotním zatížení byly na vzorcích sledovány změny fyzikálně – mechanických vlastností a mikrostruktury a bylo provedeno srovnání s nezatěžovanými vzorky betonu. Cílem části A druhé etapy bylo primárně ověřit chování polypropylenových vláken při zatížení vysokými teplotami. Sekundárně byly sledovány změny fyzikálně – mechanických vlastností při různých stupních teplotního zatížení.

6.2.1.1 Fyzikálně – mechanické vlastnosti

Rozdíly objemové hmotnosti mezi vzorky zatěžovanými na 20 °C a 100 °C, 150 °C lze přisuzovat ztrátě volné vody obsažené ve vzorcích. Snížení objemové hmotnosti u vzorků zatěžovaných na 200 °C je již pravděpodobně způsobeno vyprcháním polypropylenových vláken, čímž se více propojila pórová struktura cementové matrice a bylo umožněno úniku uzavřené vodní páry z matrice betonu. Po zatížení na 250 °C sice došlo k mírnému navýšení objemové hmotnosti (o 3 % oproti hodnotě po 200 °C), avšak hodnota navýšení je vzhledem k dosaženým absolutním hodnotám zanedbatelná.

Sledováním vývoje pevnosti v tlaku betonu se zjistilo, že s nárůstem teploty do 150 °C dochází k nárůstu pevnosti v tlaku. Po zatížení na teplotu 100 °C došlo k navýšení pevnosti o 9 %, na teplotu 150 °C k navýšení o 28 %. Zvýšení pevnosti při takovýchto teplotách je způsobeno ztrátou vlhkosti – částečným vysušením, čímž dochází ke zpevnění betonové struktury. Po zatížení na 200 °C došlo naopak k mírnému poklesu a pevnost betonu v tlaku dosahovala stejných hodnot jako po zahřátí na 100 °C. Částečný pokles pevnosti lze přičíst snížené hutnosti cementového kamene z důvodu vytavení již větší části polypropylenových vláken. Následné opětovné zvýšení pevnosti v tlaku po 250 °C, které se nazývá „tzv. kvazizpevnění“, je způsobeno urychlením hydratačních procesů u mladého betonu (popsáno v 2.8.1.1).

Vývoj pevnosti v tahu ohybem je v důsledku působících teplot sestupný. Po teplotách 100 °C a 150 °C sice došlo k mírnému nárůstu (o 5 % a 2 %), tento však je zanedbatelný a velmi pravděpodobně je následkem ztráty vlhkosti – vysušením. Při vyšších teplotách již došlo k výraznějšímu poklesu pevnosti v tahu ohybem (po 200 °C – pokles o 21 %, po 250 °C – pokles o 24 %).

Výsledky pevnosti v příčném tahu po jednotlivých stupních teplotního zatížení neukazují žádný trend a pohybují se v rozmezí ± 6 %. Po teplotě 250 °C bylo dokonce dosaženo stejné hodnoty jako bez teplotního zatížení.

Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu má silně sestupnou tendenci v závislosti na rostoucí teplotě. Po zatížení na 200 °C byly zjištěné hodnoty asi poloviční oproti hodnotám

zjištěným na nezatížených tělesech. Po 250 °C došlo k mírnému nárůstu (o 10 % oproti hodnotám po 200 °C), ale přesto bylo dosaženo pouze 64 % pevnosti povrchových vrstev betonu bez zatížení.

Změny statických a dynamických modulů pružnosti v závislosti na působící teplotě mají téměř shodný průběh. Nejprve dochází k mírnému nárůstu (statický modul pružnosti - po 100 °C nárůst o 13 %, dynamický modul pružnosti – po 150 °C nárůst o 6 %). Po zatížení na 200 °C dochází shodně k poklesu hodnot (statický modul pružnosti o 13 %, dynamický modul pružnosti o 7 %). Teplota 250 °C má na statický a dynamický modul pružnosti betonu podobný efekt jako na pevnost v tlaku, kdy dochází ke „kvazizpevnění“ (popsáno v 2.8.1.1). Statický modul pružnosti se zvýšil o 9 % a dynamický o 12 % oproti hodnotám vzorků bez zatížení.

6.2.1.2 Ověření chování polypropylenových vláken

Hlavním cílem této etapy bylo ověření teoretické znalosti o vyhoření polypropylenových vláken při teplotním zatížení, v důsledku čehož dojde ke zvětšení pórové struktury cementové matrice. Vznikne pórová struktura betonu, kudy může při vyšších teplotách expandovaná vodní pára unikat bez toho, aby výrazně poškodila mikrostrukturu betonu.

Vizuálním sledováním povrchu vzorků bylo zjištěno, že k vyhoření vláken došlo již u vzorků zatěžovaných na 150 °C, zatímco u vzorků zatěžovaných na 100 °C byla ještě polypropylenová vlákna v cementové matrici zakotvena. Toto je potvrzeno i snižující se objemovou hmotností v závislosti na rostoucí teplotě zatěžování.

Pozorováním mikrostruktury zatěžovaných vzorků pomocí optického mikroskopu bylo potvrzeno vizuální zjištění o vyhoření polypropylenových vláken. U nezatěžovaných vzorků a u vzorků zatěžovaných na 100 °C byla polypropylenová vlákna v cementové matrici bez porušení. U vzorků zatížených na 150 °C byla polypropylenová vlákna vyhořelá pouze na povrchu vzorku, zatímco uvnitř vzorku byla jen částečně tepelně zdeformována. U vzorků zatěžovaných na 200 °C a 250 °C již nebyla zjištěna přítomnost polypropylenových vláken ani uvnitř vzorku. U pozorovaných vzorků byly objeveny mikrotrhliny v cementové matrici až při teplotách 200 °C a 250 °C. V kamenivu nebyly objeveny žádné defekty ani při jednom stupni teplotního zatížení.

Pro ověření chování vláken v matrici byla provedena i zkouška stanovení množství, velikosti a distribuce vzduchových pórů v betonu, tzv. Spacing Factor. Důvodem provedení zkoušek byl předpoklad, že se zvyšující se teplotou a tím pádem zvyšujícím se množstvím vyhořelých vláken se bude zvyšovat i množství celkového, mikroskopického vzduchu a především počet pórů v dané třídě. Zvyšující se trend celkového množství vzduchu v cementové matrici se zvyšující se teplotou byl do jisté míry potvrzen. Použitá vlákna v této etapě byla o průměru 5 μm. Zaznamenaný počet tětív ve třídě pórů 0 – 10 μm má zvyšující se tendenci v závislosti na zvyšující se teplotě. Lze tedy předpokládat, že množství vyhořelých vláken se promítlo do vzestupné tendence zaznamenaných tětív v této třídě.

6.2.1.3 Celkové shrnutí etapy II – část A

Z první části, kde byly sledovány fyzikálně – mechanické vlastnosti lze udělat následující závěry. Na pevnost v tlaku, statický a dynamický modul mají teploty v rozmezí 20 °C – 250 °C obdobný vliv. Nejprve dochází k mírnému nárůstu hodnot, následuje mírný pokles a po 250 °C dochází opět k nárůstu. Zjištěný vývoj koresponduje s poznatky popsány v teoretické části práce, při teplotách okolo 100 °C dochází ke zpevnění struktury cementové matrice z důvodu ztráty vlhkosti – vysušení. Při teplotách 200 °C – 300 °C nastává jev „kvazizpevnění“, který se projevuje zejména u mladých betonů, kdy dochází k urychlení hydratačních procesů (popsáno v 2.8.1.1). Mírné snížení pevnostně – dynamických charakteristik při 200 °C je způsobeno snížením hutnosti cementového tmele v důsledku vyhoření vláken. Pevnost v tahu ohybem a pevnost v tahu povrchových vrstev betonu mají sestupnou tendenci v závislosti na zvyšující se teplotě.

Ostatními zkouškami a pozorováním (vizuální pozorování, mikroskopické pozorování, stanovení množství, velikosti a distribuce vzduchových pórů v betonu) bylo potvrzeno postupné vyhořívání polypropylenových vláken z cementové matrice se zvyšující se teplotou.

6.2.2 Etapa II – část B

V rámci této etapy byly zkušební vzorky podrobeny zjišťování základních fyzikálně - mechanických vlastností po teplotním zatěžování na teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C a 1 000 °C. Po teplotním zatěžování byla navíc provedena detailní fotodokumentace povrchů se zaměřením na sledování vzniklých trhlin a velikosti jejich rozevření. Výsledkem měl být výběr vhodných vláken do tepelně odolných cementových směsí a ověření jejich účinnosti.

6.2.2.1 Fyzikálně – mechanické vlastnosti

Při vyhodnocení základních fyzikálně – mechanických vlastností směsí v čase, tedy bez teplotního zatížení, lze říci, že druh vláken nemá zásadní vliv na pevnostní charakteristiky. Přesto si lze povšimnout, že nejvyšších pevností (v tahu za ohybu, v tlaku) bylo dosaženo u směsi s vlákny UltraFibre 500. Naopak nejnižších pevností bylo dosaženo u směsi referenční (bez vláken). Tento výsledek lze odůvodnit příznivým účinkem jemných mikrovláken v raných stádiích zrání betonových vzorků, když tato vlákna zabrání vzniku mikrotrhlin v cementové matrici v průběhu počátečních fází hydratace.

Po teplotním zatížení došlo, dle očekávání, se vzrůstajícím teplotním stupněm k čím dále výraznějšímu poklesu objemové hmotnosti. Pokles objemové hmotnosti byl zaznamenán v mezích od 1 % (při působení teploty 200 °C) do 7,8 % (při působení teploty 1 000 °C). Nejmenší pokles objemové hmotnosti po působení 1 000 °C byl zaznamenán u směsi s vlákny Fibrin 615 (pokles o 5,4 %) a největší pokles objemové hmotnosti byl zaznamenán u směsi s vlákny UltraFibre 500 (pokles o 7,8 %).

Při porovnávání pevnostních charakteristik po zatížení vzorků vysokými teplotami vzhledem ke vzorkům bez teplotního zatížení nebyl zaznamenán očekávaný pozitivní vliv vláken. Z vyhodnocení změny pevnosti v tahu za ohybu vyplývá že při zatížení na 200 °C

došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o 3,0 – 15,9 % (UltraFibre 500 – Fibrin 615), při zatížení na 400 °C došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o 25,4 – 39,4 % (Fibrin 615 – UltraFibre 500), při zatížení na 600 °C došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o 50,8 – 71,9 % (Cem-FIL 60/3 – bez vláken), při zatížení na 800 °C došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o 78,5 – 83,3 % (Cem-FIL 60/3 – UltraFibre 500) a při zatížení na 1 000 °C došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o 89,5 – 92,4 % (bez vláken – UltraFibre 500). Z vyhodnocení změny pevnosti v tlaku vyplývá, že při zatížení na 200 °C došlo k poklesu pevnosti v tlaku o 0,9 – 11,8 % (UltraFibre 500 – vlákna Fibrin 615), při zatížení na 400 °C došlo k poklesu pevnosti v tlaku o 4,5 – 17,3 % (bez vláken – Fibrin 615), při zatížení na 600 °C došlo k poklesu pevnosti v tlaku o 24,6 – 45,0 % (UltraFibre 500 – Fibrin 615), při zatížení na 800 °C došlo k poklesu pevnosti v tlaku o 48,9 – 61,6 % (UltraFibre 500 – bez vláken), při zatížení na 1 000 °C došlo k poklesu pevnosti v tlaku o 81,3 – 87,5 % (bez vláken – Fibrin 615). Uvedené výsledky lze shrnout ve zjištění, že na základě pevnosti v tlaku nejlépe odolala vysokým teplotám směs s přírodními mikrovlákný UltraFibre 500 a naopak nejméně odolala směs s polypropylenovými vlákny Fibrin 615.

6.2.2.2 Sledování a fotodokumentace poruch

Při detailním sledování povrchů vzorků po teplotním zatížení bylo zjištěno, že mimo změny zbarvení povrchů došlo u některých směsí i ke vzniku trhlinek v povrchu a ke vzniku povrchových odlupujících se šupinek. Počátek vzniku trhlin byl zaznamenán po zatížení vzorků na teplotu 600 °C a to u všech vzorků, avšak s různou intenzitou. U vzorků zatížených na nižší teploty nebyly zjištěny žádné defekty. Největší rozsah trhlin byl zjištěn u směsi s přírodními mikrovlákný UltraFibre 500.

6.2.2.3 Celkové shrnutí etapy II – část B

Na základě fyzikálně – mechanických vlastností se zdá, že nejlépe vysokým teplotám odolala směs s přírodními mikrovlákný UltraFibre 500 a naopak nejméně odolala směs s polypropylenovými vlákny Fibrin 615. Tuto skutečnost si lze vysvětlit tím, že přírodní mikrovlákná UltraFibre 500 mají z použitých vláken v této etapě největší průměr a jsou zároveň nejkratší. Při jejich vyhoření byla tedy hutnost cementové matrice oslabena mnohem méně, než u vláken Fibrin, která jsou asi třikrát delší a mají asi třikrát menší průměr vlákna. Jejich počet v cementové matici musí být zákonitě několikanásobně vyšší, čímž při vyhoření sníží hutnost cementové matrice mnohem více.

Očekávaný pozitivní vliv rozptýlené výztuže oproti směsi bez vláken se v této etapě experimentálních prací neprojevil. Z toho plyne závěr, že rozptýlená výztuž, v podobě jemných mikrovláken, nedokáže zabránit ani omezit defektům, ke kterým dochází v cementové matici, při všesměrném působení vysokých teplot na betonový vzorek.

6.3 Etapa III – Vývoj betonu s cementovou maticí s vyšší odolností vůči vysokým teplotám

6.3.1 Etapa III – část A

V rámci etapy III – část A byly série zkušebních vzorků zatěžovány na teploty 200 °C, 400 °C, 660 °C a 800 °C. Jednotlivé směsi se lišily v použitém kamenivu (čedičové kamenivo, lehké kamenivo Liapor), v kombinaci se čtyřmi druhy cementů. Na vzorcích byla provedena diagnostika před a po teplotním zatížení.

6.3.1.1 Pevnostní charakteristiky

Změny objemových hmotností po stupních teplotního zatížení vykazují mírné rozptyly mezi jednotlivými směsmi, avšak nebyl vyzorován žádný trend vlivu použitého druhu cementu. U směsí s čedičovým kamenivem se pokles objemové hmotnosti po 800 °C pohybuje v rozmezí 3,5 – 5 %. U směsí s kamenivem Liapor se pokles objemové hmotnosti po 800 °C pohybuje v rozmezí 10,5 – 13 %.

Přehled výsledků pevností v tlaku již ukazuje určitý trend vlivu použitého druhu cementu. Vliv použitého druhu kameniva je výrazný. U směsí s čedičovým kamenivem je dosahováno vyšších absolutních hodnot. Toto je však dáno samotnou podstatou obou kameniv, kdy čedičové kamenivo je nepoměrně pevnější s mnohem hutnější strukturou zrna. Zajímavé také je, že ačkoli u směsí s čedičovým kamenivem se všemi druhy cementu došlo po teplotách 200 °C a 400 °C ke „kvazizpevnění“ (popsáno v 2.8.1.1) u směsí s Liaporem k tomuto jevu nedošlo. Navýšení pevnosti v tlaku bylo u některých směsí výrazné, kdy největší nárůst pevnosti byl zaznamenán u směsi III d po 200 °C – došlo k nárůstu pevnosti v tlaku o 45,6 %.

Z grafu absolutních hodnot pevností v tlaku, ale i z grafu procentuálního porovnání poklesu pevnosti v tlaku lze vyčíst, že nejvyšších hodnot, resp. nejnižších poklesů, dosahují směsi III b, III c, III f, III g. Nejmarkantněji je to viditelné v grafickém zpracování procentuálního porovnání poklesu pevnosti v tlaku po teplotách 660 °C a 800 °C. Tyto směsi s použitím čedičového kameniva i kameniva Liapor byly namíchány z portlandských směsných cementů (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R; CEM II/B-S 32,5 R). U směsí III b a III c došlo po 660 °C k poklesu pevnosti v tlaku asi o 40 %, zatímco u směsí III a a III d, při stejné teplotě, došlo k poklesu asi o 60 %. Při teplotě 800 °C došlo u směsí III b a III c k poklesu pevnosti v tlaku asi o 55 %, u směsí III a a III d při stejné teplotě došlo k poklesu asi o 70 %. U směsí s použitím kameniva Liapor jsou rozdíly poklesu pevností v tlaku v závislosti na použitém druhu cementu obdobné. Nejvyšší poklesy pevností byly zaznamenány, dle očekávání, u směsí s použitím čistého portlandského cementu.

Přehled výsledků pevností v tahu za ohybu ukazuje obdobný trend, jaký byl zaznamenán u výsledků pevností v tlaku. Vyšších absolutních hodnot je opět dosahováno s čedičovým kamenivem. Také bylo zaznamenáno určité navýšení hodnot pevností v tahu za ohybu, a to částečně i u směsí s kamenivem Liapor. K navýšení však došlo pouze po teplotě 200 °C, ne u všech směsí a maximálně asi o 30 %.

Nejvyšší hodnoty pevností v tahu za ohybu, resp. nejnižší poklesy, byly analogicky zaznamenány u směsí s použitím portlandských směsných cementů. Naopak nejvyšší poklesy pevností v tahu ohybem byly zjištěny u směsí s čistě portlandským cementem.

6.3.1.2 Nedestruktivní zkoušky

Výsledky zkoušky, která měla za úkol jistým způsobem kvantifikovat defekty vnitřní struktury jednotlivých vzorků – rychlost šíření impulsů, kopírují poznatky získané při vyhodnocení destruktivních zkoušek (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu). Absolutních hodnot rychlostí šíření impulsů bylo dosaženo asi o 15 % vyšších u směsí s čedičovým kamenivem než u směsí s kamenivem Liapor. Jednoznačné zdůvodnění spočívá v hutnější struktuře betonu vzorků s čedičovým kamenivem z důvodu vyšší hutnosti samotného čedičového kameniva oproti kamenivu Liapor. S rostoucí teplotou zatížení dochází k očekávanému postupnému poklesu rychlostí šíření impulsů. Důvodem jsou defekty vzniklé ve struktuře cementového tmele, čímž se snižuje jeho hutnost a tím pádem dochází ke zpomalení průchodu impulsů vzorkem. V grafickém zpracování výsledků procentuálního porovnání poklesu rychlosti šíření impulsů lze vyčíst, že k nejmenším poklesům rychlostí dochází u směsí s použitím portlandských směsných cementů a naopak k největším poklesům dochází u směsí s použitím čistého portlandského cementu. Po 800 °C došlo u směsí III f a III g k poklesu asi o 42 %, zatímco u směsi III e asi o 52 %.

Vyhodnocení porušení povrchu vzorků po stupních teplotního zatížení, které se pohybují v rozmezí 0 – 1,5 % poruch z plochy celého zkoumaného povrchu, vykazuje stejný trend jako u předešlých zkoušek. K nejmenšímu porušení povrchu vzorků po 660 °C i 800 °C došlo u vzorků vyrobených z portlandských směsných cementů. Výjimkou je pouze porušení vzorku směsi III c po teplotě 800 °C, kde bylo dosaženo absolutně největšího rozsahu porušení povrchu vzorku 1,483 %. Tato výchylka je však ojedinělá a zásadně nenarušuje zjištěné závěry. Pokud by měl být vyhodnocen vliv použitého druhu kameniva na rozsah porušení povrchu vzorků je zřejmé, že vzorky s čedičovým kamenivem byly v tomto ohledu více stabilní.

6.3.1.3 Celkové shrnutí etapy III – část A

Smyslem experimentálních prací této etapy bylo ověřit chování jednotlivých směsí s různými druhy cementů a kameniva, při zatížení vysokými teplotami. Ze souboru výsledků fyzikálně – mechanických vlastností, rychlosti šíření impulsů, porušení povrchu vzorků jsem dospěl k jednoznačným závěrům. Vzorky s použitím portlandských směsných cementů byly po zatížení vysokými teplotami, co se týče sledovaných parametrů, nejstabilnější. Pokud by měl být vyhodnocen vliv použitého druhu kameniva na odolnost vůči vysokým teplotám je zřejmé, že vzorky s čedičovým kamenivem byly v tomto ohledu více stabilní.

6.3.2 Etapa III – část B

V rámci této části etapy III byly série zkušebních vzorků, které se lišily v použité rozptýlené výztuži (polypropylenová, nízkouhlíková ocelová) a ve způsobu uložení vzorků

(vlhko, voda), zatěžovány na teploty 400 °C a 660 °C. Na zkušebních vzorcích byla provedena diagnostika před a po teplotním zatížení.

6.3.2.1 Pevnostní charakteristiky

Současně s pevnostními charakteristikami vzorků po teplotním zatížení byly sledovány i změny objemových hmotností vzorků. Je logické, že u vzorků z vodního uložení, došlo k výraznějšímu poklesu objemových hmotností na rozdíl od vzorků uložených ve vlhkém prostředí. Celkem překvapivé je, že u vzorků s použitou polypropylenovou výztuží Fibrin 315, došlo k nejmenšímu snížení objemových hmotností a to při vodním i vlhkém uložení vzorků. Rozdíly však nejsou nijak výrazné. Po teplotě 660 °C se objemová hmotnost u vzorků z vlhkého uložení snížila o 3 – 4,5 %, u vzorků z vodního uložení o 7 – 8,5 %.

Po 400 °C došlo u většiny vzorků k navýšení pevnosti v tlaku (navýšení o 8 – 75 %), jev tzv. „kvazipevnění“ (popsáno v 2.8.1.1). U vzorků uložených ve vodě však navýšení pevnosti bylo výraznější. Po 660 °C již shodně došlo k poklesu pevností v tlaku v rozmezí 3 – 38 %. Bylo očekáváno, že vzorky uložené ve vodním prostředí zaznamenají výraznější pokles pevností v tlaku oproti vzorkům uloženým ve vlhkém prostředí. Tento předpoklad se však nepotvrdil. Pokud se zaměříme na vliv použitých vláken na změnu pevnosti v tlaku, je zřejmé, že nejméně poklesly pevnosti u vzorků s 2 kg polypropylenových vláken.

Hodnoty pevností v tahu za ohybu poklesly u všech vzorků po teplotním zatížení na 400 °C i 660 °C. Jediný směřodatný závěr, který lze z výsledků pevností v tahu za ohybu vysledovat je vliv uložení vzorků. Poklesy pevností v tahu za ohybu jsou o něco větší u vzorků z vodního uložení než u vzorků z vlhkého prostředí.

6.3.2.2 Nedestruktivní zkoušky

Pozorování změny rychlosti šíření impulsů potvrdilo vliv prostředí během zrání vzorků. Po 660 °C došlo k poklesu rychlosti šíření impulsů u vzorků z vlhkého prostředí o 35 – 60 %, u vzorků z vodního uložení o 45 – 70 %. Důvodem většího poklesu u vzorků z vodního uložení je předpokládaná větší vlhkost vzorků před zahříváním. Při zahřívání se tato vlhkost uvolňuje ze struktury vzorků a způsobuje tak defekty v matici vzorků. Při porovnání vlivu vláken, lze zjistit, že při použití polypropylenových vláken jsou poklesy rychlosti šíření impulsů vyšší oproti vzorkům bez vláken a také se zvyšují se zvyšující se dávkou vláken. Důvodem je vyhoření většího či menšího množství polypropylenových vláken při těchto teplotách, čímž dojde ke zvětšení pórové struktury cementové matrice vzorků a tím pádem ke snížení rychlosti šíření impulsů. Nejvyšších poklesů však bylo zaznamenáno u směsi s ocelovými vlákny. Tuto skutečnost velmi pravděpodobně zapříčiňuje vysoká tepelná vodivost a větší teplotní roztažnost materiálu vláken. Domnívám se, že v důsledku toho, došlo k částečné nesoudržnosti ocelových vláken v cementové matici. Takto se vytvořila v cementové matici nespojitá místa a při měření rychlosti šíření impulsů došlo k jejich výraznému poklesu.

Výsledky nasákavosti stanovené po teplotním zatížení v porovnání s nezatěžovanými vzorky vykazují docela zajímavý rozptyl. Z naměřených hodnot lze především vyčíst, že

vzorky z vlhkého uložení dosahují přibližně o ½ vyšších hodnot nasákavosti než vzorky, které byly uloženy ve vodě. Zajímavým zjištěním také je, že některé vzorky z vodního uložení po zatížení na 400 °C měly hodnoty nasákavosti dokonce nižší než vzorky bez zatížení. Pravděpodobně se zde částečně projevil efekt „kvazizpevnění“, když díky tomuto jevu došlo ke zhutnění struktury vzorků a tím pádem ke snížení nasákavosti. Nejvyšší hodnoty nasákavosti byly naměřeny u vzorků s polypropylenovými vlákny, kdy jejich vyhořením došlo ke zvýšení pórovitosti cementové matrice.

6.3.2.3 Celkové shrnutí etapy III – část B

Výsledky této etapy řešení měly napomoci především k odhalení vlivu uložení vzorků v průběhu zrání, resp. vlivu vlhkosti vzorků při teplotním zatěžování. Předpokládal jsem, že u vzorků z vodního uložení budou zaznamenány větší defekty vzorků, resp. větší poklesy pevnostních charakteristik, než u vzorků z vlhkého uložení. Důvodem je větší množství vlhkosti ve vzorku z vodního uložení, která při zahřívání betonových vzorků způsobuje defekty ve struktuře betonu. Tento předpoklad se projevil u pevnosti v tahu za ohybu a u rychlosti šíření impulsů. U zjišťování pevnosti v tlaku se tento předpoklad nepotvrdil, u nasákavosti byly výsledky oproti předpokladu opačné. Vysvětlení je možné hledat ve velikosti použitých vzorků. Dá se předpokládat, že u vzorků větších rozměrů by se pravděpodobně vliv uložení, resp. vlhkost vzorků, projevil daleko výrazněji.

6.3.3 Etapa III – část C

V rámci poslední části etapy III byly teplotně zatěžovány zkušební vzorky ze čtyř odlišných receptur, kdy cílem bylo především ověřit chování betonových vzorků při strmém teplotním gradientu. První série vzorků byla zatížena na maximální teplotu 945 °C, druhá série vzorků byla zatížena na maximální teplotu 1 110 °C. Po ohřátí byly vzorky samovolně ochlazeny na běžnou laboratorní teplotu ± 20 °C. Poté byla provedena vizuální prohlídka vzorků a byly zjištěny objemová hmotnost a pevnost v tlaku.

U první sérii zahřívání (teplota 945 °C) nedošlo k rozpadu ani u jednoho ze zatěžovaných těles. Povrch obou vzorků (s i bez rozptýlené výztuže) však byl porušen sítí všesměrných trhlin. Rozdíl v poklesu pevností mezi vzorkem s vlákny a vzorkem bez vláken byl minimální, kdy u obou těles došlo k poklesu pevnosti v tlaku asi o 80 %.

Při druhé sérii zahřívání (teplota 1 110 °C) došlo k destrukci vzorku, který byl bez rozptýlené výztuže. U druhého tělesa (s rozptýlenou polypropylenovou výztuží) z této série došlo k výraznému porušení povrchu vzorku formou sítí všesměrných trhlin, avšak vzorek zůstal kompaktní. Výsledná pevnost v tlaku po teplotním zatížení druhého tělesa dosahovala minimální hodnoty 2,0 MPa, což znamená pokles o 90 % oproti nezatěžovanému vzorku téže směsi.

6.3.3.1 Celkové shrnutí etapy III – část C

Při první sérii zahřívání (na maximální teplotu 945 °C) odolaly bez rozpadu oba vzorky (s vlákny i bez vláken) i když rozdíl v množství záměsové vody byl výraznější (rozdíl ve vodním součiniteli 0,1). Pokles pevnosti v tlaku byl u obou vzorků obdobný, okolo 80 %, bez rozdílu přítomnosti vláken. Při druhé sérii zahřívání došlo k destrukci vzorku bez vláken (s vyšším množstvím vzduchu), zatímco vzorek s vlákny zůstal kompaktní. Dle způsobu porušení vzorku (celková destrukce – viz Obr. č. 135) je zřejmé, že k destrukci vzorku došlo v důsledku expanze přehřáté vodní páry, čímž došlo k roztrhání vzorku. Přestože druhý vzorek z téhož zatěžovacího cyklu měl mírně odlišné složení (množství záměsové vody však téměř stejné), lze udělat závěr, že k rozpadu tohoto tělesa nedošlo pouze z důvodu přítomnosti vláken.

6.4 Etapa IV – Zatížení přímým plamenem

V poslední etapě byly zkušební vzorky zatíženy přímým plamenem. Zatěžování byly podrobeny vzorky pěti odlišných receptur, které se lišily druhem kameniva, pojivem, různou rozptýlenou výztuží a použitím příměsí. Od každé receptury byly zatěžování podrobeny vždy dvě skupiny vzorků, které se lišily různou vlhkostí. Další vzorky byly vždy paralelně se zatížením přímým plamenem vloženy do sušárny pro stanovení aktuální vlhkosti. V průběhu zatěžování byly vzorky vizuálně sledovány a byly zaznamenány probíhající změny. Před zatěžováním a v časových etapách byl fotograficky zdokumentován exponovaný povrch. Průběh teplot ve vzorku byl také dokumentován pomocí termografické kamery. Po zatížení a vychladnutí byla provedena diagnostika vzorků.

6.4.1 Dosahované teploty

Cílem poslední etapy bylo ověření chování betonových vzorků při zatížení přímým plamenem, kdy takovýmto experimentem lze nejlépe namodelovat chování betonové konstrukce při reálném požáru. Průběh působících teplot plamene byl regulován tak, aby se výsledná teplotní křivka působících teplot na povrch tělesa (v místě termočlánku T1) co nejvíce přiblížila uhlovodíkové křivce. Při této teplotní křivce dosahují teploty po 10 minutách cca 1 000 °C a po 20 minutách cca 1 100 °C. Vzhledem k možnosti pouze manuální regulace tepelného výkonu plamene se ne vždy podařilo uhlovodíkovou křivku přesně kopírovat. V provedených experimentech byl teplotní gradient mnohem strmější, kdy ve většině případů bylo již po 1 minutě zahřívání dosaženo teploty na povrchu vzorku – v místě termočlánku T1 teploty $\pm 1\ 200$ °C. V několika případech se v průběhu experimentu vyskytly nečekané problémy, např. s přísunem kyslíku do hořáku, kdy došlo k zanesení nasávacích otvorů prachovými částicemi. Ve třech případech došlo v průběhu experimentu k nečekaným poklesům teploty (vzorky II, IV, III j – všechno vodní uložení) z důvodu nekvalitních plynových bomb. Jak se však ukázalo, pokud došlo k zásadnímu porušení vzorků, bylo to vždy v prvních minutách experimentů (cca do 5 minut od začátku experimentu). Po tuto dobu se u všech experimentů dařilo držet obdobnou teplotní úroveň zatížení, kdy se teploty na povrchu vzorku – termočlánek T1 pohybovaly $\pm 1\ 200$ °C.

Jelikož křivky teplotního zatížení nebyly u všech testovaných vzorků se stejným teplotním průběhem, z důvodů výskytu nečekaných problémů nebo špatné regulace plamene, nelze exaktně srovnávat naměřené maximální teploty na jednotlivých termočláncích. Lze však udělat následující shrnutí. Maximální teploty pro vlhké uložení dosahovaly hodnot na T2 (25 mm od exponovaného povrchu) 444 °C – 524 °C, na T3 (50 mm od exponovaného povrchu) 190 °C – 227 °C, na T4 (100 mm od exponovaného povrchu) 63 °C – 92 °C. Maximální teploty pro vodní uložení dosahovaly hodnot na T2 (25 mm od exponovaného povrchu) 350 °C – 502 °C, na T3 (50 mm od exponovaného povrchu) 159 °C – 192 °C, na T4 (100 mm od exponovaného povrchu) 53 °C – 85 °C. Při porovnání zmíněných maximálních teplot na jednotlivých termočláncích (vyjma T2 – tyto maximální teploty byly výrazně ovlivněny teplotním průběhem zahřívání) lze vysledovat určité diference mezi vzorky z vodního a vlhkého uložení. Přesto, že u vzorků z vodního uložení s vyšší vlhkostí, jsem předpokládal vyšší součinitel tepelné vodivosti, tak dosahované maximální teploty na T3 a T4 byly o něco nižší než u vzorků z vlhkého uložení. Na T3 byly teploty nižší průměrně o 37 °C, na T4 průměrně o 7 °C. Možné vysvětlení je takové, že část tepelné energie prostupující vzorkem z vodního uložení se spotřebovala na přeměnu vlhkosti v páru a její transport, místo ohřevu materiálu vzorku.

6.4.2 Vlhkosti

Naměřené hodnoty vlhkostí z vlhkého uložení se pohybovaly v rozmezí 2,9 – 4,4 % (průměrná vlhkost 3,9 %), kdy nejvyšší vlhkost měl vzorek receptury III l a nejnižší vzorek receptury II. Naměřené hodnoty vlhkostí z vodního uložení se pohybovaly v rozmezí 4,4 – 6,4 % (průměrná vlhkost 5,1 %), kdy nejvyšší vlhkost měl vzorek receptury II a nejnižší vzorek receptury IV. Průměrně byl rozdíl ve vlhkosti vzorků z vlhkého a vodního uložení 1,2 %, kdy nejmenší rozdíl byl 0,2 % u vzorků receptury IV a nejvyšší rozdíl 2 % u vzorků receptur II a III l.

6.4.3 Porušení vzorků

V průběhu zahřívání vzorků z vlhkého uložení nedošlo k výraznějším poruchám, mimo vzorek receptury IV. U vzorků receptur II, III i, III j a III l byl v průběhu expozice zaznamenán únik vlhkosti z bočních stěn, nejvýrazněji u vzorku směsi II, z důvodu nejvyšší vlhkosti (4,4 %) ze vzorků uložených ve vlhkém prostředí. U vzorku směsi IV došlo bez předchozích příznaků (již po cca 60 sekundách) k explozivnímu odprýsknutí betonové vrstvy z exponovaného povrchu do hloubky cca 5 mm (aktuální teplota $\pm 1\ 000$ °C). Po dalších 60 sekundách došlo k druhé vlně odprýsknutí z exponovaného povrchu. Poté už byl zaznamenán jen únik vlhkosti z bočních stěn (voda) a rozsáhlý únik vlhkosti (voda + pára) z horní stěny vzorku v místě termočláncu T2.

U vzorků z vodního uložení již byla v průběhu zahřívání situace dramatičtější. U dvou vzorků (směsi III i – bez vláken a IV) došlo k explozivnímu odprýsknutí z exponovaného povrchu shodně již po cca 60 sekundách. Teplota exponovaného povrchu aktuálně dosahovala $\pm 1\ 200$ °C. U vzorku směsi III i došlo k odprýsknutí dokonce ve třech vlnách, s rozestupem

cca 1 minuty. Poté už byl zaznamenán jen únik vlhkosti z bočních stěn (voda) a rozsáhlý únik vlhkosti (voda + pára) z horní stěny vzorku v místě termočlánku T2. U vzorků směsí II (2 kg polypropylenových vláken) a III 1 (50 kg ocelových vláken) bylo v průběhu 0 – 1 minuty zahřívání zaznamenáno odprýsknutí pouze několika malých šupinek cementového tmele o rozměru cca 2 × 2 mm do hloubky cca 2 mm. Poté už byl zaznamenán jen únik vlhkosti z bočních stěn (voda) a rozsáhlý únik vlhkosti (voda + pára) z horní stěny vzorku v místě termočlánku T2. U vzorku směsi III j (1 kg polypropylenových vláken) nebyly v průběhu zahřívání zaznamenány výraznější defekty. Po 10 minutách byl zaznamenán pouze únik vlhkosti v podobě prostupující vody na povrch bočních stěn.

Z popisu vzorků po skončení ohřívání a jejich fotodokumentace lze kvantifikovat rozsahy porušení jednotlivých vzorků. Ze vzorků z vlhkého uložení došlo k nejmenšímu porušení u vzorku směsi III j (vlhkost 4,1 %), kde byla patrná síť trhlin v exponovaném povrchu. K největšímu rozsahu poruch došlo u směsi IV (vlhkost 4,2 %), kde došlo k odprýsknutí vrstvy z exponovaného povrchu do maximální hloubky 5,1 mm. Při detailnějším studiu odprýsknutého povrchu bylo navíc zjištěno, že trhliny procházejí nejenom cementovou maticí, ale i skrz jednotlivá zrna kameniva. Tato zjištění lze okomentovat příznivým účinkem polypropylenových vláken v kombinaci s tepelně stabilním čedičovým kamenivem v případě vzorku směsi III j. K odprýsknutí u směsi IV došlo z důvodu hutné struktury (vyšší dávka cementu + příměs), která zabránila úniku přehřáté vodní páry. Došlo tak k odprýsknutí vrstvy betonu v té hloubce, ve které se přehřátá vodní pára začala hromadit bez možnosti úniku. U vzorků ostatních směsí (II, III i, III 1) byly po skončení ohřívání zaznamenány poruchy v podobě sítě trhlin v exponovaném povrchu a trhlin v bočních stěnách ve srovnatelném rozsahu.

Ze vzorků z vodního uložení došlo k nejmenšímu rozsahu poruch u vzorku směsi III j a III 1 (vlhkost 4,6 % a 4,9 %), kde byla patrná síť trhlin v exponovaném povrchu. K největšímu rozsahu poruch došlo u směsi III i (vlhkost 5,1 %), kde došlo k odprýsknutí vrstvy z exponovaného povrchu až do hloubky 9,7 mm. Při studiu odprýsknutého povrchu byly zjištěny trhliny pouze v cementové matici. Vzorek směsi IV, u kterého došlo také k odprýsknutí exponovaného povrchu až do hloubky 7,6 mm, měl v odprýsknutém povrchu trhliny v cementové matici i v zrnech kameniva. V případě vzorků s vyšší vlhkostí se příznivě projevila přítomnost polypropylenových (III j) a ocelových (III 1) vláken. U směsi IV bylo odprýsknutí exponovaného povrchu způsobeno hutnou strukturou (vyšší dávka cementu + příměs) v kombinaci s vyšší vlhkostí vzorku (4,4 %). Oprýsknutí u vzorku směsi III i bylo způsobeno vyšší vlhkostí (5,1 %) a absencí rozptýlené výztuže. V případě vzorku směsi III i byla v odprýsknutém povrchu opět potvrzena tepelná stabilita čedičového kameniva oproti kamenivu použitému ve vzorku směsi IV.

6.4.4 Celkové shrnutí etapy IV

Výsledky této etapy měly přispět k poznání o chování reálné betonové konstrukce zatížené přímým plamenem – požárem. Z celkem deseti zahřívaných vzorků bylo získáno množství dat a poznatků. Ukázalo se, že kritická hranice vlhkosti, kdy může nastat explozivní odprýsknutí, je někde kolem 5 %. Toto však platí pro betony bez vláken a bez příměsí. Jak se v experimentu potvrdilo, u vzorku s hutnou strukturou (IV), došlo k odprýsknutí již při vlhkosti 4,2 %. U betonů s vyšší vlhkostí je výskyt odprýsknutí, pokud není použita rozptýlená výztuž, značně pravděpodobný. Bylo potvrzeno, že použití jemné polypropylenové rozptýlené výztuže zabraňuje jevu explozivního odprýskávání betonu z důvodu „otevření“ struktury cementové matrice jejich vyhořením. Vzorek s jemnou ocelovou rozptýlenou výztuží také nezaznamenal odprýsknutí z exponovaného povrchu. Příznivý účinek těchto vláken však nespočívá v „otevření“ struktury vzorku pro přehřátou vodní páru. Efekt těchto vláken je takový, že ve struktuře betonu pomohou přenést napětí způsobená nahromaděnou přehřátou párou a nedojde tak k odtrhnutí vrstvy betonu. Přehřátá pára potom unikne drobnými trhlinami v povrchu. Dá se tedy předpokládat, že u těchto vzorků, bude rozsah mikrotrhlin ve vnitřní struktuře betonu daleko většího rozsahu. Při studiu poruch odprýsknutých povrchů se také výrazně projevila výborná tepelná stabilita čedičového kameniva.

7. ZÁVĚR

Ve čtyřech etapách experimentálních prací bylo provedeno množství testů a zkoušek s cílem co nejvíce postihnout řešenou problematiku. Pokusím se zde shrnout nejpodstatnější získané poznatky, ke kterým jsem dospěl. Především bych chtěl poznamenat, že při zkoušení tepelné odolnosti je zásadní rozdíl mezi všesměrným zahříváním vzorků (v peci) a bodovým zahříváním (plamenem). Zkušební vzorky se při těchto dvou odlišných postupech zatěžování chovaly odlišně. Při všesměrném zahřívání v peci lze velice dobře odzkoušet stabilitu kameniva při vysokých teplotách, stejně jako difference v chování vzorků připravených z různých druhů cementů. U vzorků zahříváných přímým plamenem se potvrzuje příznivý vliv přítomnosti rozptýlené výztuže stejně dobře jako vliv různé vlhkosti na porušení vzorků.

Na základě výsledků testování stability plniva do betonu lze z přírodních kameniv doporučit do tepelně odolných cementových kompozitů čedičové kamenivo, které se projevilo jako nejstabilnější. Naopak nejhorší stabilitu projevila kameniva dominantně obsahující granodiorit a ortorulu. Co se týče umělých kameniv (Liapor, sbalkovaný popílek), obstála v průběhu testování tepelné odolnosti obě kameniva velmi dobře. Přece jenom větší potenciál však naznačuje sbalkovaný popílek, především z důvodu výrazného nárůstu pevnosti stlačením ve válci při zvyšující se teplotě. Chování betonu s tímto kamenivem (sbalkovaný popílek) při působení vysokých teplot je třeba ještě ověřit. Tímto směrem by se mohl ubírat další výzkum ohledně teplotně odolných cementových kompozitů.

Vzorky s použitím portlandských směsných cementů byly po zatížení vysokými teplotami nejstabilnější. Na základě tohoto zjištění lze portlandské směsné cementy doporučit do betonů, které mohou být vystaveny vysokým teplotám. Naopak čistě portlandské cementy jsou pro tato použití nevhodné.

Při zatížení přímým plamenem se ukázalo, že kritická hranice vlhkosti, kdy může nastat explozivní odprýsknutí, je v oblasti okolo 5 %. Toto však platí pro betony bez vláken a bez příměsí. Jak se v experimentu potvrdilo, u vzorku s hutnou strukturou (směs IV), došlo k odprýsknutí již při vlhkosti 4,2 %. U betonů s vyšší vlhkostí, nebo s hutnou strukturou, je výskyt odprýsknutí, pokud není použita rozptýlená výztuž, značně pravděpodobný.

Na poli vědeckém je přínosem sestavená metodika testování odolnosti kameniva proti vysokým teplotám, která není v českých technických normách řešena. Metodika byla sestavena z několika běžných zkoušek kameniva. Na základě výsledků a poznatků získaných při jejich provádění byla provedena korekce této metodiky, kdy za podstatné zkoušky v metodice testování tepelné odolnosti kameniva považují stanovení pevnosti stlačením ve válci, omezený síťový rozbor a pozorování makroskopické i mikroskopické před a po teplotním zatížení.

Pozorování vzhledu vláken, jejich deformací a míry jejich úbytku v důsledku působení teplot bylo možno efektivně realizovat pomocí optické mikroskopie a elektronové rastrovací mikroskopie.

Pro hodnocení míry degradace betonu vystaveného účinkům vysokých teplot se jako perspektivní a vypovídající ukázalo využití ultrazvukové impulsové metody, především pro identifikaci vnitřních defektů – trhlin. Tato metoda je využitelná k racionalizaci experimentálních prací, které jsou zaměřeny na optimalizaci složení betonů, které mají odolávat vysokým teplotám.

Experimentálně bylo potvrzeno, že použití jemné polypropylenové rozptýlené výztuže zabraňuje jevu explozivního odprýskávání betonu, z důvodu „otevření“ struktury cementové matrice jejich vyhořením. Příznivý účinek speciální jemné ocelové nízkouhlíkové rozptýlené výztuže nespočívá v „otevření“ struktury vzorku pro přehřátou vodní páru. Efekt těchto vláken je takový, že vlákna ve struktuře betonu pomohou přenést napětí způsobená nahromaděnou přehřátou párou a nedojde tak k odprýsknutí vrstvy betonu. Přehřátá pára potom unikne drobnými trhlinami v povrchu. Experimentálně bylo ověřeno, že výskyt trhlin na exponovaném povrchu vzorků s ocelovou nízkouhlíkovou rozptýlenou výztuží byl vyšší, než u vzorků s polypropylenovou rozptýlenou výztuží, avšak bez explozivního odprýsknutí. Lze předpokládat, že u vzorků s ocelovou nízkouhlíkovou rozptýlenou výztuží, bude rozsah mikrotrhlin ve vnitřní struktuře většího rozsahu než u vzorků s polypropylenovou rozptýlenou výztuží.

Optimalizace složení tepelně odolného kompozitního materiálu bude mít z ekonomického hlediska význam z pohledu předejití poškození betonové konstrukce účinky vysokých teplot a požáru. Pokud bude již primárně samotným návrhem použitého materiálu zajištěná dobrá odolnost vůči vysokým teplotám a ohni, sníží se tím ekonomické nároky na sekundární ochranné prvky, např. v případě tunelového ostění. Navíc pokud bude použitím vhodného složení betonu předejito výraznému poškození konstrukce po účinku vysokých teplot, bude tím snížena doba odstávky a sanace dané konstrukce, což bude mít jistě také ekonomické výhody.

Ekologická stopa této práce se může projevit na základě doporučení pro použití pojiva a plniva do tepelně odolných kompozitů. Co se týče volby pojiva, jsou jednoznačně doporučeny portlandské směsné cementy namísto čistých portlandských cementů, což bude mít výrazný ekologický efekt v podobě snížení emisí CO₂. Jako jedno z tepelně stabilních plniv je na základě provedeného testování tepelné odolnosti kameniva doporučeno sbalkované popílkové kamenivo, které je primárně tvořeno popílkem z klasického způsobu spalování pojené malým množstvím cementu. Používání tohoto kameniva do betonů, které mají odolávat vysokým teplotám, by mělo značný ekologický přínos ve zpracování odpadu z elektrárenského průmyslu – popílku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] HELA, R., BARTOS, P.J.M., SCHUTTER, G., DOMONE, P., GIBBS, J., *Samozhutnitelný beton*, ČBS Service s.r.o. and ČSSI, Praha, 2008, ISBN 978-80-87158-12-8.
- [2] KUPILÍK, V., *Stavební konstrukce z požárního hlediska*, 1. vydání, Grada Publishing, Praha, 2006, p. 0-272, ISBN 80-247-1329-2.
- [3] SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv, *New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications*, 1. vydání Košice, červen 2008, 156 s, ISBN 978-80-553-0040-5.
- [4] COLLEPARDI, M., *Moderní beton*, Betonové stavitelství, Praha, 2009, p. 0-342, ISBN 978-80-87093-75-7.
- [5] VÍTEK, L., J., *Experimentální výzkum vlivu požáru na tunelové ostění*, sborník konference 14. Betonářské dny 2007, ČBS Servis s.r.o., Hradec Králové, 2007, p. 80-85, ISBN 978-80-87158-04-3.
- [6] CLEMENT, F., *Fire protection options in tunnels*, presentation, Ostrava, 2006.
- [7] XING, Z., BEAUCOUR, A.L., HEBERT, R., NOUMOWE, A., LEDESERT, B., *Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature*, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 4, p. 392-402, April 2011.
- [8] ČSN 73 0810, *Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 44 s.
- [9] ČSN 73 1230, *Navrhování betonových konstrukcí pro zvýšené a vyšší teploty*, Praha: Český normalizační institut, 1990, 82 s.
- [10] ČSN 73 0821, *Požární bezpečnost staveb – Požární odolnost stavebních konstrukcí*, Praha: Český normalizační institut, 2007, 20 s.
- [11] ČSN EN 1363-1, *Zkoušení požární odolnosti – Základní požadavky*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 48 s.
- [12] ČSN EN 1992-1-2 (73 1201), *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Obecná pravidla; Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, Praha: Český normalizační institut, 2006, 92 s.
- [13] BRADÁČOVÁ, I., *Stavby z hlediska požární bezpečnosti*, 1. vyd., Brno: ERA, 2007, 156 s, Technická knihovna, ISBN 978-80-7366-090-1.
- [14] PROCHÁZKA, J., ŠTEFAN, R., VAŠKOVÁ, J., *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*, Vyd. 1., Praha: České vysoké učení technické, 2010, 189 s, ISBN 978-80-01-04613-5.
- [15] FIB - Federation internationale du béton, *Fire design of concrete structure - materials, structures and modelling*, 2007, Lausanne, Switzerland: Case Postale, 2007, 106 s, ISBN 978-2-88394-078-9.
- [16] ČSN EN 13823, *Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 88 s.
- [17] SVOBODA, L., *Stavební hmoty*, 1. vyd., Bratislava: Jaga, 2004, 471 s, ISBN 80-807-6007-1.
- [18] PHAN, L.T., *High Strength Concrete at High Temperature*, Design Concrete Structures for Fire Safety, V.K.R. Kodur, American Concrete Institute, 2008, p. 1-22, CD.

- [19] OZAWA, M., UCHIDAB, S., KAMADAC, T., MORIMOTO, H., *Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission*, Construction and Building Materials, Volume 37, December 2012, p. 621-628, ISSN: 0950-0618.
- [20] BENEŠ, M., *Tepelné odprýskávání betonu exponovaného účinkům vysokých teplot*, Technické listy 2007, Cideas, 1.vyd., Praha 2008, p. 63-64, ISBN 978-80-01-04174-1.
- [21] BENEŠ, M., *Změny struktury betonu vlivem hydratačních a dehydratačních procesů za vysokých teplot*, Technické listy 2007, Cideas, 1.vyd., Praha 2008, p. 63-64, ISBN 978-80-01-04174-1.
- [22] REICHEL, V., *Hodnoty požární odolnosti stavebních konstrukcí*, VÚPS, Praha, 1971.
- [23] ABRAMS, M.S., CRUZ, C.R., *Behavior at high temperature of steel strand for prestressed concrete*, Portland Cement Association – Research and Development Laboratories – Journal, 3(3), p. 8-19, 1961.
- [24] NEVES, I.C., RODRIGUES, J.P.C., *Mechanical properties of reinforcing and prestressing steels after heating*, Journal of Materials in Civil Engineering, 8(4), p. 189-194, 1996.
- [25] ULM, F.J., COUSSY, O., BAŽANT, Z.P., The „chunnel“ fire. I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete, Journal of engineering mechanics, Volume 125, Issue 3, March 1999, p. 272-282, ISSN: 1943-7889.
- [26] VERBECK, G., COPELAND, L.E., *Some physical and chemical aspect of high pressure steam curing*, Menzel symposium on High Pressure Steam Curing, ACI publication SP-32, 1972.
- [27] CASTELLOTEA, M., ALONSOA, C., ANDRADEA, C., TURILLASA, X., CAMPOC, J., *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating*, as studies by neutron diffraction, Cement and Concrete Research 34 (2004), p. 1633-1644.
- [28] PIASTA, J., *Heat deformation of cement phases and microstructure of cement paste*, Materials and structures: research and testing, RILEM, 1989, Paris, Vol 17, n 102, p. 415-420.
- [29] FELDMAN, R.F., SEREDA, P.J., *A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties*, Materials and Structures, 1968, p. 509-519.
- [30] DIEDERICHS, U., JUMPPANEN, U.M., PENTALLA, V., *Behaviour of high strength concrete at elevated temperatures*, Espoo 1989, Helsinki, University of Technology, Department of structural Engineering, Report 92, 72 p.
- [31] KHOURY, G.A., *Design of concrete for better performance in fire*, IMechE 1992, C438/042, p. 121-127.
- [32] HAGER, I., *Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties*, PhD thesis (in french), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, november 2004, 182 p.
- [33] HAGER, I., PIMIANTA, P., *Impact of the polypropylene fibers on the mechanical properties of HPC concrete*, Proceedings of Sixth Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC), BEFIB 2004, 20-22 septembre 2004, Varenna, Italy.
- [34] HAGER, I., PIMIANTA, P., *Mechanical properties of HPC at high temperatures*, Workshop fib, Fire design of concrete structure: What now? What next? Milan, Italy, December 2-4, 2004, p. 95-100.
- [35] ČSN EN 1991-1-2, *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*, Praha: Český normalizační institut, 2004, 56 s.
- [36] THE GENEVA ASSOCIATION, *World Fire Statistics, Information Bulletin of the World Fire Statistics Centre*, 26, October 2010.

- [37] PROCHÁZKA, J., ŠTEFAN, R., *Komplexní požární ochrana a bezpečnost s využitím betonu*, překlad z anglického originálu European Concerte Platform ASBL, Praha, červen 2009.
- [38] *Risk Management for Tunnels*, MUnich Re Group, 2003.
- [39] *RT European project 2003*.
- [40] CLEMENT, F., ZÁMEČNÍK, M., *Alternativy protipožární ochrany betonového tunelového ostění*, Tunel, 16. ročník, 1/2007, Česká tunelářská asociace ITA-AITES a Slovenská tunelárska asociácia ITA-AITES, Praha, p. 21-26.
- [41] YÜZER, N., AKÖZ, F., ÖZTÜRK, L.D., *Compressive Strength – Color Change Relation in Mortars at High Temperature*, Cement and Concrete Research, V. 34, No. 10, Oct. 2004, p. 1803-1807.
- [42] VRÁTNÝ, O., PROCHÁZKA, J., *Poškození betonových prvků vystavených požáru a jeho příčiny*, sborník konference 19. Betonářské dny 2012, ČBS Servis s.r.o., Hradec Králové, 2012, p. 524-527, ISBN 978-80-87158-32-6.
- [43] ELLIS, P. R., *Analysis of mortars by differential thermal analysis*, Historic Mortars: Characteristics and Test, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications s.a.r.l., France, 2000, p. 133-142, ISBN: 2-912143-15-2 .
- [44] ZHANG, B., BICANIC, N., PEARCE, J.CH., DAVID, P.V., *Relationship between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures*, Cement and Concrete Research, 32(3), p. 363-371, 2002.
- [45] WITTMANN, F.H., *Hydraulic cement pastes*, p. 96-117, University of Sheffield, Wexham Springs, 1976.
- [46] ČSN EN 1367-5, *Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 5: Stanovení odolnosti vůči tepelnému šoku*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s.
- [47] ČSN 73 0802, *Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 122 s.
- [48] Vyhláška MV č.21/96 Sb. § 51.
- [49] ČSN EN 13501-1, *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 48 s.
- [50] MALHOTRA, H.L., *The effect of temperature on the compressive strength of concrete*, Mag Concr Res, vol. 8, 22, 1956, p. 85-94.
- [51] SANJAIAN, G., STOCKS, L.J., *Spalling of high strength silica fume concrete in fire*, ACI Materials Journal, Vol. 90, p. 170-173, 1993.
- [52] HARMATHY, T.Z., *Moisture in materials in relation to fire test ASTM*, Special Technical Publication, 1964, No 385, p. 74-95.
- [53] ALONSO, C., FERNANDEZ, L., *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*, J. Mater. Sci., 2004, vol. 39, p. 3015-3024.
- [54] ČSN EN 1097-2, *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 32 s.
- [55] ČSN EN 1097-6, *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 40 s.

- [56] ČSN EN 12 390-3, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 20 s.
- [57] ČSN EN 196-1, *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*, Praha: Český normalizační institut, 2005, 28 s.
- [58] ČSN EN 12 390-5, *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 12 s.
- [59] ČSN EN 12 390-7, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 12 s.
- [60] ČSN EN 12 390-6, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 12 s.
- [61] ČSN 73 1318, *Stanovení pevnosti betonu v tahu*, Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1986, 12s.
- [62] ČSN ISO 6784, *Beton, Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*, Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1992, 8 s.
- [63] ČSN 73 1371, *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 12 s.
- [64] ČSN EN 12504-4, *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*, Praha: Český normalizační institut, 2005, 16 s.
- [65] ČSN 73 1316, *Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vzlínavosti betonu*, Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1989, 8 s.
- [66] ČSN EN 480-11, *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody, Část 11: Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*, Praha: Český normalizační institut, 2006, 24 s.
- [67] <http://www.heidelbergcement.com>.
- [68] <http://www.holcim.cz>.
- [69] *interní materiály pískovny Žabčice – protokoly zkoušek kameniva*.
- [70] <http://www.liapor.cz>.
- [71] <http://www.krampeharex.com>.
- [72] <http://www.chryso.cz>.
- [73] <http://www.ocvreinforcements.com>.
- [74] <http://www.fiberconfiber.com>.
- [75] ŠČUČKA, J., MARTINEC, P., *Fyzikální vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice*, Analytický materiál zpracovaný pro potřeby řešení projektu: GAČR P104/12/1988 Studium interakce složek cementových kompozitů při působení vysokých teplot.
- [76] GREGEROVÁ, M., *PVE Dlouhé Stráně – oprava AB pláště horní nádrže petrograficko - mineralogicko - geochemické posouzení*, 2004, MS nepublikovaná zpráva, MU Brno.
- [77] http://is.muni.cz/do/1499/el/estud/pedf/js07/minerality/materialy/horniny/vyvrele_hlubinne.html.
- [78] http://pruvodce.geol.morava.sci.muni.cz/Olbramovice/Olbramovice_text.htm.
- [79] ČSN EN 12 350-2, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 12 s.
- [80] ČSN EN 12 350-6, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 12 s.
- [81] ČSN EN 12 350-7, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 20 s.

- [82] *interní materiály kamenolomu Olbramovice – protokoly zkoušek kameniva.*
- [83] *interní materiály štěrkovny Náklo – protokoly zkoušek kameniva.*
- [84] http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska_tavene_horniny.
- [85] *interní materiály kamenolomu ROSA, s.r.o. – protokoly zkoušek kameniva.*
- [86] *interní materiály Divize ekologie a systémů jakosti – evidenční listy produktů ČEZ, a.s.*
- [87] www.mapei.cz.
- [88] www.chryso.cz.
- [89] www.webmineral.com.
- [90] SOKOLÁŘ, R., *Keramika*, modul BJO1_M01, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, VUT Brno, 2005.
- [91] VOHLÍDAL, J., ŠTULÍK, K., JULÁK, A., *Chemické a analytické tabulky*, 1. vyd, Praha: Grada Publishing, 1999, ISBN 80-7169-855-5.

SEZNAM TABULEK:

Tab. č. 1: Mezinárodní statistická data ohledně požárů v letech 2005 – 2007 [36]	12 -
Tab. č. 2: Vyčíslení ztrát po požárech ve vybraných tunelech [38]	13 -
Tab. č. 3: Přehled rozsahu existujících tunelů v Evropě k roku 2003 [39]	13 -
Tab. č. 4: Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu s křemičitým nebo vápencovým kamenivem při zvýšených teplotách [12]	18 -
Tab. č. 5: Normová teplotní křivka [11]	22 -
Tab. č. 6: Vliv teploty na poškození betonu [41]	31 -
Tab. č. 7: Přehled změn, ke kterým dochází v mikrostruktuře betonu při zahřívání [32]	33 -
Tab. č. 8: Teplotní rozmezí rozkladu některých složek ztvrdlé cementové pasty [43]	49 -
Tab. č. 9: Příklad barevných změn kameniva v průběhu zahřívání [41]	50 -
Tab. č. 10: Lineární tepelné roztažnosti pro různé typy hornin [3]	50 -
Tab. č. 11: Definice normové teplotní křivky podle ČSN EN 1363-1	70 -
Tab. č. 12: Vlastnosti CEM I 42,5 R a CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R – Mokrý [67]	79 -
Tab. č. 13: Vlastnosti CEM II/B-S 32,5 R a CEM III/B 32,5 N-SV – Holcim [68]	80 -
Tab. č. 14: Vlastnosti kameniva z lokality Žabčice [69]	80 -
Tab. č. 15: Petrografický rozbor kameniva frakce 0 – 4 mm pískovny Náklo [83]	80 -
Tab. č. 16: Vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice [75] [76]	81 -
Tab. č. 17: Silikátová analýza bazaltů z lomu Bílčice, podle Gregerové (průměrné hodnoty z jedenácti analýz) [76]	81 -
Tab. č. 18: Vlastnosti kameniva Olbramovice frakce 4 – 8 mm a 8 – 16 mm [78] [82]	82 -
Tab. č. 19: Vlastnosti lehkého kameniva Liapor [69]	82 -
Tab. č. 20: Chemické složení lehkého kameniva Liapor [70]	83 -
Tab. č. 21: Vlastnosti popílku Dětmorovice [86]	83 -
Tab. č. 22: Přehled vlastností polypropylenových vláken [71]	84 -
Tab. č. 23: Přehled vlastností rozptýlené výztuže na bázi celulózy [72]	84 -
Tab. č. 24: Přehled vlastností rozptýlené výztuže na bázi skla [73]	85 -
Tab. č. 25: Přehled vlastností rozptýlené ocelové výztuže [74]	85 -
Tab. č. 26: Receptury směsí s hrubým kamenivem Olbramovice a jemnozrnných směsí	86 -
Tab. č. 27: Receptury navržených směsí s hrubým kamenivem čedič Bílčice nebo Liapor	86 -
Tab. č. 28: Přehled testovaných kameniv včetně jejich charakteristik	87 -
Tab. č. 29: Příslušnost a petrografické složení přírodních kameniv [82] [83] [84] [85]	87 -
Tab. č. 30: Výsledky pevností stlačením ve válci a úbytků hmotnosti	88 -
Tab. č. 31: Výsledky omezeného síťového rozboru kameniva	90 -
Tab. č. 32: Výsledky nasákavosti a objemových hmotností zrn kameniva	92 -
Tab. č. 33: Přehled makroskopického a mikroskopického pozorování	94 -
Tab. č. 34: Receptura II zatěžovaného betonu Etapy II – část A	109 -
Tab. č. 35: Výsledky fyzikálně-mechanických vlastností vzorků Etapy II – část A	109 -

Tab. č. 36: Popis vzorků po stupních teplotního zatížení, sledováno vizuálně – povrch vzorků Etapy II – část A.....	- 113 -
Tab. č. 37: Výsledky stanovení množství, velikosti a distribuce vzduchových pórů vzorků Etapy II – část A.....	- 113 -
Tab. č. 38: Popis vzorků po stupních teplotního zatížení, sledováno mikroskopicky (zvětšení 200 ×) – v řezu vzorků Etapy II – část A.....	- 115 -
Tab. č. 39: Receptury zatěžovaného betonu Etapy II – část B.....	- 119 -
Tab. č. 40: Přehled výsledků fyzikálně-mechanických vlastností po 7 a 28 dnech od namíchání směsí Etapy II – část B.....	- 119 -
Tab. č. 41: Přehled výsledků změny objemové hmotnosti po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B.....	- 121 -
Tab. č. 42: Přehled změny fyzikálně – mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B.....	- 122 -
Tab. č. 43: Receptury zatěžovaného betonu Etapy III – část A.....	- 125 -
Tab. č. 44: Přehled výsledků změny objemové hmotnosti po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A.....	- 126 -
Tab. č. 45: Přehled výsledků změny fyzikálně-mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A.....	- 127 -
Tab. č. 46: Přehled výsledků změny rychlosti šíření impulzů po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A.....	- 130 -
Tab. č. 47: Přehled porušení povrchu vzorků včetně upravené fotodokumentace s vyznačenými trhlinami po teplotním zatížení na 660 °C vzorků Etapy III – část A.....	- 132 -
Tab. č. 48: Přehled porušení povrchu vzorků včetně upravené fotodokumentace s vyznačenými trhlinami po teplotním zatížení na 800 °C vzorků Etapy III – část A.....	- 133 -
Tab. č. 49: Souhrn porušení povrchu vzorků v % po teplotním zatížení na 660 °C a 800 °C vzorků Etapy III – část A.....	- 134 -
Tab. č. 50: Receptury zatěžovaného betonu Etapy III – část B.....	- 135 -
Tab. č. 51: Přehled výsledků změny rychlosti šíření ultrazvukového impulsu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část B.....	- 135 -
Tab. č. 52: Přehled výsledků a změn fyzikálně – mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část B.....	- 137 -
Tab. č. 53: Receptury zatěžovaného betonu Etapy III – část C.....	- 140 -
Tab. č. 54: Přehled výsledků změny fyzikálně – mechanických vlastností po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část C.....	- 141 -
Tab. č. 55: Receptury zatěžovaného betonu Etapy IV.....	- 143 -
Tab. č. 56: Vlhkosti jednotlivých vzorků z vlhkého a vodního uložení.....	- 144 -
Tab. č. 57: Popis jednotlivých vzorků v průběhu zahřívání – vlhké uložení.....	- 151 -
Tab. č. 58: Popis jednotlivých vzorků v průběhu zahřívání – vodní uložení.....	- 152 -
Tab. č. 59: Popis vzorků po teplotním zatížení.....	- 152 -

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obr. č. 1: Aktivní a pasivní požární ochrana [14]	11 -
Obr. č. 2: Matematický model pro pracovní diagram betonu v tlaku při zvýšených teplotách [12] .-	18 -
Obr. č. 3: Součinitel $k_{c,i}(\theta)$ pro redukci pevnosti betonu v tahu při zvýšených teplotách [12].....-	19 -
Obr. č. 4: Pracovní diagram betonářské a předpínací oceli při zvýšených teplotách (pro předpínací ocel se index „s“ zamění za index „p“) [12]	20 -
Obr. č. 5: Celkové teplotní prodloužení betonu [12].....-	21 -
Obr. č. 6: Tepelná vodivost betonu [12].....-	21 -
Obr. č. 7: Požární scénáře [2]	28 -
Obr. č. 8: Dosažené hodnoty při zkoušení různých požárů [6]	28 -
Obr. č. 9: Ukázka porušení betonové konstrukce po požáru [37]	30 -
Obr. č. 10: Oprava betonové konstrukce pomocí torkretu – nástřik betonu [37]	30 -
Obr. č. 11: Ztráta pevnosti betonu v tlaku v závislosti na teplotě [22].....-	34 -
Obr. č. 12: Poměrné pevnosti v tlaku v závislosti na teplotě (třídy 1 až 3 podle Eurokódu 2) a výsledky betonů s vápencovým kamenivem a různým vodním součinitelem [32]	34 -
Obr. č. 13: Výsledky poměrů pevností v tahu získané z různých výzkumných pracovišť a doporučené dle Eurokódu 2 [32].....-	36 -
Obr. č. 14: Modul pružnosti betonů v závislosti na teplotě [22]	36 -
Obr. č. 15: Změny poměru modulů pružnosti v závislosti na teplotě, hodnoty byly měřeny na betonech z vápencového kameniva s různým vodním součinitelem [32].....-	37 -
Obr. č. 16: Diagramy $\sigma - \varepsilon$ pro betony s pevností v tlaku 100 N/mm^2 (vodní součinitel 0,4), získané při teplotách $120 \text{ }^\circ\text{C}$, $250 \text{ }^\circ\text{C}$, $400 \text{ }^\circ\text{C}$ a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ [33].....-	37 -
Obr. č. 17: Tepelná vodivost betonů v závislosti na teplotě (vyšrafovaná plocha vyznačuje rozptyl zahraničních měření pro hutné betony) [22]	38 -
Obr. č. 18: Tepelná deformace, tepelná deformace při zatížení a přechodná tepelná deformace HPC betonu [34]	39 -
Obr. č. 19: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících křemičité kamenivo [4]	40 -
Obr. č. 20: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících vápenaté kamenivo [4].....-	40 -
Obr. č. 21: Vliv zatížení na pevnost v tlaku [4] – <i>překresleno</i>-	40 -
Obr. č. 22: Vliv teploty na ztrátu pevnosti běžného betonu (OC, pevnost v tlaku 40 MPa), vysokopevnostního betonu (HS, pevnost v tlaku 80 MPa) a vysokopevnostního betonu s pevností 100 MPa (VHS) [4] – <i>překresleno</i>	42 -
Obr. č. 23: Příklad explozivního odprýskání na tunelovém ostění [6]	43 -
Obr. č. 24: Mechanismus odprýsknutí betonu – tepelná dilatace [19]	44 -
Obr. č. 25: Mechanismus odprýsknutí betonu – tlak par [19].....-	45 -
Obr. č. 26: Konstrukce modelu CSH fází [29]	46 -
Obr. č. 27: Rozdíl distribuce velikosti pórů zahřívání cementového tmelu s přidáním křemičitého úletu [30]	47 -

Obr. č. 28: Náčrt dehydratace – mikrodifúze chemicky vázané molekuly vody z mikropórů do kapilárních pórů [25]	- 47 -
Obr. č. 29: Změny základních složek portlandské cementové pasty [27]	- 48 -
Obr. č. 30: Vliv molárního poměru (CaO/ SiO ₂) a teploty na CSH fáze hydratačních produktů [26]	- 49 -
Obr. č. 31: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku způsobené zvýšením teploty [4] – <i>překresleno</i>	- 51 -
Obr. č. 32: Stabilita a procesy probíhající v průběhu zahřívání kameniva [15]	- 52 -
Obr. č. 33: Tepelné přetvoření vybraných kameniv [31]	- 52 -
Obr. č. 34: Tepelná přetvoření betonů, které obsahují různá kameniva: 1 – křemičité kamenivo, 2 – pískovec, 3 – vápenec, 4 – čedič, 5 – kamenivo z expandovaného jílu, 6 – cementový tmel [28] ...	- 53 -
Obr. č. 35: Termická analýza kameniv získaná při nárůstu teploty 10 °C/min v atmosféře dusíku [31] ..	- 53 -
Obr. č. 36: Struktura betonu zahřátá na 600 °C, beton složený z křemičito-vápenného kameniva, pevnost v tlaku 75 MPa [32]	- 54 -
Obr. č. 37: Schematické znázornění tranzitní zóny [4]	- 54 -
Obr. č. 38: Vliv teploty na beton a ocelovou výztuž (ITA 2004 a Khoury 2005) [40]	- 55 -
Obr. č. 39: Vyztužená betonová konstrukce po požáru [4]	- 57 -
Obr. č. 40: Explosivní odprýskávání v důsledku zvýšení vnitřního tlaku v ohřívaném prvku. Polypropylenová vlákna jako účinná metoda, která umožňuje snížení tlaku páry [32]	- 60 -
Obr. č. 41: Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu běžný beton (OC, pevnost v tlaku 40 MPa), vysokopevnostní beton (HS, pevnost v tlaku 80 MPa), vysokopevnostní beton s pevností 100 MPa (VHS), <i>vlevo nevyztužený – vpravo s polypropylenovými vlákny</i> [4] – <i>překresleno</i>	- 61 -
Obr. č. 42: Efekt dávky PP vláken na pórový tlak [18]	- 61 -
Obr. č. 43: Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu běžný beton (OC, pevnost v tlaku 40 MPa), vysokopevnostní beton (HS, pevnost v tlaku 80 MPa), vysokopevnostní beton s pevností 100 MPa (VHS), <i>vlevo nevyztužený – vpravo s ocelovými vlákny</i> [4] - <i>překresleno</i>	- 62 -
Obr. č. 44: Sestava zatěžování přímým plamenem	- 72 -
Obr. č. 45: Detail umístění jednotlivých termočlánků	- 72 -
Obr. č. 46: Olbramovice po 400 °C	- 95 -
Obr. č. 47: Olbramovice po 700 °C	- 95 -
Obr. č. 48: Olbramovice po 1 000 °C	- 95 -
Obr. č. 49: Lomnička po 400 °C	- 95 -
Obr. č. 50: Lomnička po 700 °C	- 95 -
Obr. č. 51: Lomnička po 1 000 °C	- 95 -
Obr. č. 52: Náκλο po 400 °C	- 95 -
Obr. č. 53: Náκλο po 700 °C	- 95 -
Obr. č. 54: Náκλο po 1 000 °C	- 95 -
Obr. č. 55: Recyklát po 400 °C	- 95 -
Obr. č. 56: Recyklát po 700 °C	- 95 -
Obr. č. 57: Recyklát po 1 000 °C	- 95 -
Obr. č. 58: Sbalky po 400 °C	- 96 -

Obr. č. 59: Sbalky po 700 °C.....	- 96 -
Obr. č. 60: Sbalky po 1 000 °C.....	- 96 -
Obr. č. 61: Bílčice po 400 °C	- 96 -
Obr. č. 62: Bílčice po 700 °C	- 96 -
Obr. č. 63: Bílčice po 1 000 °C	- 96 -
Obr. č. 64: Liapor po 400 °C.....	- 96 -
Obr. č. 65: Liapor po 700 °C.....	- 96 -
Obr. č. 66: Liapor po 1 000 °C	- 96 -
Obr. č. 67: Detail po 400 °C – Olbramovice (zvětšeno 60×)	- 97 -
Obr. č. 68: Detail po 700 °C – Olbramovice (zvětšeno 60×)	- 97 -
Obr. č. 69: Detail po 1 000 °C – Olbramovice (zvětšeno 60×)	- 97 -
Obr. č. 70: Detail po 400 °C – Lomnička (zvětšeno 40×).....	- 97 -
Obr. č. 71: Detail po 700 °C – Lomnička (zvětšeno 40×).....	- 97 -
Obr. č. 72: Detail po 1 000 °C – Lomnička (zvětšeno 40×).....	- 97 -
Obr. č. 73: Detail po 400 °C – Náklo (zvětšeno 40×)	- 97 -
Obr. č. 74: Detail po 700 °C – Náklo (zvětšeno 40×)	- 97 -
Obr. č. 75: Detail po 1 000 °C – Náklo (zvětšeno 40×)	- 97 -
Obr. č. 76: Detail po 400 °C – recyklát (zvětšeno 260×)	- 97 -
Obr. č. 77: Detail po 700 °C – recyklát (zvětšeno 40×)	- 97 -
Obr. č. 78: Detail po 1 000 °C – recyklát (zvětšeno 40×)	- 97 -
Obr. č. 79: Detail po 400 °C – sbalky (zvětšeno 40×).....	- 98 -
Obr. č. 80: Detail po 700 °C – sbalky (zvětšeno 60×).....	- 98 -
Obr. č. 81: Detail po 1 000 °C – sbalky (zvětšeno 40×).....	- 98 -
Obr. č. 82: Detail po 400 °C – Bílčice (zvětšeno 40×).....	- 98 -
Obr. č. 83: Detail po 700 °C – Bílčice (zvětšeno 200×).....	- 98 -
Obr. č. 84: Detail po 1 000 °C – Bílčice (zvětšeno 160×).....	- 98 -
Obr. č. 85: Detail po 400 °C – Liapor (zvětšeno 40×)	- 98 -
Obr. č. 86: Detail po 700 °C – Liapor (zvětšeno 40×)	- 98 -
Obr. č. 87: Detail po 1 000 °C – Liapor (zvětšeno 40×)	- 98 -
Obr. č. 88: Vlákna bez poškození po 20 °C	- 115 -
Obr. č. 89: Vlákna bez poškození po 20 °C	- 115 -
Obr. č. 90: Vlákna bez poškození po 100 °C	- 115 -
Obr. č. 91: Vlákna bez poškození po 100 °C	- 115 -
Obr. č. 92: Viditelně zdeformovaná vlákna po 150 °C	- 116 -
Obr. č. 93: Mikrostruktura bez poruch	- 116 -
Obr. č. 94: Mikrotrhlina v cementovém tmelu po 200 °C.....	- 116 -
Obr. č. 95: Mikrostruktura bez poruch	- 116 -
Obr. č. 96: Mikrostruktura bez poruch a bez přítomnosti vláken po 250 °C.....	- 116 -
Obr. č. 97: Mikrotrhliny v cementovém tmelu po 250 °C.....	- 116 -
Obr. č. 98: Vlákna bez poškození po 20 °C	- 117 -

Obr. č. 99: Vlákna bez poškození po 20 °C	- 117 -
Obr. č. 100: Řez vláknem po 100 °C, bez deformace	- 117 -
Obr. č. 101: Vzhled vlákna po 100 °C s počínající deformací	- 117 -
Obr. č. 102: Řez vláknem po 150 °C s počínající deformací	- 117 -
Obr. č. 103: Řez vláknem po 150 °C s rozsáhlejší deformací	- 117 -
Obr. č. 104: Detail dutiny, pravděpodobně vzniklé „vyhořením“ vlákna s trhlinou v cementovém tmelu po 200 °C	- 118 -
Obr. č. 105: Vzhled vlákna po 150 °C s rozsáhlejší deformací	- 118 -
Obr. č. 106: Detail povrchu vlákna po 150 °C	- 118 -
Obr. č. 107: Detail trhliny v dutině cementového tmelu po 250 °C	- 118 -
Obr. č. 108: Detail dutin, pravděpodobně vzniklých „vyhořením“ vláken po 250 °C	- 118 -
Obr. č. 109: Detail sítě trhlin v cementovém tmelu po 250 °C	- 118 -
Obr. č. 110: II a – 28 dní	- 124 -
Obr. č. 111: II b – 28 dní	- 124 -
Obr. č. 112: II c – 28 dní	- 124 -
Obr. č. 113: II d – 28 dní	- 124 -
Obr. č. 114: II a – 200 °C	- 124 -
Obr. č. 115: II b – 200 °C	- 124 -
Obr. č. 116: II c – 200 °C	- 124 -
Obr. č. 117: II d – 200 °C	- 124 -
Obr. č. 118: II a – 400 °C	- 124 -
Obr. č. 119: II b – 400 °C	- 124 -
Obr. č. 120: II c – 400 °C	- 124 -
Obr. č. 121: II d – 400 °C	- 124 -
Obr. č. 122: II a – 600 °C	- 124 -
Obr. č. 123: II b – 600 °C	- 124 -
Obr. č. 124: II c – 600 °C	- 124 -
Obr. č. 125: II d – 600 °C	- 124 -
Obr. č. 126: II a – 800 °C	- 124 -
Obr. č. 127: II b – 800 °C	- 124 -
Obr. č. 128: II c – 800 °C	- 124 -
Obr. č. 129: II d – 800 °C	- 124 -
Obr. č. 130: II a – 1 000 °C	- 124 -
Obr. č. 131: II b – 1 000 °C	- 124 -
Obr. č. 132: II c – 1 000 °C	- 124 -
Obr. č. 133: II d – 1 000 °C	- 124 -
Obr. č. 134: Detail výrazně porušeného povrchu vzorku směsi II po teplotním zatížení až do teploty 1 110 °C – povrch vzorku je protkán sítí trhlin	- 142 -
Obr. č. 135: Detail vzorku směsi III m po teplotním zatížení až do teploty 1 110 °C – destrukce vzorku	- 142 -

Obr. č. 136: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek II – vlhké uložení.....	- 150 -
Obr. č. 137: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek II – vodní uložení.....	- 150 -
Obr. č. 138: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III i – vlhké uložení	- 150 -
Obr. č. 139: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III i – vodní uložení	- 150 -
Obr. č. 140: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III j – vlhké uložení	- 150 -
Obr. č. 141: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III j – vodní uložení	- 150 -
Obr. č. 142: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III l – vlhké uložení	- 151 -
Obr. č. 143: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek III l – vodní uložení	- 151 -
Obr. č. 144: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek IV – vlhké uložení	- 151 -
Obr. č. 145: Záznam termografické kamery po zkoušce, vzorek IV – vodní uložení	- 151 -
Obr. č. 146: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek II – vlhké uložení (vlhkost 4,4 %, maximální teplota 1 253 °C)	- 153 -
Obr. č. 147: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek II – vodní uložení (vlhkost 6,4 %, maximální teplota 1 232 °C)	- 153 -
Obr. č. 148: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III i – vlhké uložení (vlhkost 3,7 %, maximální teplota 1 248 °C)	- 153 -
Obr. č. 149: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III i – vodní uložení (vlhkost 5,1 %, maximální teplota 1 293 °C)	- 153 -
Obr. č. 150: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III j – vlhké uložení (vlhkost 4,1 %, maximální teplota 1 262 °C)	- 153 -
Obr. č. 151: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III j – vodní uložení (vlhkost 4,6 %, maximální teplota 1 282 °C)	- 153 -
Obr. č. 152: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III l – vlhké uložení (vlhkost 2,9 %, maximální teplota 1 143 °C)	- 154 -
Obr. č. 153: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek III l – vodní uložení (vlhkost 4,9 %, maximální teplota 1 199 °C)	- 154 -
Obr. č. 154: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek IV – vlhké uložení (vlhkost 4,2 %, maximální teplota 1 262 °C)	- 154 -
Obr. č. 155: Detail exponovaného povrchu po zkoušce, vzorek IV – vodní uložení (vlhkost 4,4 %, maximální teplota 1 279 °C)	- 154 -

SEZNAM GRAFŮ:

Graf č. 1: Přehled pevností stlačením ve válci kameniv po jednotlivých stupních teplotního zatížení.....	- 89 -
Graf č. 2: Procentuální porovnání pevností stlačením ve válci kameniv po jednotlivých stupních teplotního zatížení	- 89 -
Graf č. 3: Procentuální porovnání úbytku hmotnosti kameniv po jednotlivých stupních teplotního zatížení	- 89 -
Graf č. 4: Procentuální nárůst propadu sítem 4,0 mm po stupních teplotního zatížení.....	- 91 -
Graf č. 5: Procentuální nárůst propadu sítem 0,25 mm po stupních teplotního zatížení.....	- 91 -
Graf č. 6: Grafické zpracování nasákavosti zrn kameniva po jednotlivých stupních teplotního zatížení.	- 93 -
Graf č. 7: Grafické zpracování objemové hmotnosti zrn kameniva po jednotlivých stupních teplotního zatížení	- 93 -
Graf č. 8: Rentgenogramy kameniva Olbramovice po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C.....	- 99 -
Graf č. 9: Rentgenogramy kameniva Lomnička po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C	- 100 -
Graf č. 10: Rentgenogramy kameniva Náklo po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C....	- 101 -
Graf č. 11: Rentgenogramy recyklovaného kameniva po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C	- 102 -
Graf č. 12: Rentgenogramy sbalkovaného popílku po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C.....	- 103 -
Graf č. 13: Rentgenogramy kameniva Bílčice po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C...-	- 104 -
Graf č. 14: Rentgenogramy kameniva Liapor po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C...-	- 105 -
Graf č. 15: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Bílčice při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C (jeden vzorek zahříváný kontinuálně).....	- 106 -
Graf č. 16: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Bílčice před a po kontinuálním zahřívání ..	- 106 -
Graf č. 17: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Lomnička při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C (jeden vzorek zahříváný kontinuálně).....	- 107 -
Graf č. 18: Souhrnně zpracované rentgenogramy kameniva Lomnička před a po kontinuálním zahřívání	- 107 -
Graf č. 19: Souhrnně zpracované rentgenogramy sbalkovaného popílku při aktuálních teplotách 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C (jeden vzorek zahříváný kontinuálně).....	- 108 -
Graf č. 20: Souhrnně zpracované rentgenogramy sbalkovaného popílku před a po kontinuálním zahřívání	- 108 -
Graf č. 21: Procentuální porovnání objemových hmotností po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 110 -
Graf č. 22: Procentuální porovnání pevnosti v tlaku po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 110 -

Graf č. 23: Procentuální porovnání pevnosti v tahu ohybem po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 110 -
Graf č. 24: Procentuální porovnání statického modulu pružnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 111 -
Graf č. 25: Procentuální porovnání dynamického modulu pružnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 111 -
Graf č. 26: Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 111 -
Graf č. 27: Procentuální porovnání pevnosti v příčném tahu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 112 -
Graf č. 28: Procentuální porovnání pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A	- 112 -
Graf č. 29: Porovnání celkového množství vzduchu a množství mikroskopického vzduchu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A	- 114 -
Graf č. 30: Porovnání zaznamenaného počtu tětv prvních čtyř tříd po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy II – část A.....	- 114 -
Graf č. 31: Grafický přehled výsledků objemových hmotností vzorků Etapy II – část B.....	- 120 -
Graf č. 32: Grafický přehled výsledků časových pevností v tahu za ohybu vzorků Etapy II – část B.....	- 120 -
Graf č. 33: Grafický přehled výsledků časových pevností v tlaku vzorků Etapy II – část B	- 120 -
Graf č. 34: Grafický přehled poklesů objemových hmotností po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B.....	- 121 -
Graf č. 35: Grafický přehled výsledků pevnosti v tahu ohybem po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B	- 123 -
Graf č. 36: Grafický přehled výsledků pevnosti v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy II – část B	- 123 -
Graf č. 37: Procentuální porovnání poklesu objemové hmotnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A	- 125 -
Graf č. 38: Grafický přehled výsledků pevnosti v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A	- 128 -
Graf č. 39: Procentuální porovnání poklesu pevnosti v tlaku po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A	- 128 -
Graf č. 40: Grafický přehled výsledků pevnosti v tahu za ohybu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A.....	- 129 -
Graf č. 41: Procentuální porovnání poklesu pevnosti v tahu ohybem po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A	- 129 -
Graf č. 42: Grafický přehled rychlosti šíření impulzu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A...	- 131 -
Graf č. 43: Procentuální porovnání poklesu rychlosti šíření impulzu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část A	- 131 -
Graf č. 44: Grafický přehled porušení povrchu vzorků po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A, vztaženo vzhledem k úrovni teplotního zatížení	- 134 -

Graf č. 45: Grafický přehled porušení povrchu vzorků po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část A, vztaheno vzhledem k jednotlivé směsi	- 134 -
Graf č. 46: Grafický přehled rychlosti šíření impulsu po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část B... ..	- 136 -
Graf č. 47: Procentuální porovnání změny rychlosti šíření impulsu po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B.....	- 136 -
Graf č. 48: Procentuální porovnání změny objemové hmotnosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B.....	- 138 -
Graf č. 49: Procentuální porovnání změny nasákavosti po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B.....	- 138 -
Graf č. 50: Procentuální porovnání změny pevnosti v tahu ohybem po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B.....	- 139 -
Graf č. 51: Procentuální porovnání změny pevnosti v tlaku po stupních teplotního zatížení vzorků Etapy III – část B.....	- 139 -
Graf č. 52: Srovnání naměřených teplot při zatěžování s teplotní křivkou dle ČSN EN 1363-1	- 141 -
Graf č. 53: Grafický přehled pevností v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část C	- 141 -
Graf č. 54: Procentuální porovnání poklesu pevnosti v tlaku po teplotním zatížení vzorků Etapy III – část C	- 142 -
Graf č. 55: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury II (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice) – vlhké uložení	- 145 -
Graf č. 56: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury II (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice) – vodní uložení	- 145 -
Graf č. 57: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III i (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice) – vlhké uložení.....	- 146 -
Graf č. 58: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III i (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice) – vodní uložení.....	- 146 -
Graf č. 59: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III j (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, polypropylenová vlákna) – vlhké uložení	- 147 -
Graf č. 60: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III j (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, polypropylenová vlákna) – vodní uložení	- 147 -
Graf č. 61: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III l (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, ocelová vlákna) – vlhké uložení.....	- 148 -
Graf č. 62: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury III l (CEM III/B 32,5 N-SV Holcim, hrubé kamenivo Bílčice, ocelová vlákna) – vodní uložení.....	- 148 -
Graf č. 63: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury IV (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice, popílek) – vlhké uložení	- 149 -
Graf č. 64: Záznam průběhu teplot ve vzorku receptury IV (CEM I 42,5 R Mokrý, hrubé kamenivo Olbramovice, popílek) – vodní uložení.....	- 149 -