



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

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

## STUDIUM CHOVÁNÍ BETONŮ PŘI PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLOT

STUDYING THE BEHAVIOR OF CONCRETE AT HIGH TEMPERATURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL ŽÁK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program**

B3607 Stavební inženýrství

**Typ studijního programu**

Bakalářský studijní program s prezenční formou studia

**Studijní obor**

3607R020 Stavebně materiálové inženýrství

**Pracoviště**

Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student**

Michal Žák

**Název**

Studium chování betonů při působení  
vysokých teplot

**Vedoucí bakalářské práce**

Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

**Datum zadání  
bakalářské práce**

30. 11. 2013

**Datum odevzdání  
bakalářské práce**

30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

*V. Z. N. Zich*

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



*[Signature]*  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## Podklady a literatura

Desining Concrete Structures for Fire Safety, ACI, SP-255

Bradáčová, I. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. ERA group, s.r.o. Brno 2007. ISBN 978-80-7366-090-1.

Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007

Drochytka, R. Trvanlivost stavebních materiálů, učební opora VUT Brno, FAST, 2008

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

Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (r. 2008-2013)

České a zahraniční normy.

Internetové zdroje.

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

V teoretické části bakalářské práce proveďte rešerši poznatků týkajících se problematiky působení vysokých teplot na cementové betony.

Popište děje, ke kterým dochází v betonu při působení vysokých teplot. Popište proces explosivního odprýskávání betonu.

Na základě rešerší literatury definujte požadavky na vhodný typ kameniva, cementu a příměsí pro prostředí s možným působením vysokých teplot.

V experimentální části práce připravte vzorky s vybraným typem cementu, kameniva a rozptýlenou výztuží a proveďte zatěžování těchto vzorků vysokou teplotou.

Popište zvolenou metodiku teplotního zatěžování vzorků.

Proveďte sledování změn vlastností zkušebních vzorků před a po působení vysokých teplot.

Rozsah práce min 50 stran.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na chování betonů při působení vysokých teplot. V teoretické části byly popsány procesy, které probíhají v betonu při teplotním zatížení. Bylo popsáno zkoušení betonu při působení vysokých teplot. Dále byl popsán vliv vysokých teplot na jednotlivé složky betonu a návrh vhodných komponent pro betony pro působení vysokých teplot. V experimentální části byly vyrobeny receptury s kamenivem moravská droba, s amfibolitickým kamenivem a s přídavkem polypropylenových vláken. U těchto receptur byl stanoven vliv vysokých teplot na objemovou hmotnost betonu, dynamický modul pružnosti betonu a pevnost betonu v tlaku.

## **Klíčová slova**

Požární odolnost, teplotní křivka, explosivní odprýskávání, polypropylenová vlákna, teplotní zatěžování, amfibolitické kamenivo.

## **Abstrakt**

This bachelor's thesis is focused on behavior of concrete at high temperatures. The theoretical part describes processes, which take place in concrete at thermal loading and further there was described testing of concrete at high temperatures. Next there was described influence of high temperatures on each component of concrete and design of appropriate components for concrete exposed to high temperatures. In experimental part mixes was made with greywacke aggregate, amphibolite aggregate and with the addition of polypropylene fibers. In these mixes was determined the effect of high temperatures on the density of concrete, dynamic modulus of elasticity of concrete and compressive strength of concrete.

## **Keywords**

Fire resistance, temperature curve, explosive spalling, polypropylene fibers, thermal loading, amphibolite aggregate.

## **Bibliografická citace VŠKP**

ŽÁK Michal. *Studium chování betonů při působení vysokých teplot*. Brno, 2014. 71 s.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16.5.2014

.....  
podpis autora

Michal Žák

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za připomínky, cenné rady a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Válkovi a doc. Ing. Jiřímu Brožovskému, CSc. za odbornou pomoc při experimentální části.

## OBSAH

1	ÚVOD .....	4
2	CÍLE PRÁCE .....	5
3	TEORETICKÁ ČÁST.....	6
3.1	Požární bezpečnost .....	6
3.1.1	Základní poznatky o požární bezpečnosti .....	6
3.1.2	Požárně technické vlastnosti stavebních hmot .....	7
3.1.3	Požární odolnost .....	8
3.1.4	Navrhování konstrukcí na účinky požáru.....	8
3.1.4.1	Nominální teplotní křivky.....	9
3.1.4.2	Zjednodušené modely požáru .....	10
3.1.4.3	Zpřesněné modely požáru .....	10
3.2	Beton při působení vysokých teplot.....	11
3.2.1	Kamenivo při vysokých teplotách .....	13
3.2.2	Cementový tmel při vysokých teplotách .....	16
3.2.3	Spolupůsobení kameniva a cementového tmelu v průběhu zahřívání.....	19
3.2.4	Ocelová výztuž .....	19
3.2.4.1	Vliv krytí výztuže na odolnost proti požáru .....	19
3.2.5	Odprýskávání betonu .....	20
3.2.5.1	Odprýskávání vysokohodnotného betonu.....	22
3.2.6	Změny mechanických vlastností zahříváného betonu .....	25
3.2.6.1	Pevnost v tlaku.....	25
3.2.6.2	Modul pružnosti.....	25
3.3	Modifikace betonové směsi pro lepší požární odolnost.....	26
3.3.1	Vlákna.....	26
3.3.1.1	Ocelová vlákna .....	27
3.3.1.2	Polypropylenová vlákna .....	28
3.3.1.3	Celulózová vlákna.....	31
3.3.2	Pojivo.....	32
3.3.2.1	Hlinitanový cement.....	32
3.3.2.2	Geopolymerní cement.....	33
3.3.3	Kamenivo .....	34
3.3.4	Příměs .....	34
3.4	Žárobeton .....	34



3.4.1	Definice .....	34
3.4.2	Složení .....	35
3.4.3	Rozdělení žarobetonů .....	35
3.4.4	Technologie výroby .....	36
3.5	Zkoušení betonu vystaveného působení vysokých teplot dle RILEM .....	36
3.5.1	Zkoušky v ustáleném stavu (Steady state tests) .....	38
3.5.1.1	Deformační zkoušky při řízeném napětí .....	38
3.5.1.2	Deformační zkoušky při řízené deformaci .....	39
3.5.1.3	Dlouhodobé dotvarování (Long term creep) .....	39
3.5.1.4	Relaxace (Relaxation) .....	40
3.5.2	Zkoušky za neustálených podmínek .....	40
3.5.2.1	Dotvarování při přechodných podmínkách (Transient creep test) .....	40
3.5.2.2	Mezní síla (Restraint force) .....	40
3.5.3	Doporučení pro modelování zkoušek v laboratorních podmínkách dle RILEM .....	40
3.5.3.1	Velikost a další parametry vzorku .....	40
3.5.3.2	Příprava vzorku .....	41
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	43
4.1	Cíle experimentální části .....	43
4.2	Použité materiály .....	43
4.2.1	Cement .....	43
4.2.2	Kamenivo .....	44
4.2.2.1	Kamenivo Mastý .....	44
4.2.2.2	Kamenivo Bohučovice .....	47
4.2.3	Plastifikátor .....	49
4.2.4	Vlákna do betonu .....	50
4.3	Navržené receptury .....	50
4.3.1	Receptura MF .....	50
4.3.2	Receptura BF .....	51
4.3.3	Receptura MFP .....	51
4.4	Metodika experimentální práce .....	52
4.5	Výsledky experimentální části .....	54
4.5.1	Objemová hmotnost čerstvého betonu .....	54
4.5.2	Dynamický modul pružnosti .....	57
4.5.3	Pevnost betonu v tlaku .....	58
4.5.4	Vizuální hodnocení povrchu zkušebních těles .....	60

4.5.4.1	Receptura MF .....	60
4.5.4.2	Receptura BF .....	61
4.5.4.3	Receptura MFP .....	62
4.6	Vyhodnocení experimentální části.....	63
4.6.1	Objemová hmotnost betonu .....	63
4.6.2	Dynamický modul pružnosti betonu .....	63
4.6.3	Pevnost betonu v tlaku.....	64
4.6.4	Vizuální posouzení zkoušených těles .....	64
5	ZÁVĚR.....	65
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	67
7	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	69
8	SEZNAM TABULEK.....	71

# 1 ÚVOD

V dnešní době se stupňuje důraz na bezpečnost, ať už bezpečnost při práci, tak i bezpečnost při užívání stavebních konstrukcí. S rostoucí populací se zvyšují i rizika spojená se vznikem požáru, nejen vlivem selhávajícího lidského faktoru, ale i při přírodních katastrofách.

Beton se začal používat již v počátku minulého století, je to kompozitní materiál, který má řadu výhodných vlastností z ohledem na působení vysokých teplot. Není hořlavý, neprodukuje žádné toxické plyny a vyznačuje se nízkou tepelnou vodivostí. Navzdory těmto dobrým vlastnostem, pokud není beton přímo navržen proti požáru, může dojít k velmi zásadním druhům porušení betonových konstrukcí, jako je např. explozivní odprýskávání, které může výrazně snížit požární odolnost konstrukce. Toto způsobí rychlejší šíření tepla dovnitř konstrukce a tím rychlejší ohřátí ocelových výztuží, což může vést ke kolapsu konstrukce.

## 2 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je provedení rešerší o poznatcích problematiky týkající se působení vysokých teplot na cementové betony. Dále popsat děje, ke kterým dochází při působení vysokých teplot na cementové betony a popsání explozivního odprýskávání betonu. Podle rešeršní literatury definovat požadavky na vhodný typ kameniva, cementu a příměsí pro beton s možným vystavením vysokým teplotám. V experimentální části zkoumat receptury s vybraným typem kameniva, cementu a rozptýlenou výztuží a provést zatížení vysokými teplotami. Dále popsat zvolenou metodiku zatěžování vzorků a sledování změn jejich vlastností před a po působení vysokých teplot.

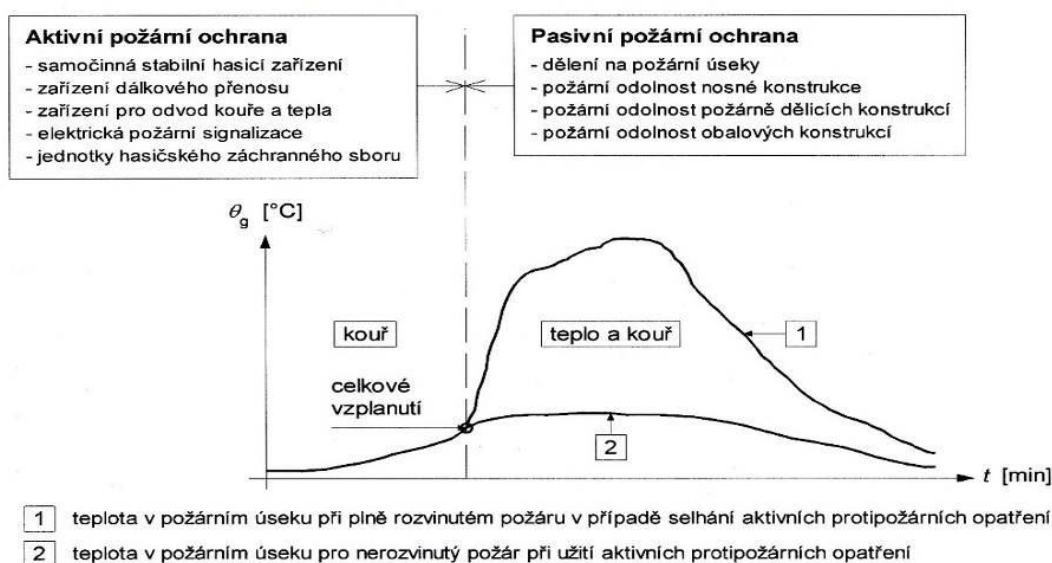
### 3 TEORETICKÁ ČÁST

#### 3.1 Požární bezpečnost

##### 3.1.1 Základní poznatky o požární bezpečnosti

Požární bezpečností stavebních objektů se rozumí schopnost stavebních objektů co nejvíce bránit ztrátám na životech a zdraví osob, popř. zvířat a ztrátám na majetku v případě požáru. Základní požadavky pro omezení požárního rizika mohou být splněny pomocí pasivních požárních opatření, aktivních požárních opatření nebo kombinací těchto dvou. Pasivní ochranou konstrukce se rozumí zachování nosnosti a stability konstrukce s její případnou tepelnou izolací např. dělení na požární úseky. Aktivní požární ochrana brání vzniku a rozvinutí požáru v jeho počátku, např. samočinné hasicí zařízení, elektrická požární signalizace apod. Požárně bezpečnostní řešení by mělo kombinovat oba tyto přístupy. [2]

Důležitou součástí požárně bezpečnostního řešení je zhodnocení navržených stavebních konstrukcí z hlediska jejich požární odolnosti. Jedná se o problematiku vyžadující spolupráci projektanta stavební části, projektanta požární bezpečnosti a statika. Požární odolnost patří mezi základní požadavky kladené na stavby, stejně jako mechanická odolnost a stabilita. [2]



Obrázek 1: Rozdělení aktivní a pasivní ochrany [2]

### 3.1.2 Požárně technické vlastnosti stavebních hmot

V ČR se hmoty v minulosti zatřídňovaly a označovaly po zkouškách provedených dle ČSN 73 0862, při které byl testován soubor pěti vzorků po dobu 20 minut za předepsaných podmínek. Z výsledků těchto zkoušek byla stavební hmota zatříděna do následujících kategorií:

- A – nehořlavé
- B – nesnadno hořlavé
- C1 – těžce hořlavé
- C2 – středně hořlavé
- C3 – lehce hořlavé.

V současné době je ČSN 73 0862 neplatná a stavební výrobky se zkouší na reakci na oheň (hořlavost) podle ČSN EN 13501 – 1. Mezi jednotlivými třídami reakce na oheň a referenčními požárními situacemi platí následující označení: [1]

**Třída A1:** Tyto výrobky nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stádiu.

**Třída A2:** Tyto výrobky vyhovují stejným kritériím jako pro třídu B, ale navíc při plně rozvinutém požáru nepřispívají významně k růstu požáru.

**Třída B:** Jako třída C, ale s přísnějšími požadavky.

**Třída C:** jako u třídy D, ale navíc u při tepelném působení jednotlivého hořícího předmětu vykazují omezené rozšíření plamene.

**Třída D:** Výrobky vyhovující třídě E a jsou schopné odolávat působení malého plamene po delší časový interval bez jeho významného rozšíření. Dále jsou schopny odolávat působení tepla od jednotlivého hořícího předmětu za podstatného zpoždění a omezení uvolňování tepla.

**Třída E:** Výrobky jsou schopny odolávat působení malého plamene po krátký časový interval bez jeho významného rozšíření.

**Třída F:** Výrobky, které nelze zařadit do žádné z předchozích tříd.

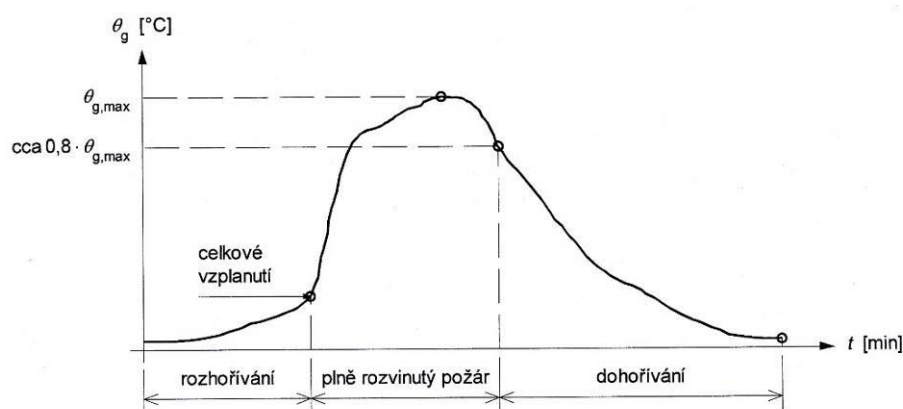
Dále jsou doplňková hodnocení dle vývoje kouře (s1,2,3) a plamenně hořících kapek/částic (d1,2,3)

### 3.1.3 Požární odolnost

Požární odolnost je definována jako doba, během které je konstrukce schopna při požáru zachovat svoji funkci, pro kterou byla navržena. Je dána dobrou do dosažení některého z mezních stavů požární odolnosti. Každý mezní stav se značí písmenem, které přímo specifikuje daný mezní stav a číslicí, která udává dobu v minutách, po kterou je konstrukce schopna si zachovat svoji funkci. Označení R znamená mezní stav únosnosti a stability, označení E značí mezní stav celistvosti. Jako příklad se dá uvést označení R 120, které značí schopnost nosné konstrukce zachovat její vlastnosti při vystavení požáru po dobu 120 minut.[1]

### 3.1.4 Navrhování konstrukcí na účinky požáru

Konstrukce se navrhují podle návrhového scénáře a příslušného návrhového požáru. Průběh požáru je obvykle popisován časovou závislostí teploty plynů. Této závislosti říkáme teplotní křivka (Obrázek 2), ze kterého je patrné rozdělení požáru do tří fází. První fáze se nazývá fáze rozhořívání, která se vyznačuje pomalým nárůstem teploty plynů. Po dosažení bodu celkového vzplanutí nastane fáze plně rozvinutého požáru, kdy hoří veškeré hořlavé látky a dochází k rychlému nárůstu teplot a nakonec je fáze dohořívání (chladnutí), kdy ukončení této fáze je bod, kdy teplota plynů dosáhne teploty, která byla před vypuknutím požáru. Z hlediska navrhování je třeba počítat s tím, že se může v této fázi teplota konstrukcí zvyšovat.[2]

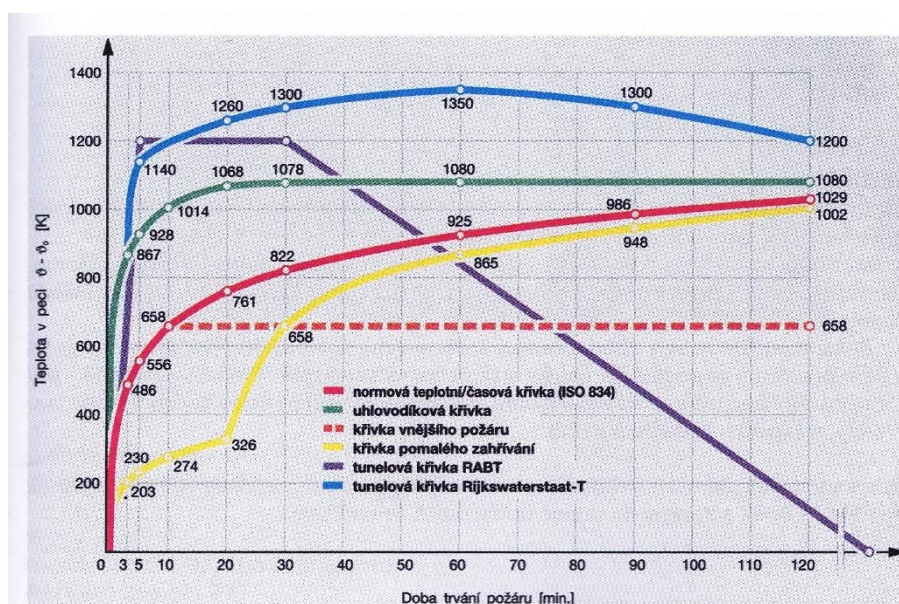


Obrázek 2: Příklad teplotní křivky se skutečným průběhem teplot plynů [2]

### 3.1.4.1 Nominální teplotní křivky

Norma ČSN EN 1991-1-2 udává, že vývoj požáru lze modelovat na různých úrovních přesnosti a obtížnosti. Nejjednodušším řešením je modelování podle nominálních křivek. Ty definují teplotu plynů v požárním úseku pouze jako funkci času trvání požáru. Nominální teplotní křivky popisují fázi plně rozvinutého požáru. Každá křivka je definována rovnicí. Podle ČSN EN 1991-1-2 rozlišujeme tyto nominální teplotní křivky: [2]

- **Normová teplotní křivka:** Často se také označuje jako křivka ISO nebo ISO 834. Odpovídá tzv. celulózovému hoření (hoření dřeva, papíru atd.). Vztahuje se k ní většina dostupných výsledků zkoušek a výpočtů. Účinky požárů definovaných jinými křivkami se často převádějí na normovou teplotní křivku.
- **Křivka vnějšího požáru:** Vztahuje se k požárům působícím na vnější líc stěn.
- **Uhlovodíková křivka:** Popisuje hoření ropy a ropných produktů (simulace požárů v garážích).
- **Křivka pomalého zahřívání:** Tato křivka je definována v normě ČSN EN 13501-2. Tato křivka se uplatní např. při modelování požáru v dutinách zdvojených podlah nebo podhledů.
- **Křivky RABT a Rijkswaterstaat - T:** V tunelech dochází k rychlejšímu vývinu teplot a také požáry dosahují vyšších teplot než u normálních konstrukcí, proto některé státy používají tyto křivky přímo pro návrh tunelů.



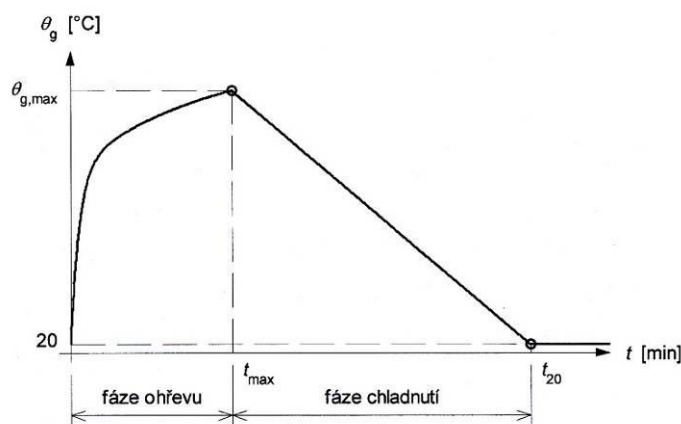
Obrázek 3: Nominální teplotní křivky [3]



Pro reálnější předpověď průběhu požáru lze dle ČSN EN 1991-1-2 využít tzv. přirozené modely požáru, které se dělí na zjednodušené modely požáru a na zpřesněné modely požáru.

### 3.1.4.2 Zjednodušené modely požáru

Pomocí zjednodušeného modelu lze simulovat požáry celého prostoru požárního úseku při předpokládaném rovnoměrném rozložení teplot v prostoru nebo lokální požáry při nerovnoměrném rozložení teplot. Pro první typ je určena tzv. Parametrická teplotní křivka, která zohledňuje požární zatížení, vlastnosti ohraničujících konstrukcí požárního úseku a podmínky větrání. Nejčastější tvar parametrické teplotní křivky je zobrazen na obrázku 4.[2]



Obr. 1.2.4 Parametrická teplotní křivka

Obrázek 4: Parametrická teplotní křivka [2]

Pro druhý typ neboli lokální požáry se stanovuje tepelné zatížení způsobem popsaným v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2.

### 3.1.4.3 Zpřesněné modely požáru

Tento typ modelování by měl zohledňovat vlastnosti plynů, výměnu hmoty a energie. Norma ČSN EN 1991-1-2 uvádí následující rozdělení:

- Jednozónový model
- Dvouzónový model
- Výpočetní dynamické modely kapalin a plynů

Jednozónový model odpovídá podmínkám po celkovém vzplanutí. Rozložení teploty, hustoty, vnitřní energie a tlaku plynů se předpokládá rovnoměrné. Jednozónový model musí respektovat zachování hmoty a energie, výměnu hmoty mezi vnitřním, vnějším plynem a ohněm a výměnu energie mezi ohněm a vnitřním plynem, stěnami a otvory. Dvouzónový model je založen na předpokladu hromadění produktu hoření pod stropem požárního úseku. Rozlišuje se horní a spodní vrstva, přičemž se tloušťka mění v průběhu požáru. Mezi vrstvami dochází k výměně chemických látek, hmoty a energie. Rozložení teploty ve vrstvách je časově závislé a prostorově nezávislé. Výpočetní dynamické modely kapalin a plynů tzv. CFD (computational fluid dynamic models) simulují průběh požáru v prostoru i čase. Pro jejich využití je požadováno pokročilého výpočetního vybavení a metod. [2]

### 3.2 Beton při působení vysokých teplot

Beton je nehořlavý materiál, který vykazuje oproti ostatním stavebním materiálům vynikající vlastnosti z hlediska požární odolnosti. To ovšem neznamená, že betonové, železobetonové nebo předpjaté konstrukce nejsou působením zvýšených teplot negativně ovlivněny. [2]

Trvanlivost železobetonové konstrukce v žáru může být definována jako její schopnost zachovat v případě požáru původní funkci, udržet své statické vlastnosti, ochránit ocelovou výztuž a přilehlé okolí ochránit před toxickými plyny. Účinek vysoké teploty na vlastnosti betonu je komplexní. Trvanlivost závisí na:

- složení betonu (w/c, typu a obsahu kameniva, typu cementu...).
- hutnosti a homogenitě betonu.
- zatížení betonové konstrukce během požáru. [5]

Působení ohně na betony má za následek postupné zhoršení kvality betonu. Dochází ke zhroucení struktury cementového gelu a tím pádem také ke ztrátě nosné kapacity. 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 (hasicími zákroky). Směrodatné jsou teploty od 300 °C do 1000 °C nebo až 1300 °C a doba jejich trvání. Nejprve můžeme očekávat, že zahřátím na vysoké teploty se pevnost

betonu zmenší, protože se tmel i kamenné složky žářem mění. Změny budou různé podle složení cementu a pevných složek, podle výše žáru a jeho trvání. Rozdíly pevnosti v tlaku, ke kterým dochází za zvýšených teplot, vyplývají ze změn, ke kterým dochází v betonu v průběhu zahřívání. (Tabulka 1) [6].

*Tabulka 1: Změny probíhající v betonu při vysokých teplotách [2]*

Teplota betonu $\theta$ [°C]	Proces
20-100	Dochází k hydrataci (přeměna volné vody v chemicky vázanou). Vznik hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého ( $\text{Ca(OH)}_2$ – portlandit ).
100	Začíná dehydratace cementového tmelu – uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů.
150	Vrcholí první fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH).
200 +	Dochází k uvolňování vázané vody.
300 +	Pokračuje rozklad hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého ( $\text{Ca(OH)}_2$ – portlandit) za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo.
550-600	Dochází k fázové změně křemene (v silikátovém kamenivu) z triklinické soustavy na soustavu hexagonální. To vede společně s vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k narušování vazeb mezi kamenivem a cementovým tmelem.
700-750	Vrcholí druhá fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH).
800 +	Hydraulické vazby v cementovém tmele přecházejí na vazby keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při kterém vzniká oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) – plynná látka rozrušující beton.
900	Totální dekompozice cementového tmelu.
1000 +	Začíná tavení některých složek betonu.
1200 +	Celkové tavení materiálu.

### 3.2.1 Kamenivo při vysokých teplotách

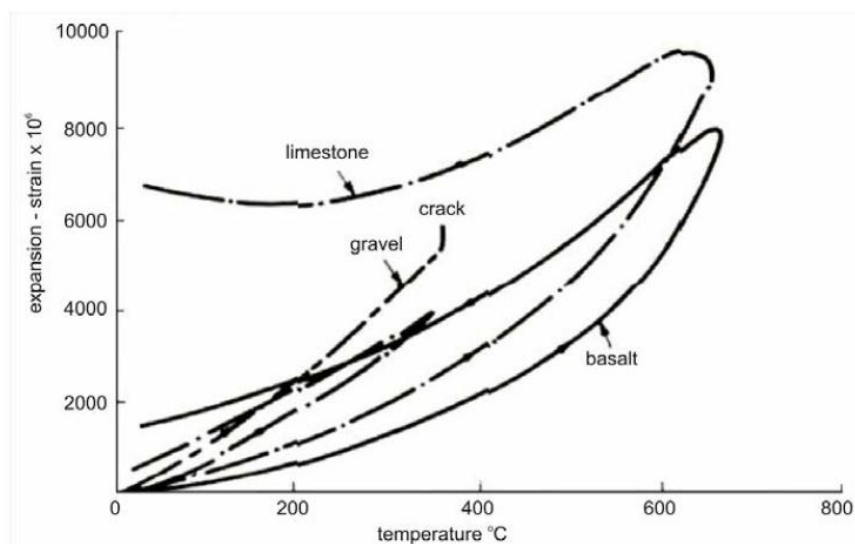
Analýza chování kameniva při vysokých teplotách je velmi náročná, protože každý druh kameniva má různé mineralogické složení a s tím související i jinou tepelnou roztažnost.

Téměř všechny pevné látky zvětšují svůj objem s rostoucí teplotou, stejně tak je tomu i u kameniva. Z tohoto důvodu je tepelná roztažnost důležitou charakteristikou kameniva z hlediska jeho reakce na zvýšenou teplotu. Tabulka 2 udává hodnoty koeficientu lineární tepelné roztažnosti pro různé typy hornin. Mineralogické složení rozhodne o celkovém tepelném přetvoření kameniva, protože všechny minerály se liší v hodnotě tepelné roztažnosti. Mimo tepelného přetvoření mohou probíhat i metamorfni přeměny minerálů. Např. přeměna křemenného kameniva při 574 °C. Tato změna se týká nárůstu objemu o přibližně 0,84 %. Tepelná nestabilita vápence se vyskytuje v případě, že je kamenivo zahřáté na 600 °C. Navíc se uhličitánové kamenivo rozkládá na CaO a CO<sub>2</sub> při teplotě přibližně 700 °C. Při ochlazování vytvořené CaO může začít hydratovat s výslednou expanzí až 40 %. [4]

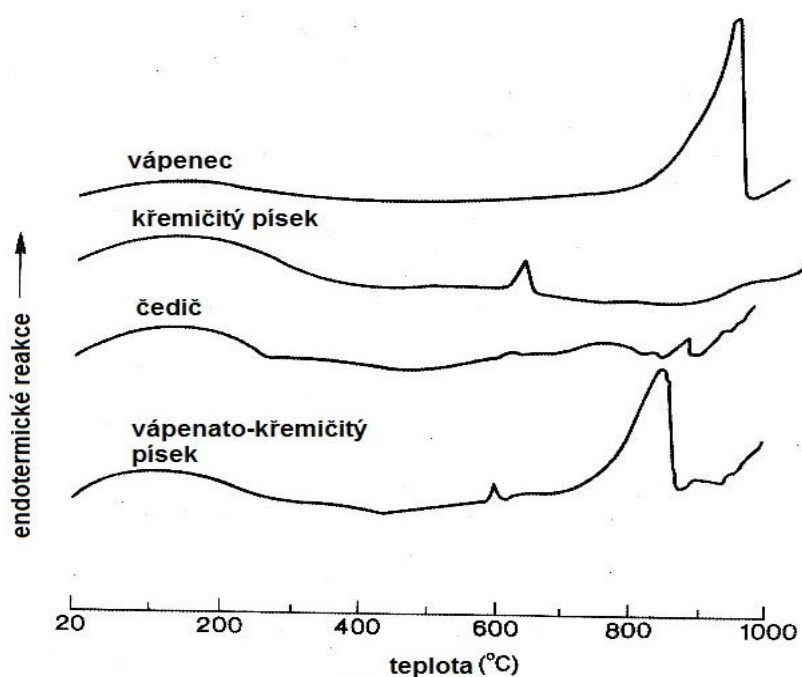
*Tabulka 2: Koeficienty lineární tepelné roztažnosti různých typů hornin [4]*

Typ horniny	Koeficient lineární tepelné roztažnosti [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]
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

Vzhledem k reakci kameniva na vysoké teploty, bude vhodné do betonu kamenivo s nízkou tepelnou roztažností a zanedbatelným zbytkovým přetvořením. Obrázek 5 ukazuje příklady křivek tepelného přetvoření pro šterk, vápenec a čedič. Mono-minerální struktura nevykazuje fázové změny pozorované během zahřívání. Kameniva, která vykazují tepelnou stabilitu, nemají žádné vrcholy podél DTA a TGA křivek (Obrázek 6). [4]



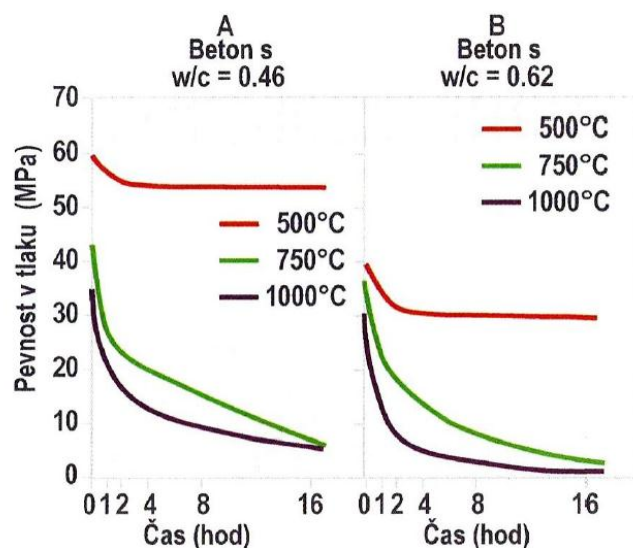
Obrázek 5: Tepelná přetvoření některých kameniv [4]



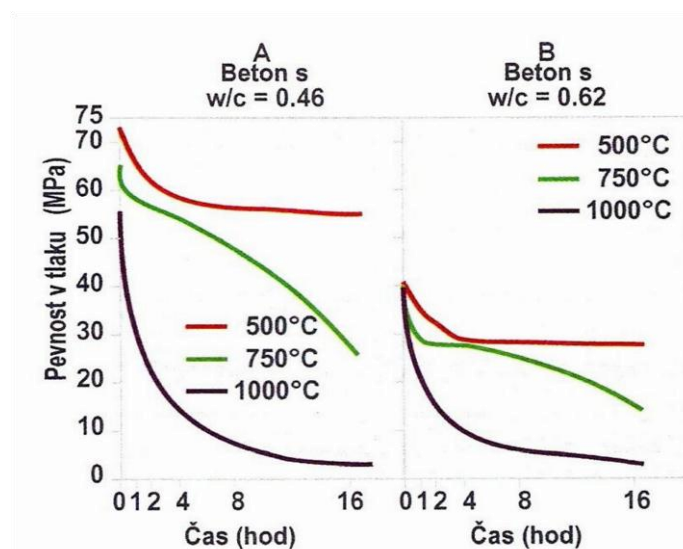
Obrázek 6: Křivky měřené DTA přístrojem při ohřevu 10 °C/min v dusíku [4]

U betonů s kamenivem obsahujícím zejména křemen je zaznamenáno výraznější snížení pevností než u betonů s uhličitánovým kamenivem, zejména pokud je teplota žáru nižší než 750 °C. Lepší chování betonů s uhličitánovým kamenivem při vysokých teplotách je vysvětlováno vyšším množstvím tepla, které se spotřebuje při endotermickém rozkladu na oxid uhličitý při teplotě asi 800 °C. [5]





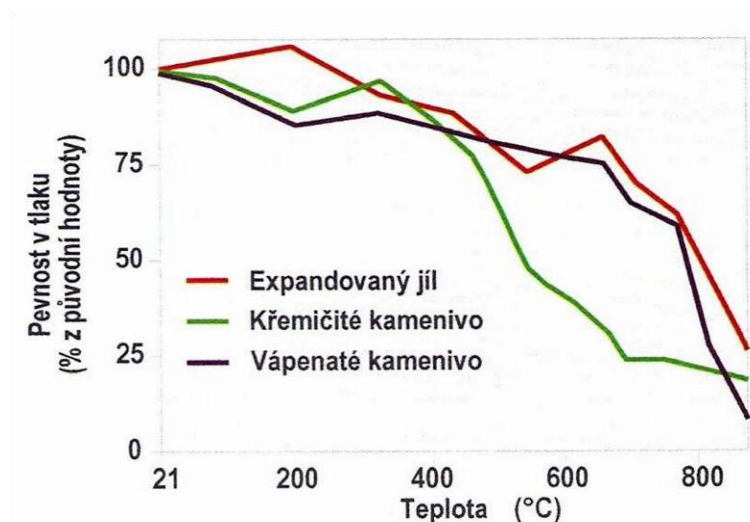
Obrázek 7: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících křemičité kamenivo [5]



Obrázek 8: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících vápencové kamenivo [5]

Křemičité kamenivo se vyznačuje výrazným snížením pevnosti při teplotě kolem 570 °C. To je způsobeno přeměnou křemene ( $\text{SiO}_2$ ) z modifikace  $\beta$  do modifikace  $\alpha$ , s daleko nižší hustotou. Tuto modifikační přeměnu při 573 °C doprovází výrazné zvýšení objemu v teplotním intervalu 450 – 650 °C. Beton je protkán sítí puklin a trhlin, které snižují jeho tlakovou pevnost o více než 80%. Betony s vápencem nebo expandovaným jílem ztrácejí při teplotách do 650 °C pouze 20 % své původní pevnosti (Obrázek 9). Kromě toho vykazují lehké betony s expandovaným jílem lepší tepelně izolační schopnosti než běžné betony (s uhličitánovým nebo křemičitým kamenivem). Tím je v lehkých betonech lépe chráněna výztuž. Ochrana výztuže je jedním z hlavních problémů při

posuzování požární odolnosti konstrukce. Z tohoto hlediska se nejlépe chová kamenivo z expandovaného jílu a nejhůře kamenivo křemičité. Kamenivo uhličitánové se řadí svými vlastnostmi mezi tyto 2 kameniva. [5]



Obrázek 9: Vliv druhu kameniva a pevnosti v tlaku při vyšších teplotách [5]

### 3.2.2 Cementový tmel při vysokých teplotách

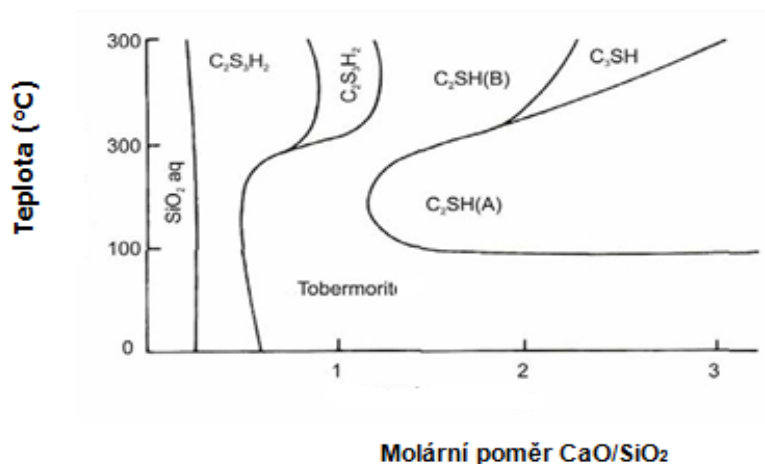
Zahřátí cementového tmelu vede k odpařování několika druhů vody, která je přítomna v materiálu. Voda se z materiálu uvolňuje postupně s rostoucí teplotou. Nejprve odchází z cementového tmelu voda volná, poté voda kapilární, posléze zahřátím na vyšší teplotu se uvolňuje i voda chemicky vázaná. Nicméně pokud je cementový tmel zahříván v uzavřeném, vlhkém prostředí (vnitřní autoklávování), může nastat hydrotermální reakce, 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. [4]

Povaha fázových změn bude záviset na několika aspektech:

- mineralogickém složení cementu,
- poměru  $\text{CaO/SiO}_2$ ,
- množství jemných podílů,
- úrovni dosažené teploty a tlaku.

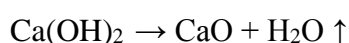
Zahřívání cementového tmelu s poměrem  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  okolo hodnoty 1,5 až na teploty přes  $110^\circ\text{C}$  udává podmínky vzniku několika podob křemičitanů vápenatých, které jsou obecně lehce krystalické.

Obrázek 10 od Verbecka a Copelanda ukazuje, že pokud poměr  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  je přibližně 1 a teplota dosahuje nad  $150^\circ\text{C}$ , nastávají podmínky pro vznik Tobemorit gelu. Zvýšením teploty na rozmezí  $180^\circ\text{C}$  a  $200^\circ\text{C}$  mohou vznikat ostatní křemičitany Xonolit a Hillebrandit.



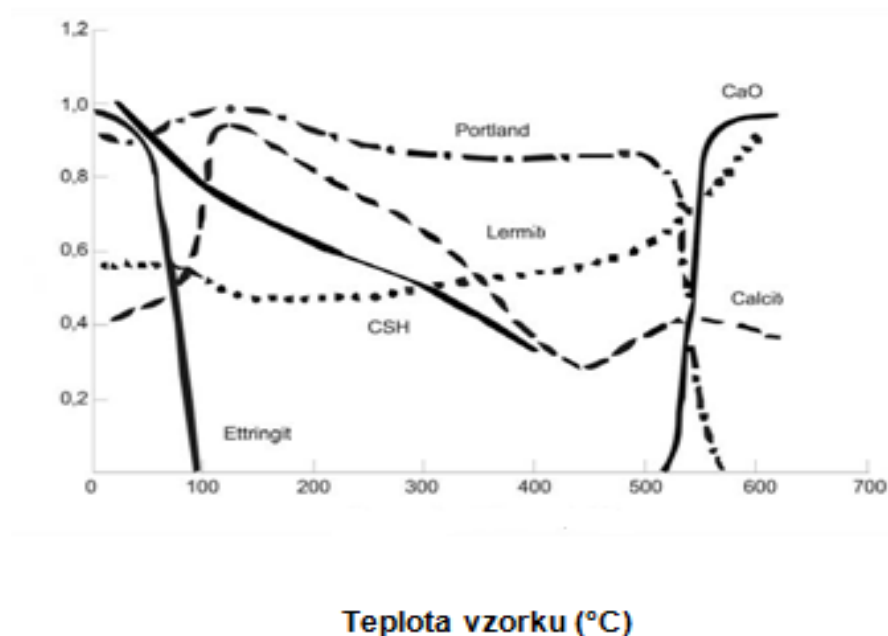
Obrázek 10: Vliv molárního poměru ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) a teploty na CSH fáze hydratačních produktů [4]

Obrázek 11 demonstruje změny v množství základních minerálů cementové pasty z portlandského cementu zahřáté na  $700^\circ\text{C}$  s nárůstem  $1^\circ\text{C}$  za minutu. Pozorováno bylo šest základních minerálů cementové pasty, a to portlandit, CSH gel, ettringit, larnit, kalcit a oxid vápenatý. Ettringit se rozkládá jako první, při teplotách  $100^\circ\text{C}$ . V CSH gelu je dehydratace postupná a dochází k ní už od začátku zahřívání materiálu. Stojí za zmínění si v tomto bodě všimnout, že struktura cementové pasty je částečně narušena již při teplotě  $105^\circ\text{C}$ , což je mimochodem standardní teplota pro sušení materiálů. Jakmile se cementová pasta zahřívá na teplotu v rozmezí  $500 - 550^\circ\text{C}$ , obsah portlanditu rychle klesá, jelikož se rozkládá podle následující reakce:





Rovnice rozkladu portlanditu vysvětluje zvýšení obsahu CaO v cementové pastě při teplotě okolo 550 °C. CaO vzniklé touto reakcí nemá jako prvek v Portlandském betonu po ochlazení žádné využití. [4]



Obrázek 11: Vývoj normalizované intenzity základních minerálů pro portlandskou cementovou pastu [4]

Jedním z procesů, ke kterým dochází v zahřívaných cementových pastách, je vysychání obsažené vody. Voda se vyskytuje v sušině různě vázaná. Pořadí odstraňování vody závisí na energii, jež je vázána na hmotu. Jako první se odpařuje volná voda. V uvolňování pokračuje voda kapilární 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 (dehydratace). Mechanické vlastnosti cementové pasty jsou silně ovlivněny chemickými vazbami a soudržností sil mezi “listy”, které tvoří CSH gel. Předpokládá se, že přibližně 50 % pevnosti cementové pasty pochází z kohezních sil (obrovské oblasti “listů” CSH gelu). Odpařováním vody, k němuž dochází mezi “listy” CSH gelu, jsou silně ovlivňovány mechanické vlastnosti cementové pasty. Dehydratačním procesem CSH gelu zmenšují hydráty svůj objem, což zvyšuje pórovitost cementové matrice. Narůstá celkový objem pórů a tím pádem také průměrná velikost. [4]

### **3.2.3 Spolupůsobení kameniva a cementového tmelu v průběhu zahřívání**

Zahříváním betonu se objem kameniva zvětšuje a zároveň dochází ke smršťování cementového tmelu, který ho obklopuje. Vzhledem k vysokému podílu kameniva v betonu, které je poměrně důležité pro stabilitu. Do značné míry je destrukce způsobena praskáním, ke kterému dochází v důsledku rozdílu tepelného přetvoření mezi smršťujícím se cementovým tmelem a expandujícím kamenivem. [4]

### **3.2.4 Ocelová výztuž**

Vysoká teplota ovlivňuje výrazně vlastnosti betonu. Ovšem ještě větší nebezpečí kolapsu hrozí výztuži, která ztrácí své mechanické vlastnosti při teplotách kolem 450 – 500 °C. Beton sám o sobě vydrží teploty až do hranice 650 °C. Díky vysoké tepelné vodivosti výztuže může teplota v dlouhých částech výztuže snadno dosáhnout kritické teploty 500 °C a přivodit riziko kolapsu. [5]

#### **3.2.4.1 Vliv krytí výztuže na odolnost proti požáru**

Během požáru beton musí chránit výztuž tak dlouho, jak jen je to možné. Z tohoto hlediska má zcela zásadní význam tloušťka krytí, která by měla udržet teplotu výztuže pod 450 °C. Beton v krycí vrstvě musí být ve všech místech dobře zhutněn, toto musí být zajištěno zejména v těch konstrukcích, ve kterých hrozí potenciální riziko požáru. I malé lokalizované defekty ve formě drobných trhlin mohou ohrozit chování železobetonové konstrukce. V případě požáru totiž mohou horké plyny snadno pronikat těmito trhlinkami v krycí vrstvě až k výztuži a zahřívát ji. Díky vysoké tepelné vodivosti oceli (125 až 195 kJ/[m<sup>2</sup> h°C]) v teplotním intervalu 0-600 °C je tepelný tok rychle přenášen do tyčí výztuže. Výztuž se pak díky náhlému zvýšení teploty rozpíná a dochází k odlupování povrchové vrstvy betonu, protože beton má daleko nižší tepelnou vodivost (6 až 8 kJ/[m<sup>2</sup> h°C]) než ocel, tudíž se zahřívá mnohem pomaleji. Jakmile vazba mezi ocelí a betonem nemůže dále vzdorovat rostoucímu tahovému napětí, vyvolanému teplotním rozdílem mezi výztuží a betonem, vazba se poruší a dojde k oddělení krycí vrstvy betonu od výztuže. Tomuto lze dobře zabránit zvýšením tloušťky krytí: čím silnější je krytí, tím nižší je riziko, že lokální trhlinky dosáhnou až k výztuži a dojde ke kolapsu. Obecně, pro dobře zhutněný a

homogenní beton je teploty 500 °C ve výztuži dosaženo až po 50 – 70 minutách, jestliže tloušťka krytí je 20 mm, po 80 – 110 minutách pro krytí 30 mm, po 120 – 160 minutách pro krytí 40 mm a po 180 – 240 minutách pro krytí 50 mm. [5]

Pro danou tloušťku krytí se uvedené časy mohou ještě zvýšit, pokud je použito lehkého betonu, protože má nižší tepelnou vodivost. Co se týká kvality krytí, ovlivňují ji dva aspekty, jež se zaměřují na hutnost a nepropustnost betonu: dostatečné vlhké ošetřování a dobré zhutnění. [5]

### 3.2.5 Odprýskávání betonu

Odprýskávání je násilné nebo nenásilné odlamování vrstviček nebo kousků betonu z povrchu konstrukčních prvků, jestliže jsou vystaveny vysokým a rychle rostoucím teplotám. Nejzávažnější forma odprýskávání, která je způsobována kombinací vzrůstajícího tlaku v pórech a rostoucího napětí od teploty, se obvykle objevuje během prvních dvaceti až třiceti minut požáru. [7]

Odprýskávání může být rozděleno do 4 skupin:

- Explosivní odprýskávání – Explosivní odprýskávání několika velkých kusů betonu z povrchu prutu.
- Lokální odprýskávání – Odprýskávání malých kusů betonu z jednotlivých částí povrchu, např. rohů.
- Postupné odprýskávání průřezu – Objevuje se většinou při velmi vysokých teplotách a s lehkým kamenivem.
- Odprýskávání v důsledku chemického narušení: Ztráta malých kousků betonu z povrchu.

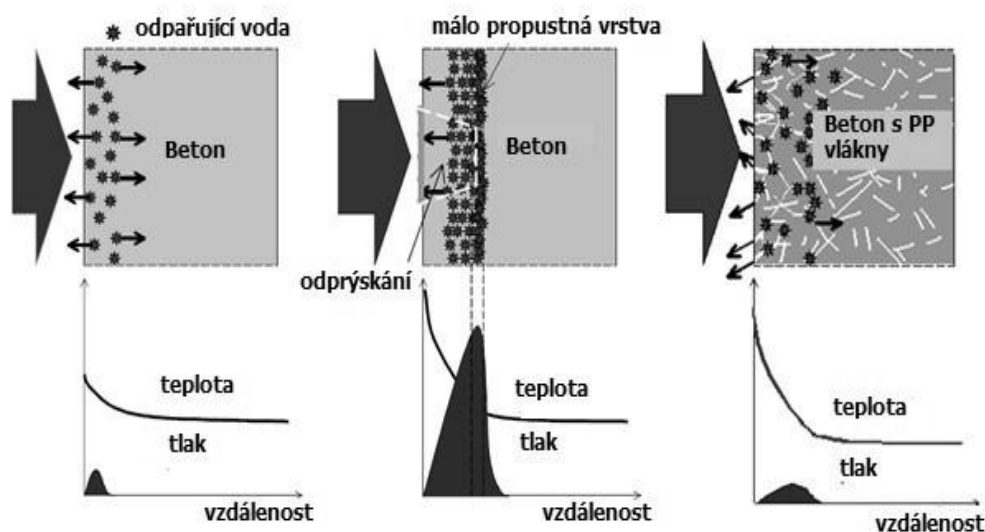
Odprýskávání je úzce spojeno s:

- Obsahem vody: je jednou z hlavních příčin odprýskávání. Pokud není v betonu žádná vlhkost, neobjevuje se žádné explosivní oprýskávání. Rozložení vlhkosti má jen nepatrný význam.
- Způsobem zahřívání: je jednou z dalších hlavních příčin odprýskávání. Čím je vyšší rychlost ohřívání, tím je vyšší pravděpodobnost odprýskávání. Zahřívání

z více jak jedné strany zvyšuje možnost odprýskávání díky zvětšenému tlaku v pórech a rychlejšímu vypařování.

- Tlakovým namáháním: díky vnějšímu zatěžování nebo předepnutí se zvyšuje možnost odprýskávání. Běžně se odprýskávání objevuje ve tlačných zónách strukturních prvků.
- Tloušťkou prvku: je také důležitá. S tlustším prvkem klesá možnost odprýskávání.
- Vyztužením: může zvýšit riziko odprýskávání. Vysoká koncentrace výztuže v rozích prvků zvyšuje možnost odprýskávání.
- Kamenivem: jako křemen, rula a břidlice mohou způsobovat lokální nebo postupné odprýskávání, ale pouze při vysokých teplotách.
- Dávkováním směsi: Zvýšení pórovitosti a snížení průměru pórů vede k zvýšení rizika odprýskávání. [8]

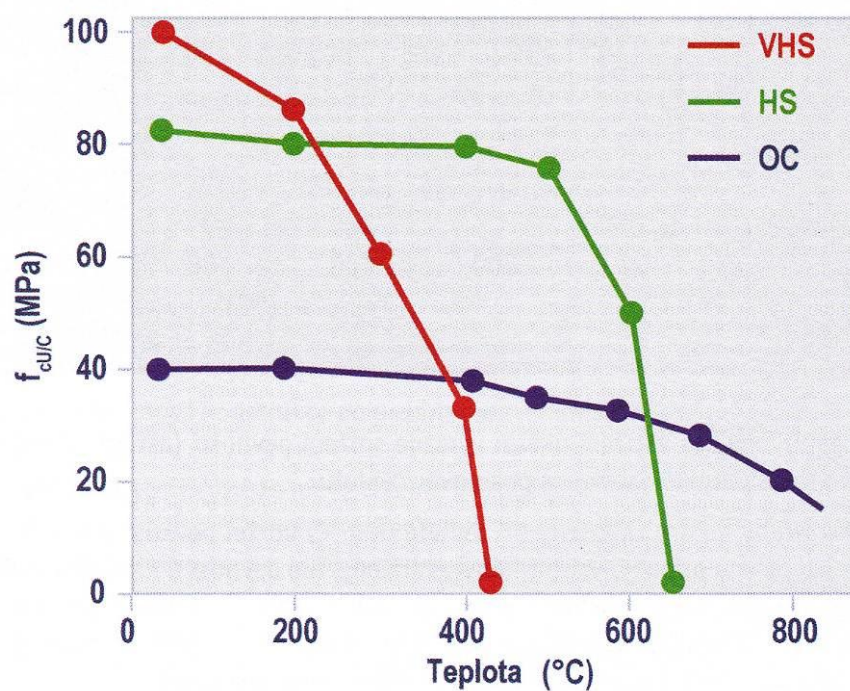
Explozivní odprýskání se řadí mezi jedny z nejvíce poškozujících a nebezpečných vlivů pro betonové konstrukce. Prokázán je významný vliv existujících procesů, jakými jsou tepelné dilatace, procesy chemické (dehydratace cementové pasty), vlhkostní (odpařování pórové vody spojené se zvýšením tlaku vodních par), mechanické (vznik trhlin) procesy poškození. Tyto mechanismy vznikají z faktorů spojených s kolísáním teploty uvnitř betonové struktury. Mechanismy způsobující explozivní odprýskání, či rozpad při požáru nebyly zatím plně vysvětleny. Je však zřejmé, že nejdůležitějšími faktory jsou vlhkost betonu a mikrostruktura materiálu. Explozivní odprýskávání je vážnou doprovodnou formou reakce konstrukce betonu na vysoké teploty. Tento jev může představovat katastrofální selhání betonových konstrukcí, které může vést k poruše nebo ztrátě celistvosti a stability konstrukce. Během působení vysoké teploty na beton dochází k přeměně pevné fáze struktury spojené s chemickým rozkladem cementové pasty. Tyto procesy vedou k mechanicky a chemicky iniciovaným mikrotrhlinám, k méně hutné struktuře a tak a zvýšené pórovitosti betonu. [6]



Obrázek 12: Diagram vysvětlující výskyt explozivního odprýskávání vlivem zvýšeného vnitřního tlaku v ohřívaném prvku. PP vlákna jako efektivní metoda snížení tlaku par [4]

### 3.2.5.1 Odprýskávání vysokohodnotného betonu

Zejména u vysokohodnotných betonů (High Performance Concrete) se objevuje tzv. spalling. Tyto betony se vyznačují velmi hutnou mikrostrukturou (difúze vodní páry je proto omezená) a vlhkostí převyšující 3%. Stav vyvolaný mechanickým zatížením a nárůstem teploty ještě zvýrazňuje tlak a vlhkost uvnitř materiálu. Voda obsažená v betonu se při teplotě nad 100 °C mění na vodní páru. S rostoucí teplotou roste také vnitřní tlak vodní páry v betonu. Pokud je mikrostruktura betonu spíše otevřená, tzn. propojený pórový systém (vysoký vodní součinitel, nebo např. PP vlákna), pára může unikat poměrně rychle, čímž se tlak vodní páry sníží. Pokud má však beton hutnější strukturu, tlak vodní páry může dosáhnout vysokých hodnot převyšujících hranici 3 MPa. Navíc omezí tepelnou roztažnost zahřívaného 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. [4]



Obrázek 13: Porovnání vlivu teploty na ztrátu pevnosti běžného betonu (OC), vysokopevnostního betonu (HS) a vysokopevnostního betonu s pevností nad 100 MPa (VHS) [5]

V Tabulce 3 jsou prezentovány různé druhy prevence proti odprýskávání betonu obecně. Každá metoda může mít své využití, pouze záleží na okolnostech, jaké požadované vlastnosti budeme od konstrukce požadovat. [7]

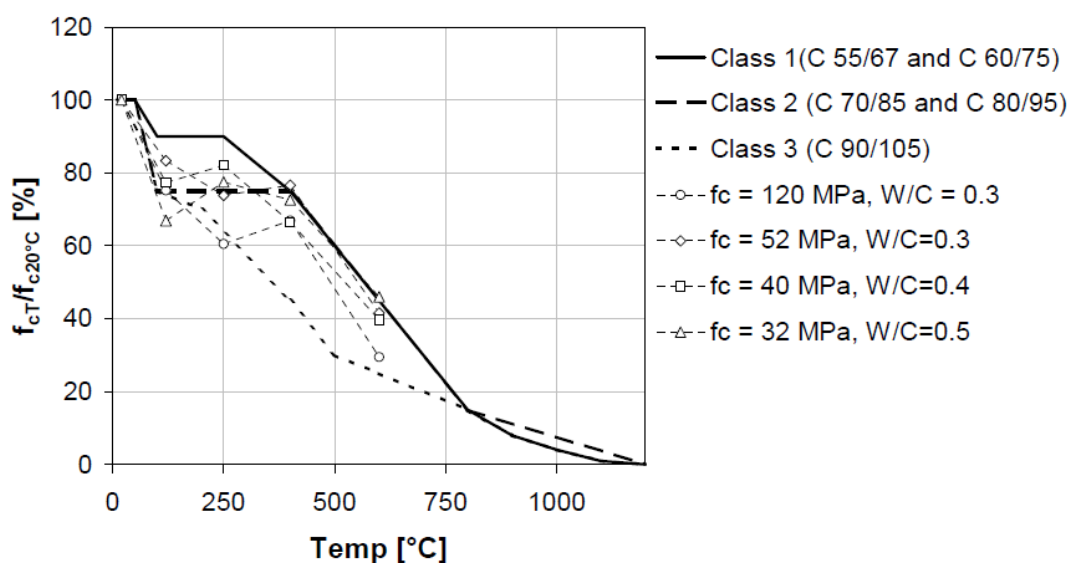
Tabulka 3: Zhodnocení jednotlivých opatření betonu proti odprýskávání [7]

Metoda	Účinnost	Poznámky
Polypropylenová vlákna	Velmi účinná i v betonech vysokých pevností	Levné řešení, které však nezabrání odprýskávání v betonech velmi vysokých pevností, neredukuje
Provzdušňující přísada	Účinná při nízkém obsahu vlhkosti	Může snižovat pevnost
Teplotní bariéra	Velmi účinná	Snižuje teplotu betonu a zvyšuje odolnost konstrukce vůči požáru
Řízený obsah vlhkosti	Snižuje tlak vodních par	Obsah vlhkosti je v tunelech obvykle vyšší než v budovách a je obtížnější ho řídit
Řízení tlakového napětí	Snižuje explozivní tlaky	Neekonomické u konstrukcí velkých průřezů
Volba kameniva	Velmi účinné je užití malých zrn kameniva, které má nízkou teplotní roztažnost	Užití lehkého betonu s nízkou vlhkostí zvyšuje požární odolnost, vyšší vlhkost může vyvolat nebezpečné odprýskávání
Výztuž	Snižuje rozsah poškození odprýskáváním	Omezený rozsah odprýskávání při požáru Channel Tunnel
Přídavná výztuž	Snižuje rozsah poškození odprýskáváním	Obtížné užití v malých a úzkých konstrukcích
Ocelová vlákna	Snižuje rozsah poškození odprýskáváním	Explozivní odprýskávání může být nebezpečnější vzhledem k deformační energii akumulované ve vláknech
Volba typu průřezu	Stejný rozsah poškození ovlivňuje méně únosnost tlustších průřezů	Důležité pro I nosníky a žebrované průřezy

### 3.2.6 Změny mechanických vlastností zahříváného betonu

#### 3.2.6.1 Pevnost v tlaku

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 °C. Výsledky jsou vyjádřeny jako relativní, procentní změny pevnosti v závislosti na teplotě.[4]



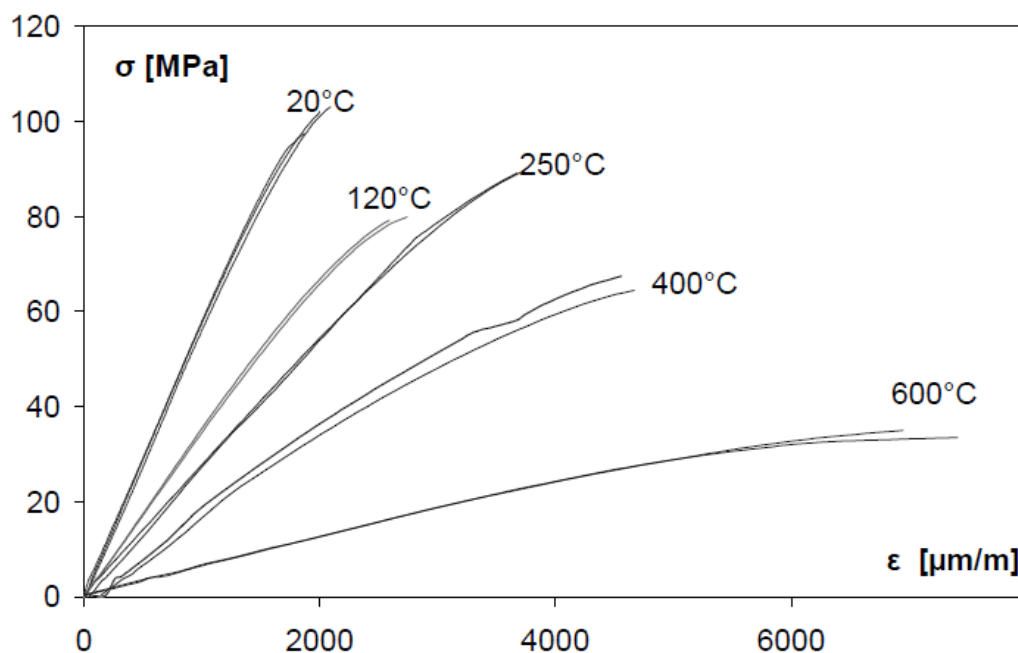
Obrázek 14: Změny v relativní pevnosti v tlaku porovnané s teplotou. Beton dle eurokódu 2(class 1 až 3) oproti výsledkům získaných z betonů s vápencovým kamenivem [4]

Analýza křivek zobrazených na obrázku 14 ukazuje, že poměrná pevnost v tlaku pro většinu testovaných betonů klesá až do zahřátí na 120 °C. Pak je možné pozorovat částečné navrácení pevnosti okolo 250 °C, které je způsobeno odpařováním volné vody z materiálu. Dalším zahříváním způsobujeme systematické 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. [4]

#### 3.2.6.2 Modul pružnosti

Na obrázku 15 je zobrazen deformační diagram pro zahříváné betony. Modul pružnosti těchto betonů je velmi podobný pro všechny vodní součinitele. Ačkoliv všechny tyto výsledky se zdají být nižší než v doporučení dle eurokódu 2.





Obrázek 15: Deformační diagram pro beton s pevností v tlaku 100 MPa, získaný pro teploty 120, 250, 400, 600 °C [4]

### 3.3 Modifikace betonové směsi pro lepší požární odolnost

#### 3.3.1 Vlákna

Vyztužení betonu vlákny může výrazně změnit nebo ovlivnit vlastnosti v čerstvém i zatvrdlém stavu. Musí se brát v potaz to, že vyztužení vlákny se v žádném případě nemůže rovnat klasickému vyztužení pruty nebo sítěmi. Z hlediska dosažení trvalých změn jsou pro vyztužování nejvíce používána vlákna ocelová. V případě štíhlých nebo tvarově náročnějších prvků mají uplatnění i vlákna z alkalickovzdorného skla. [9]

Rozdělení vláken dle funkce v betonu:

- Ocelová, alkalickovzdorná skleněná, uhlíková:
  - Vyznačují se dostatečnou pevností, ohybovou tuhostí a vysokým modulem pružnosti.
  - Zlepšují pevnost ztvrdlého betonu v tahu (cca o 50 až 100 %) a pevnost v tlaku (cca o 10 %). Tím omezují riziko vzniku trhlin.
  - Snižují riziko křehkého lomu (vyšší odolnost při dynamickém zatížení).

- Organická vlákna přírodní nebo syntetická:
  - Vyznačují se malým modulem pružnosti a nízkou mechanickou pevností.
  - Zvyšují odolnost betonu proti vzniku a šíření smršťovacích trhlin.[9]

*Tabulka 4: Vlákná používaná do betonu a jejich vlastnosti [10]*

Vlákná	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Mezní protažení [%]	Měrná hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
Azbestová	550-960	82-138	0,6	3200
Celulózová	400-620	6,9	10-25	1500
Ocelová	270-2700	200	0,5-35	7800
Polyethylenová	÷ 690	0,14-0,41	÷ 10	950
Polypropylenová	550-750	3,45	÷ 25	900
Polyesterová (houževnatá)	720-860	8,28	11-13	1400
Skleněná	1700 (prameny) 3500 (monovlákná)	72	2,4	2680
Uhlíková	÷ 2000	200-500	0,6-1,25	do 2000
Cementová matrice	3,7	10-45	0,02	2500

### 3.3.1.1 Ocelová vlákna

Betony vyztužené ocelovými vlákny nazýváme drátkobetony. Tyto betony řadíme s ohledem na chování, které vykazuje při zatížení a deformacích, mezi nevyztužený beton a beton vyztužený. Ocelová vlákna jsou schopny přenášet tahová zatížení i po vzniku trhlin v betonu (po překročení vrcholové tahové pevnosti).

Při použití ocelových vláken očekáváme tyto vlastnosti:

- Vyšší pevnost v tahu, příčném tahu a tahu za ohybu
- Zvýšená rázová pevnost
- Jistá odolnost proti vzniku mikrotrhlin v betonu

Ocelová vlákna zvýší mezní protažení betonu a také vykazují mírné zvýšení pevnosti, které je ale zanedbatelné. Největší efekt mají ocelová vlákna při namáhání v tahu za ohybu, kdy se zásadně mění průběh pracovního diagramu. U betonů nižších pevnostních tříd s malou pevností v tahu se vlákna aktivují rychle, zde se však vlákna nepřetrhají, ale pomalu se vytahují z cementové matrice v důsledku malé soudržnosti tohoto betonu

s vlákny. U betonů s vyššími pevnostmi lze vlákna zcela využít až do jejich přetržení. Ovšem v porovnání s betony nižších pevností toto zlepšení není tak výrazné.

Ocelová vlákna lze rozdělit dle výroby:

- Ze za studena taženého ocelového drátu
- Oddělovaná z taveniny
- Protahovaná z drátu taženého za studena
- Frézovaná z ocelových bloků

Vazba mezi matricí a ocelovými vlákny je vzájemným mechanickým spojením, třením a adhezí. Proto je běžné u těchto vláken zvyšovat vazebnou sílu mezi vláknem a matricí pomocí tvarování vláken podélně nebo na koncích.[10]



*Obrázek 16: Ocelová vlákna do betonu [12]*

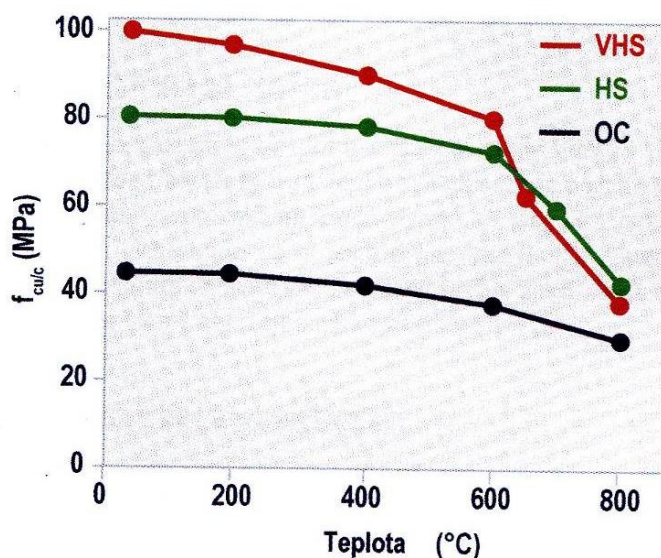
Zvláštní typ rozptýlené výztuže představují vlákna kovová nerezová vlákna s amorfní strukturou, které se vyrábí prudkým zchlazením roztavené chromové oceli bohaté na křemík a fosfor tímto způsobem vzniknou úzké pásy o délce 5 až 30 mm, tloušťce 20 až 30  $\mu\text{m}$  a šířce 1 až 1,5 mm. Mechanické vlastnosti jsou velmi příznivé, vlákna vykazují tahovou pevnost 1400 až 2300 MPa. Jsou mimořádně vhodné pro výrobu torkretovacích betonů.[9]

### **3.3.1.2 Polypropylenová vlákna**

Polymerní vlákna se do betonu přidávají pro zamezení vzniku smršťovacích trhlin a pro zajištění požární odolnosti. Pro rovnoměrné rozptýlení výztuže do prvku se vlákna opatřují tzv. disperzibilní lubrikací. Jsou používány prameny z monovláken, které se po zamíchání do betonu rozmísí a vlákna působí samostatně. Dávkování těchto vláken se pohybuje většinou od 0,7-1,1 kg na 1  $\text{m}^3$ . Jemná vlákna snižují zpracovatelnost betonu. Jemná vlákna na rozdíl od vláken ocelových mají tu výhodu, že na svém povrchu absorbují vodu, kterou v průběhu hydratace postupně uvolňují, což je velmi kladný účinek zejména při vyšších teplotách. Většina jemných polymerních vláken není určena pro zvýšení pevnosti betonu, ale používají se pro tyto účely: [10]

- Omezení vzniku smršťovacích trhlin
- Zvýšení mrazuvzdornosti a vodotěsnosti
- Zvýšení lomové a rázové houževnatosti
- Zvýšení odolnosti proti dynamickému namáhání
- Snížení obrusnosti
- Snížení ztrát při aplikaci stříkaného betonu
- Snížení rozmísitelnosti čerstvé betonové směsi a omezení odlučování vody ve směsi.

Účinek polymerních vláken je ilustrován na obrázku 17. Je na něm zachyceno chování betonů vyztužených polypropylenovými mikroválky v množství  $10 \text{ kg/m}^3$ . V případě běžného betonu (OC) s pevností 40 MPa nedochází k žádnému markantnímu zlepšení vlastností. Ovšem účinek přidavku polymerních mikrovláken do vysokopevnostních betonů (HS) a (VHS) je velmi zajímavý: oba betony s pevností 80 a 100 MPa nevykazují výrazné porušení až do teplot kolem  $600^\circ\text{C}$ , což je zcela zásadní vylepšení vlastností vzhledem k betonům bez vláken. Tento účinek bývá připisován nízké teplotě tání polypropylenu ( $160 - 170^\circ\text{C}$ ). Póry po roztavených vláknech tvoří kanálky, kterými může vodní pára postupovat až k povrchu konstrukce a unikat do okolí. Její tlak je tedy snížen a nedochází k odprýskávání kousků betonu.[5]



Obrázek 17: Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu vyztuženého polypropylenovými vlákny; OC = běžný beton; HS = vysokopevnostní beton; VHS = vysokopevnostní beton s pevností nad 100 MPa [5]

Plastické smršťování je jednak u vláknobetonu, ale také u běžného betonu jev, jenž souvisí s tuhnutím a tvrdnutím betonu resp. cementového tmele, a tedy s hydratací, kdy dochází k významnému odpařování vody. Nejdříve se vypařuje voda z povrchu betonu, což v zásadě nezpůsobuje problémy. Když ale nastane stav, že povrchová voda již není k dispozici, oblast odpařování se začne přesouvat níže do struktury betonu, čímž vyvolá kapilární napětí působící v kapilárních meniscích na cementové zrna záporným kapilárním tlakem. Vznikající tahové napětí jsou přímo úměrné povrchovému napětí pórového roztoku a nepřímo úměrné zmenšujícímu se poloměru menisků. S formováním menisků během odpařování vody z cementového tmele souvisí i konsolidace cementových zrn a tzv. sedání betonu, což může vyvolat extrémní tahové napětí v místech, kde je tomuto sedání bráněno (např. oblast nad vloženou betonářskou výztuží). Při zjišťování vlivu jemných PP vláken na eliminaci plastického smršťování lze dosáhnout výsledků jasně dokazujících, že jako nejúčinnější jsou kratší vlákna při dávce  $0,445 \text{ kg/m}^3$  jak delší vlákna, jež byla použita ve dvojnásobné dávce. Druhým velmi důležitým parametrem je výskyt trhlin šířky do 0,25 mm, která se všeobecně považuje za krajní šířku trhlin, kdy se ztrácí možnost je uzavřít vlastní hydratací doposud nezhydrovaných zrn betonu.[13]



*Obrázek 18: Polypropylenová vlákna do betonu*



V praxi existují například vlákna FIBRED od firmy Redrock. Tyto vlákna zamezují vzniku smršťovacích trhlin a zajišťují požární odolnost ve všech druzích betonů a malt. Tyto vlákna nepodléhají žádné korozi a jsou odolné jak kyselinám, tak zásadám. Dají se použít jak do běžného betonu tak do drátkobetonu. Při teplotě 160 °C se polypropylenová vlákna rozpustí a tím vytvoří síť kanálků, které umožňují odpařování vázané vody. Tím se zabrání explozivnímu oddělování povrchových vrstev betonu a nedochází k přehřívání nosné výztuže. [11]

### 3.3.1.3 Celulózová vlákna

Celulózová vlákna patří mezi vlákna přírodní. Celulózová vlákna pochází z obnovitelných zdrojů. Tyto vlákna se velmi liší ve velikosti, tvaru, čistotě a pevnosti, ale všechny obsahují celulózu, organický polymer glukózy. Na molekulární úrovni se celulóza může podstatně lišit ve stupni polymerizace a v její krystalické struktuře. Je důležité chápat, že všechna vlákna nejsou vyráběna stejně a proto je důležité vybírat určitá vlákna pro dosažení požadovaných vlastností. Použití neopracovaných celulózových vláken jako výztuže se datuje daleko do minulosti. Staří Řekové používali slámu do hliněných cihel jako výztuž. Dnes se používají upravená vlákna v mnoha stavebních materiálech. [14]



*Obrázek 19: Celulózová vlákna [14]*

Primární funkce těchto vláken je podobná jako u vláken polypropylenových, změnit vlastnosti čerstvého betonu pro omezení smršťovacích trhlin a také mohou vylepšit vlastnosti zatvrdlého betonu, jako např. odolnost proti mrazu a zmenšení propustnosti. Celulózová vlákna jsou zpevněna do tabulek (Obrázek 19), ve kterých jsou tisíce vláken, které se rozpojí při přidání do betonu. Průměrná délka vlákna se pohybuje okolo 2 mm

s průměrem okolo 16  $\mu\text{m}$ . V dávce 0,9  $\text{kg/m}^3$  může být více jak 1,3 miliardy vláken. Celulózová vlákna by měli být ošetřena proti alkáliím. Dávkování záleží na důvodu, pro který tyto vlákna používáme (Tabulka 5). Pro zvýšení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování staří 0,9  $\text{kg/m}^3$  vláken a např. pro snížení propustnosti až 5,5  $\text{kg/m}^3$ . [14]

*Tabulka 5: Dávkování celulózových vláken [14]*

účel	dávkování na $\text{kg/m}^3$
Zvýšení odolnosti proti mrazu	0,9
Omezení trhlin od plastického smrštění	až do 1,8
Zvýšení odolnosti proti nárazu a ohrusu	až do 2,7
Snížení propustnosti	až do 5,5

### 3.3.2 Pojivo

Nejméně vhodným hydraulickým pojivem je čistý Portlandský cement, který podléhá rozpadu po ztrátě chemicky vázané vody v hydratačních produktech. Proto je vhodnější použít cementy směsné, které obsahují méně Portlandského slínku a více příměsí na bázi popílku, strusky a podobně.

#### 3.3.2.1 Hlinitanový cement

Hlinitanový cement obsahuje více než 35 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a jeho tvrdnutí způsobuje hydratace převážně vápenatých hlinitanů (kalciumaluminátů). Vyrábí se pálením suroviny složené z bauxitu a vápence.

Pevnost hlinitanového cementu při normální teplotě roste velmi rychle. Za 24 hodin dosahuje beton z hlinitanového cementu až 70 % konečné pevnosti. Pokud jde o podmínky potřebné pro úspěšné zpracování hlinitanového cementu lze jako výhodu uvést, že hydratační reakce v hlinitanovém cementu nejsou příliš citlivé na snížení teploty. Beton z hlinitanového cementu lze použít k betonování až do  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ .

Zcela zásadní zpracovatelskou slabinou hlinitanového cementu je naopak jeho citlivost na vyšší teploty. Hlinitanový cement vyžaduje k dokonalé hydrataci relativně velké množství hydratační vody a jako rychle tuhnoucí pojivo uvolňuje během krátkého času větší část ze svého celkového hydratačního tepla. Souběh těchto dvou skutečností

způsobuje, že beton z hlinitanového cementu vyžaduje velmi pečlivé dodatečné provlhčování, a to hned jakmile začíná tuhnout. 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  $C_3A_3$  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:



Ve stavebnictví pro konstrukční účely bylo používání těchto betonů v ČR zakázáno, a to z toho důvodu, že pod vlivem konverze v závislosti na teplotě okolí trvající i několik let, dochází k zvýšení porozity a poklesu pevností. Protože neobsahuje hydroxid vápenatý je hlinitanový cement odolnější v chemickém agresivním prostředí než cement portlandský. Vhodný je také pro výrobu žárovzdorných a těsnících malt. Pro výrobu žárovzdorných hmot se k přípravě hlinitanového cementu může namísto bauxitu použít technický oxid hlinitý, který se pak pálí spolu vápencem při teplotě přibližně 1500 °C na vysokohlinitanový cement. Tento cement je žárovzdorný až do 1750 °C. [9] [15]

### 3.3.2.2 Geopolymerní cement

Geopolymery se připravují chemickou reakcí hlinitokřemičitých oxidů s alkalickými polysilikáty. Výsledkem jsou polymerní sloučeniny obsahující Si-O-Al vazby. Sloučeniny tohoto typu se obecně označuje jako polysialáty. Mezi polysialáty počítáme, kromě látek obsahujících sekvenci –Si-O-Al-O–, také látky s řetězcí tvořenými –Si-O-Al Si–O–(polysialátsiloxany) a látky s řetězcí typu –Si-OAl-Si-O-Si-O–(polysialátidisiloxany). Svojí strukturou mohou být geopolymery amorfni nebo semikrystalické a vykazují proto pestrou škálu vlastností. [9]

Některé geopolymery se chovají podobně jako organické termoplasty a lze je zpracovávat a tvarovat při relativně nízkých teplotách pohybujících se v desítkách stupňů. Jsou však i geopolymery mající vlastnosti minerálů. Jsou tvrdé, odolné a snášejí vysoké teploty. Podobnost s termoplasty je zachována, ale tvarovací teploty jsou daleko vyšší (1000-1200 °C). Do určité míry mají takovéto materiály zároveň keramický charakter. [9]



### 3.3.3 Kamenivo

Skoro všechny druhy kameniv prokazují růst objemu při zvyšující se teplotě, a proto je důležitou charakteristikou koeficient teplotní roztažnosti. Tento záleží na mineralogickém složení jednotlivých druhů kameniva a také na jejich metamorfních změnách. Pro zvýšené teploty není vhodný křemičitý typ kameniva, který při teplotě 573 °C prochází modifikačními změnami při velkém zvětšení objemu zhruba o 0,84 %. Vápenaté kamenivo prokazuje nestálost při zahřívání na 600 °C a navíc se rozkládá na CaO a CO<sub>2</sub> při teplotě okolo 700 °C. Vytvořené CaO může při ochlazování hydratovat a zvětšovat objem až o 40 %. Vhodné kamenivo by mělo vykazovat nízký koeficient teplotní roztažnosti a zanedbatelným zbytkovým přetvořením. Nejvhodnějšími přírodními kamenivy jsou čedič, diabas anebo andezit. Pro teplotu nad 700 °C by se měla používat kameniva umělá. [4]

### 3.3.4 Příměs

Příměsi jsou většinou práškovité látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností. Mezi nejpoužívanější příměsi do betonu patří popílek, křemičité úlety a struska. S ohledem na zlepšení požárních vlastností betonu jsou popílek a křemičité úlety nevhodné v důsledku vysokého obsahu SiO<sub>2</sub>, které by mohlo způsobovat velké objemové změny při teplotě 573 °C. Vysokopeční struska je odpadem při výrobě železa ve vysokých pecích. Struska se chová jako latentně hydraulická látka a i při přidavku malého množství vápna (Ca(OH)<sub>2</sub>) se chová jako plně hydraulická látka. [4]

## 3.4 Žárobeton

### 3.4.1 Definice

Žárobetony jsou směsi žárovzdorných kameniv a pojiv, většinou dodávané v suchém stavu, používané po přidavku a smíšení s vodou nebo jinou kapalinou. Ukládají se vibračním litím, litím bez vibrace (samotekoucí), pēchováním tyčí anebo dusáním. Vytvoření vazby a tvrdnutí materiálu probíhá bez zahřívání.

### 3.4.2 Složení

Žárověbetonová směs se skládá z plniva, pojiva a přísad. Plniva mohou být různého chemického složení, hutné nebo lehčené.

- Plnivo - hlavní složkou žárověbetonů, hrubozrnná frakce velikosti zrn nad 45  $\mu\text{m}$  tvoří 65-75 % z celkového složení žárověbetonu, do žárověbetonů je přidávána také jemnozrnná frakce zrn pod 45  $\mu\text{m}$ . Hrubozrnná frakce určuje základní žárové vlastnosti žárověbetonu.
- Pojivo – hydraulické pojivo (hlinitanový cement), keramické pojivo (jíl), organickochemické pojivo (deriváty celulózy, sulfátový louh) nebo anorganicko-chemické pojivo (křemičitan draselný, fosforečnan hlinitý).
- Přísady - ztekucovadla nebo regulátory tuhnutí. [16]

Žárověbetony pro nižší teploty (do cca 700 °C) obsahují jako plnivo perlit, křemelinu nebo keramzit a jako pojivo portlandský cement. Protože cement snižuje termomechanické vlastnosti směsí, rozlišují se ještě žárověbetony LCC a ULCC. Pro vyšší teploty 1000 °C až 1400 °C se používá jako ostřivo pálený lupek a jako plnivo hlinitanový cement. Pro ještě vyšší teploty (až do 1700 °C) se lupek nahrazuje ostřivem s vysokým obsahem hliníku (sillimanitem, mullitem, bauxitem, korundem).[9]

### 3.4.3 Rozdělení žárověbetonů

IC	žárověbetony se vyznačující se objemovou hmotností $< 1800 \text{ kg.m}^{-3}$
DC	žárověbetony se vyznačující se objemovou hmotností $> 1800 \text{ kg.m}^{-3}$
CBC	obsahují jedno a více chemických pojiv způsobujících zatvrdnutí směsi
RCC	žárověbetony obsahující 15-30 % cementu a obsah CaO $< 3,5 \%$
DCC	žárověbetony obsahující min. 2 % částic pod 1 $\mu\text{m}$ a minimálně jeden druh ztekucovadla
LCC	žárověbetony obsahující 3-6 % cementu, obsah CaO se pohybuje mezi 1-3,5 %

ULCC	žárobetony obsahující 1-3 % cementu, obsah CaO mezi 0,2-1 %
NCC	bez cementové žárobetony

Žárobetony LCC a ULCC jsou zpracovatelné na monolit pouze vibrací. Při zvýšení vlhkosti sice lze směs zpracovávat litím, ale tím zároveň snižujeme pevnost monolitu. Pro složitější tvary monolitů vibraci používat nelze, a proto byly vyvinuty tzv. samotekoucí žárobetony (SFC- selfflowing castable). Tyto betony mají zásadní změny v zrnitosti, obsahují mikropřísady a deflokulační činidla a dosahované pevnosti jsou stejné jako u LCC. [16]

### 3.4.4 Technologie výroby

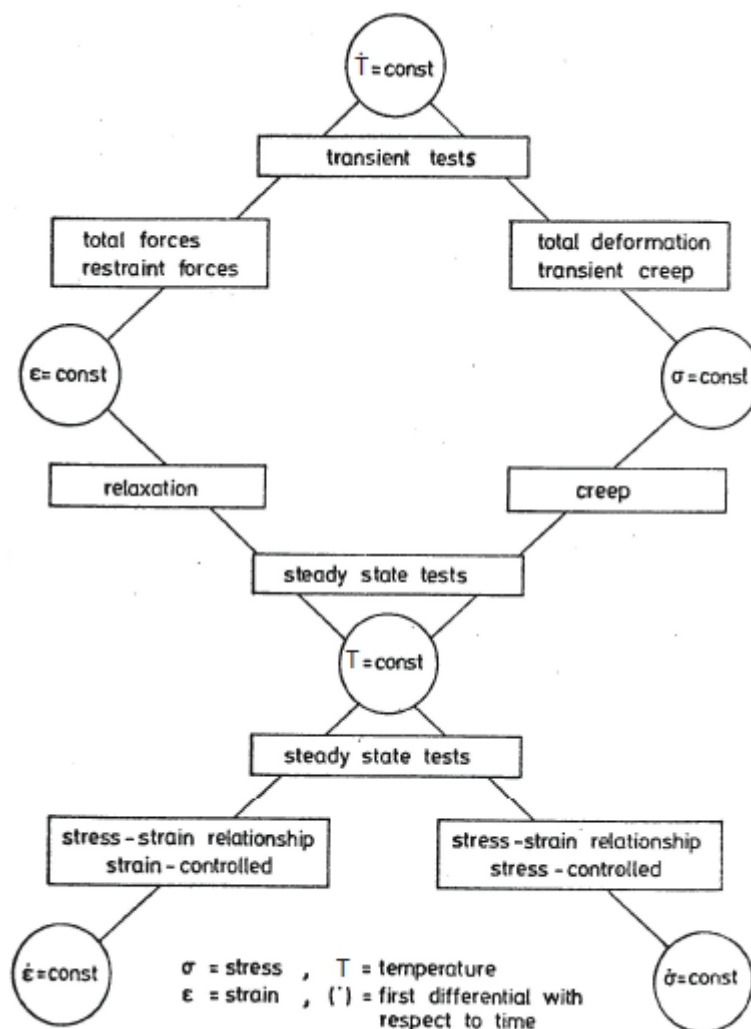
Žáromonolity jsou dodávány jako suchá směs, která se zpracovává a tvaruje přímo na místě aplikace. Hotová směs se většinou lije do dřevěných forem a důkladně se hutní. Další používaná technologie je torkretace, tedy stříkání betonu pomocí stlačeného vzduchu. Monolitická vyzdívka se pomalu vysušuje a po úplném odstranění volné vody se přistupuje k prvnímu výpalu. Výpal je veden opatrně s ohledem na použitý materiál a na velikost monolitické vyzdívky. Režim výpalu je přesně předepsaný dodavatelem vyzdívky. [16]

## 3.5 Zkoušení betonu vystaveného působení vysokých teplot dle RILEM

RILEM je organizace, která vznikla po druhé světové válce roku 1947, při snaze obnovit mezinárodní vztahy v oblasti výzkumu. Organizace se dohodla na spolupráci při vývoji a zkoušení materiálů a konstrukcí. Jedním ze zakladatelů, který reprezentoval Československo byl Stanislav Bechyňe.

Vlastnosti betonu při vysokých teplotách mohou být definovány mnoha různými způsoby. Při požáru jsou materiály vystaveny přechodným procesům, a proto je nutné měření těchto vlastností, které jsou stanoveny v přechodných podmínkách. Je nutné je odlišovat od vlastností získaných měřeními při ustálených podmínkách. Pro zkoušení při vysokých teplotách jsou zde 3 hlavní parametry: způsob zahřívání, způsob vnesení zatížení a způsob kontroly napětí. Tyto parametry mohou být neměnné nebo konstantní nebo se měnit v průběhu testu. [8]

Dalším důležitým faktem je, zda byly vzorky testovány v uzavřených nebo neuzavřených podmínkách. Pro uzavřené podmínky platí, že bylo zamezeno úniku vlhkosti při zahřívání nebo ochlazování a tyto je nutné odlišovat od podmínek, při kterých u vzorků není zabraňováno úniku vlhkosti při ohřevu ani při ochlazování. [8]



Obrázek 20: Různé druhy metod pro určení mechanických vlastností [8]

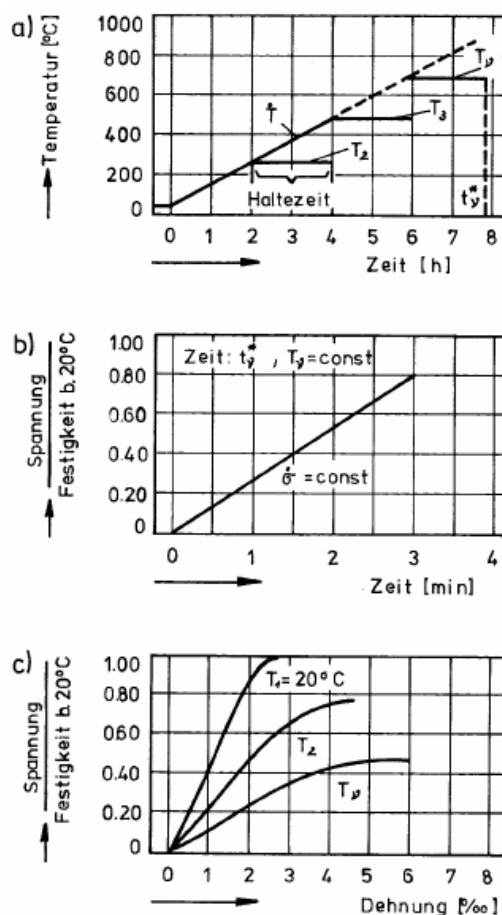
Legenda obrázku:

Transient tests – Testy za podmínek měnících se během zkoušení; Total forces – mezní síly; Restraint forces – kontrolovaná síla; Total deformation – mezní deformace; Transient creep – dotvarování při přechodných podmínkách; Relaxation – relaxace; Creep – dotvarování; Steady state tests – testy při neměnných podmínkách; stress – strain relationship – závislost napětí na přetvoření; strain – controlled – řízená deformace; stress – controlled – řízené napětí.

### 3.5.1 Zkoušky v ustáleném stavu (Steady state tests)

#### 3.5.1.1 Deformační zkoušky při řízeném napětí

Závislost napětí a přetvoření, kdy je rychlost změny napětí řízena: Vzorek je zahříván bez zatížení na danou teplotu ( $T$ ). Poté co teplota ustálena je vneseno zatížení při regulovaném napětí ( $\sigma$ ) a probíhá zaznamenávání deformací ( $\epsilon$ ). Data, která tato zkouška poskytuje, mohou být používány pro stanovení pevnosti betonu v tlaku, pevnosti betonu v tahu, modulu pružnosti a mezních deformací. Podobné testy mohou být provedeny pro vzorky, které jsou zatěžovány během zahřívání nebo které jsou ochlazovány na dané teploty před zkouškou. (Obrázek 21) [8]



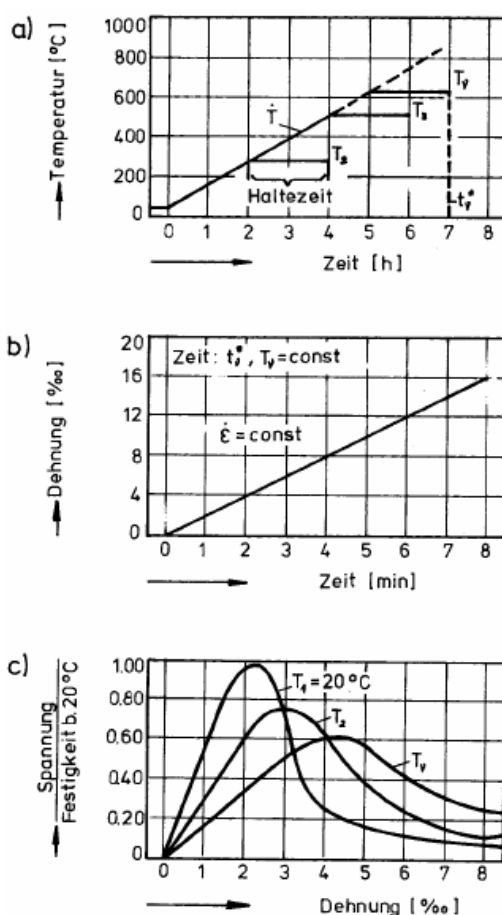
Obrázek 21: Zkoušky při kontrolovaném napětí [8]

Legenda obrázku:

Spannung – napětí; dehnung – deformace; Zeit – čas; Temperatur – teplota

### 3.5.1.2 Deformační zkoušky při řízené deformaci

Závislost napětí a přetvoření, kdy je rychlost změny deformace řízena: Vzorek je zahříván bez zatížení na danou teplotu ( $T$ ). Poté co je teplota ustálena je vneseno zatížení při řízené deformaci ( $\epsilon$ ) a zaznamenává se napětí ( $\sigma$ ). Stejně jako v předchozím případě tyto data mohou být použité ke stanovení pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu, modulu pružnosti a mezní deformace. (Obrázek 22) [8]



Obrázek 22: Zkoušky při kontrolované deformaci [8]

Legenda obrázku:

Spannung – napětí; dehnung – deformace; Zeit – čas; Temperatur – teplota

### 3.5.1.3 Dlouhodobé dotvarování (Long term creep)

Vzorek je pomalu zahříván na potřebnou teplotu a poté je aplikováno zatížení. Zatížení je ponecháno konstantní a je zaznamenávána vznikající deformace. Data z této

zkoušky poskytují vztah mezi napětím a časem při různých teplotách v dlouhodobém měřítku. [8]

#### **3.5.1.4 Relaxace (Relaxation)**

Vzorek je zahříván analogicky jako u zkoušky předchozí. Nicméně počáteční napětí v čase  $t=t_0$  je konstantní a jsou zaznamenávána měření při dlouhodobém snižování napětí ( $\sigma$ ). Tyto data udávají vztah mezi napětím ( $\sigma$ ) a časem ( $t$ ) při teplotě ( $T$ ). [8]

### **3.5.2 Zkoušky za neustálených podmínek**

#### **3.5.2.1 Dotvarování při přechodných podmínkách (Transient creep test)**

Vzorek je zatížen ještě před zahříváním; zahřívání generováno danou rychlostí, deformace ( $\epsilon$ ) jsou zaznamenávány do selhání, kdy se deformace blíží nekonečnu. Data ukazují vztah mezi deformací a časem ( $\epsilon/t$ ) a umožňují určit kritickou teplotu ( $T_{cr}$ ) pro různé úrovně napětí. [8]

#### **3.5.2.2 Mezní síla (Restraint force)**

Vzorek je zatížen pro dosažení počáteční deformace ještě před zahříváním danou rychlostí. Tato počáteční deformace je udržována přizpůsobováním daného zatížení až do bodu, kdy vnesené napětí se přiblíží nule. Data získaná touto zkouškou poskytují náhled na vztah mezi napětím a časem pro různé počáteční velikosti napětí/deformace. [8]

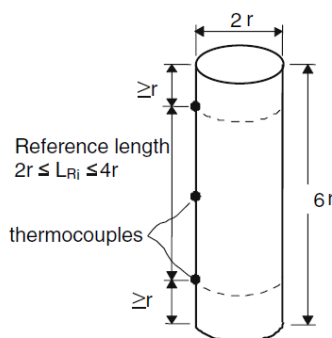
### **3.5.3 Doporučení pro modelování zkoušek v laboratorních podmínkách dle RILEM**

Organizace RILEM vydala některá doporučení, pro provádění zkoušek, aby se daly výsledky dosažené při zkouškách v různých institucích mezi sebou porovnávat.

#### **3.5.3.1 Velikost a další parametry vzorku**

Vzorky pro tyto zkoušení by měli být válcové v poměru délka/průměr rovnému 3. Minimální průměr tělesa by měl být 4x větší než největší průměr kameniva pro vývrty a 5x větší pro vzorky vyrobené ve formách. Standardní průměry těles jsou v tabulce 6 společně s doporučenými rychlostmi nárůstu teplot. Jiné použité průměry by měly být nazývány

jako nestandardní. Na obrázku 23 je zobrazeno rozdělení tělesa s umístěním jednotlivých termočlánků. [20]



Obrázek 23: Rozmístění termočlánků na zkušebním tělese [20]

Tabulka 6: Doporučené rychlosti nárůstu teplot pro standardní tělesa [20]

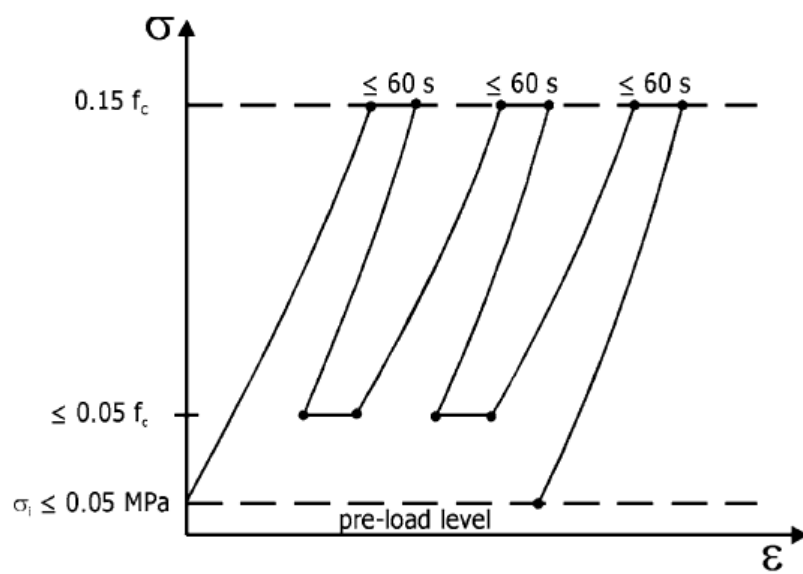
Maximální průměr válce [mm]	Rychlost zahřívání/ ochlazování [°C/min]	Interval záznamu teplot [min]
150	0,5	16
100	1	8
80	2	4
60	4	2

### 3.5.3.2 Příprava vzorku

Před samotným zkoušením vzorku by měl být tento vzorek změřen a zvážen. Toto by mělo být provedeno nejdříve po 28 dnech zrání a ne déle než 2 měsíce před testováním.

Pro měření deformací je třeba těleso vycentrovat v zařízení s přesností 1 % z průměru tělesa. Poté by měl být vzorek periodicky zatěžován z hodnoty  $0,05 f_c$  na hodnotu  $0,15 f_c$  s výdrží maximálně 60 vteřin a toto opakovat 3x a poté by mělo zůstat napětí 0,05 MPa. Toto zatěžování by mělo být provedeno rychlostí  $0,5 \pm 0,1$  MPa/s. Přesný způsob zatěžování je zobrazen na obrázku 24. Vzorek by měl být podroben zatěžování teplotou do  $2 \pm 1$  minut o ukončení cyklu na 0,05 MPa. [20]





Obrázek 24: Způsob přípravy vzorku před zatěžováním [20]

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Cíle experimentální části

V experimentální části práce bylo cílem vytvořit receptury s různými kamenivem a vláknitou výztuží. Pro tuto práci byly vybrány 2 kameniva (kamenolom Mastý a kamenolom Bohučovice). Jedna receptura byla namíchána s kamenivem Mastý a druhá s kamenivem Bohučovice, třetí receptura byla stejná s kamenivem Mastý a byly navíc přidána polypropylenová vlákna v množství  $1 \text{ kg/m}^3$ . Z každé receptury bylo použito 10 vzorků o rozměrech  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ . Po 28 dnech se provedla zkouška pevnosti v tlaku na referenčních vzorcích. Na dalších vzorcích bylo ultrazvukovou metodou provedeno zjištění dynamických modulů pružnosti. Poté byly tyto vzorky zatěžovány na teplotu  $200^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$  a  $800^\circ\text{C}$ . Na vzorcích zatíženými těmito teplotami poté byl opět ultrazvukovou metodou zjištěn dynamický modul pružnosti a poté i zbytková pevnost v tlaku.

### 4.2 Použité materiály

#### 4.2.1 Cement

Všechny receptury obsahovaly stejný cement, a to portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R od společnosti Českomoravský cement, a.s.

*Tabulka 7: Statické hodnocení kvality cementu dle ČSN EN 197 – 1 [17]*

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Měrný povrch	558	$\text{m}^2/\text{kg}$
Objemová stálost	0,9	mm
Normální konzistence	30,1	%
Pevnost v tlaku - 28 dní	51,1	MPa
Pevnost v tahu za ohybu - 28 dní	8,3	MPa
Ztráta žíháním	8,02	%
Obsah síranů (jako $\text{SO}_3$ )	2,61	%
Obsah Cl	0,07	%
Obsah $\text{K}_2\text{O}$	0,73	%
Obsah $\text{Na}_2\text{O}$	0,16	%

## 4.2.2 Kamenivo

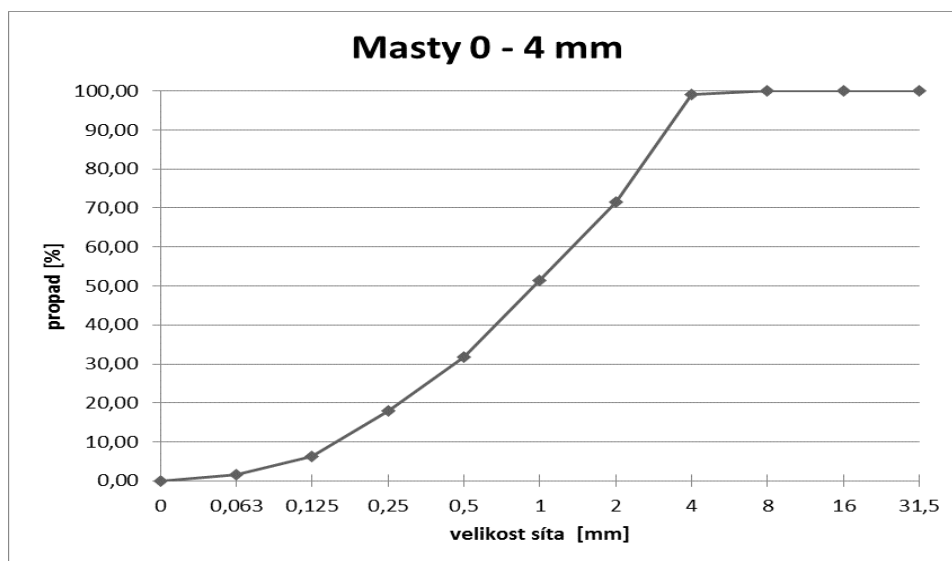
V experimentální části byly použity 2 typy kameniv. Drcené kamenivo Mastý frakce 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm. Druhé kamenivo bylo drcené kamenivo Bohučovice s použitými frakcemi 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm.

### 4.2.2.1 Kamenivo Mastý

Horninou je šedozelený metabazit (amfibolit), přesněji zoisit-amfibol-plagioklasová břidlice, která může místy obsahovat polohy jemně zrnitého epidotového amfibolitu.

Tabulka 8: Sítový rozbor kameniva Mastý frakce 0-4 mm

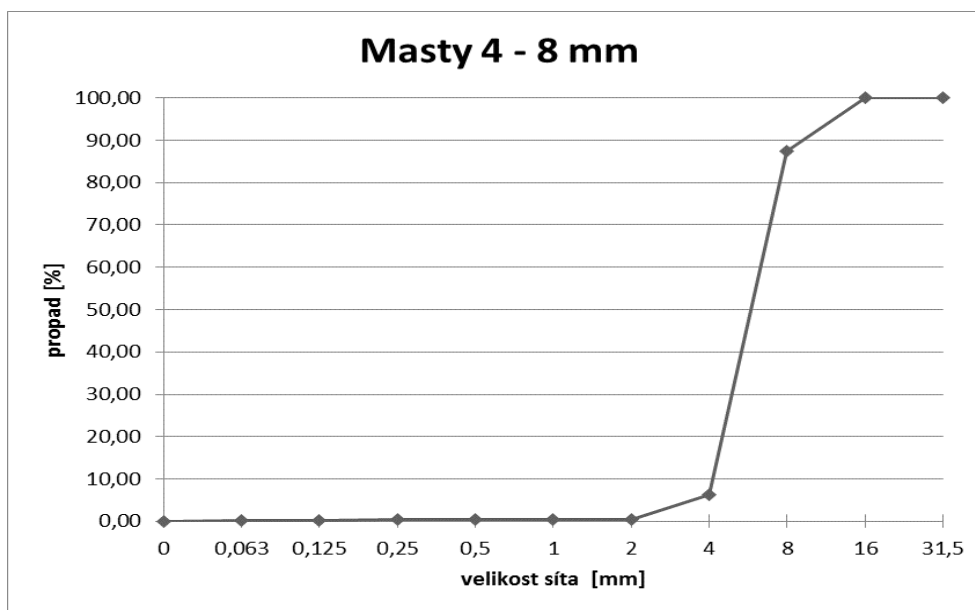
Sítový rozbor - Mastý 0-4 mm				
síto [mm]	zůstatek [g]	zůstatek [%]	celk. zůstatek [%]	propad [%]
0	15,91	1,59	100,00	0,00
0,063	46,56	4,66	98,41	1,59
0,125	118,20	11,82	93,75	6,25
0,25	137,05	13,71	81,93	18,07
0,5	196,47	19,65	68,23	31,77
1	199,94	19,99	48,58	51,42
2	276,53	27,65	28,59	71,41
4	9,34	0,93	0,93	99,07
8	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
	1000,00	100,00		



Obrázek 25: Křivka zrnitosti kameniva Mastý frakce 0-4 mm

Tabulka 9: Sítový rozbor kameniva Mastý frakce 4-8 mm

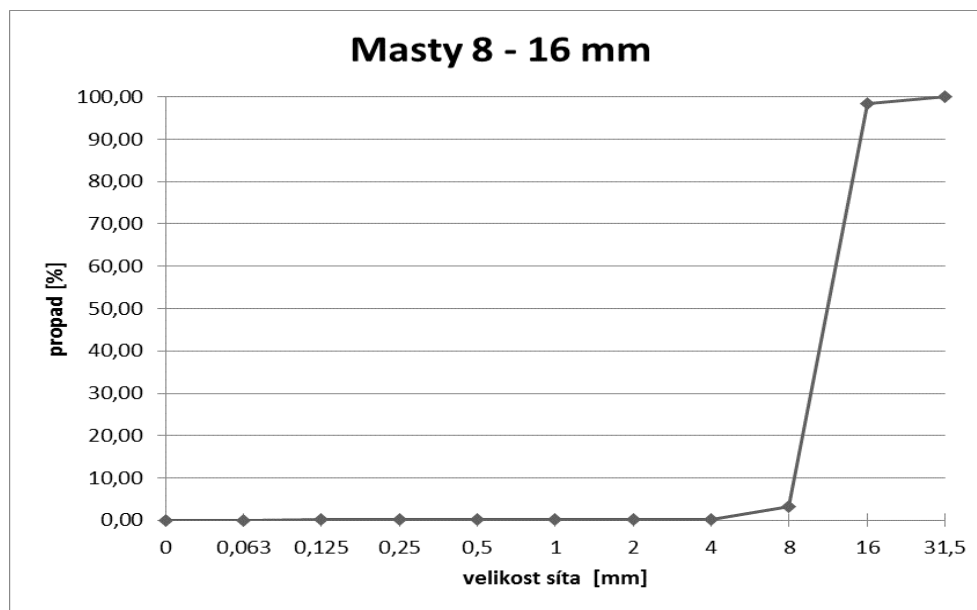
Sítový rozbor – Mastý 4-8 mm				
síto [mm]	zůstatek [g]	zůstatek [%]	celk. zůstatek [%]	propad [%]
0	0,95	0,10	100,00	0,00
0,063	1,85	0,19	99,91	0,09
0,125	1,01	0,10	99,72	0,28
0,25	0,24	0,02	99,62	0,38
0,5	0,13	0,01	99,60	0,40
1	0,52	0,05	99,58	0,42
2	56,97	5,70	99,53	0,47
4	813,23	81,32	93,83	6,17
8	125,10	12,51	12,51	87,49
16	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
	1000,00	100,00		



Obrázek 26: Křivka zrnitosti kameniva Mastý frakce 4-8 mm

Tabulka 10: Sítový rozbor kameniva Mastý frakce 8-16 mm

Sítový rozbor – Mastý 8-16 mm				
síto [mm]	zůstatek [g]	zůstatek [%]	celk. zůstatek [%]	propad [%]
0	0,25	0,03	100,00	0,00
0,063	0,85	0,09	99,98	0,03
0,125	0,18	0,02	99,89	0,11
0,25	0,06	0,01	99,87	0,13
0,5	0,05	0,01	99,87	0,13
1	0,02	0,00	99,86	0,14
2	0,01	0,00	99,86	0,14
4	30,89	3,09	99,86	0,14
8	952,55	95,26	96,77	3,23
16	15,14	1,51	1,51	98,49
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
	1000,00	100,00		



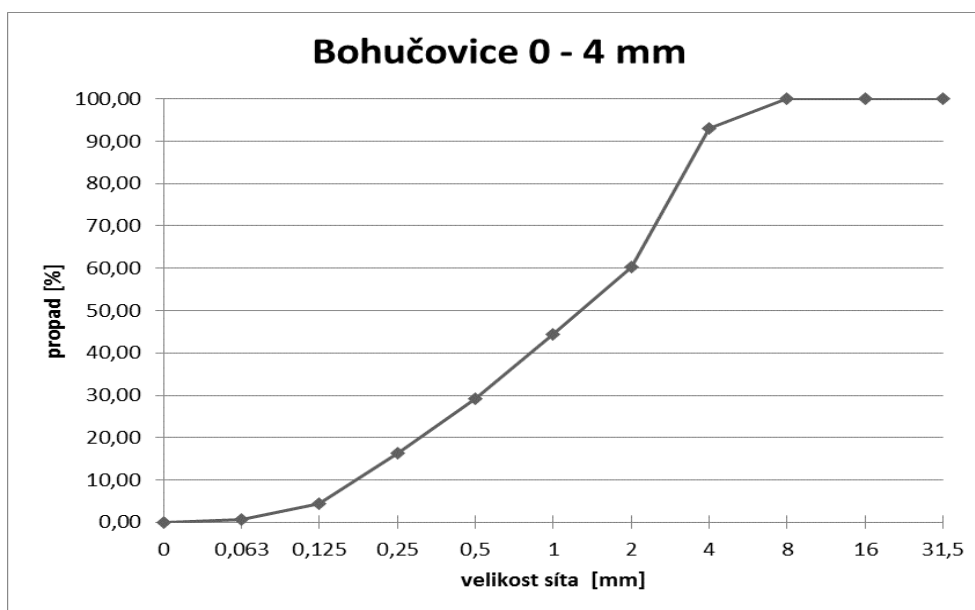
Obrázek 27: Křivka zrnitosti kameniva Mastý frakce 8-16 mm

#### 4.2.2.2 Kamenivo Bohučovice

Kamenivo z tohoto lomu je opět drcené s frakcemi 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm. Horninou je Moravská droba.

Tabulka 11: Sítový rozbor kameniva Bohučovice frakce 0-4 mm

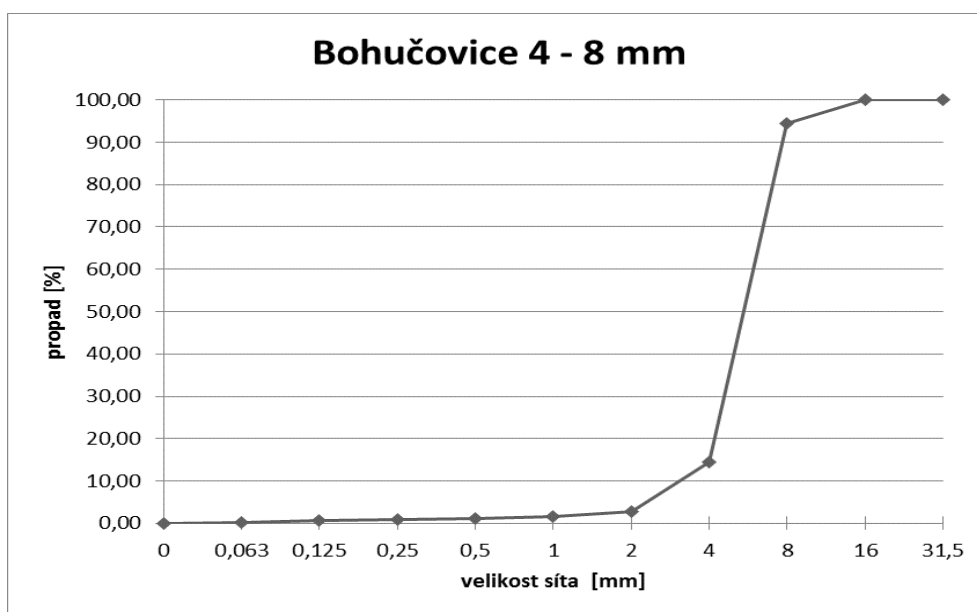
Sítový rozbor – Bohučovice 0-4 mm				
síto [mm]	zůstatek [g]	zůstatek [%]	celk. zůstatek [%]	propad [%]
0	6,69	0,67	100,00	0,00
0,063	37,91	3,79	99,33	0,67
0,125	117,79	11,78	95,54	4,46
0,25	128,86	12,89	83,76	16,24
0,5	153,13	15,31	70,88	29,13
1	158,35	15,84	55,56	44,44
2	327,78	32,78	39,73	60,27
4	69,49	6,95	6,95	93,05
8	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
	1000,00	100,00		



Obrázek 28: Křivka zrnitosti kameniva Bohučovice frakce 0-4 mm

Tabulka 12: Sítový rozbor kameniva Bohučovice frakce 4-8 mm

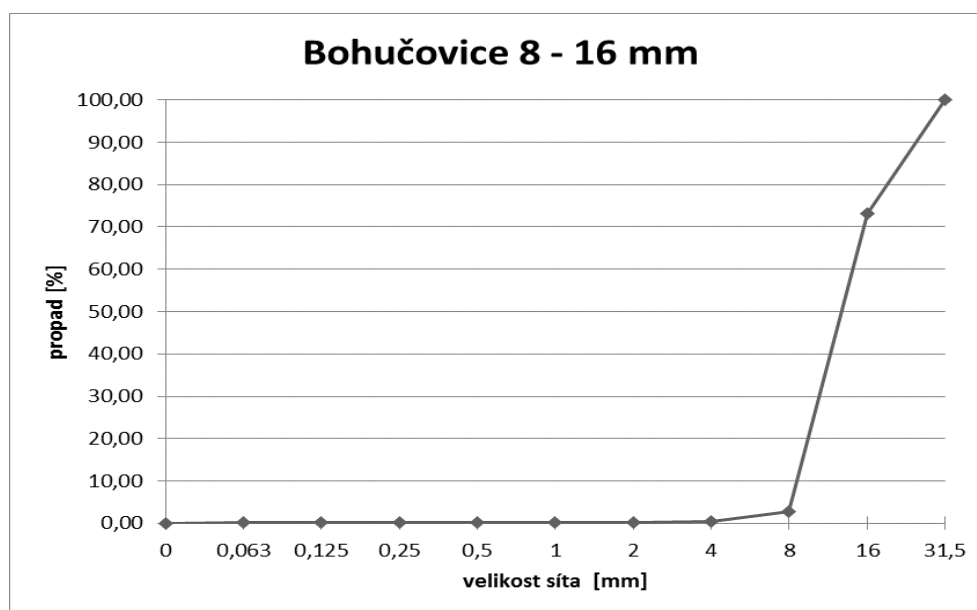
Sítový rozbor – Bohučovice 4-8 mm				
síto [mm]	zůstatek [g]	zůstatek [%]	celk. zůstatek [%]	propad [%]
0	3,01	0,30	100,00	0,00
0,063	3,20	0,32	99,70	0,30
0,125	2,17	0,22	99,38	0,62
0,25	2,22	0,22	99,16	0,84
0,5	5,80	0,58	98,94	1,06
1	10,31	1,03	98,36	1,64
2	117,75	11,78	97,33	2,67
4	799,34	79,93	85,55	14,45
8	56,20	5,62	5,62	94,38
16	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
	1000,00	100,00		



Obrázek 29: Křivka zrnitosti kameniva Bohučovice frakce 4-8 mm

Tabulka 13: Sítový rozbor kameniva Bohučovice frakce 8-16 mm

Sítový rozbor - Bohučovice 8-16 mm				
síto [mm]	zůstatek [g]	zůstatek [%]	celk. zůstatek [%]	propad [%]
0	0,82	0,08	100,00	0,00
0,063	1,00	0,10	99,92	0,08
0,125	0,47	0,05	99,82	0,18
0,25	0,19	0,02	99,77	0,23
0,5	0,16	0,02	99,75	0,25
1	0,22	0,02	99,74	0,26
2	0,52	0,05	99,71	0,29
4	24,03	2,40	99,66	0,34
8	703,34	70,33	97,26	2,74
16	269,25	26,93	26,93	73,08
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
	1000,00	100,00		



Obrázek 30: Křivka zrnitosti kameniva Bohučovice frakce 8-16 mm

### 4.2.3 Plastifikátor

Byl použit superplastifikátor Mapefluid N200, který se používá pro výrobu velmi tekutých betonových směsí (konzistence S4 a S5 podle EN 206-1) nebo k výrobě vysoce jakostních betonů. Jedná se o tekutou přísadu hnědé barvy na bázi aktivních polymerů ve vodním roztoku, které jsou schopny rozptýlit v betonové směsi zrnka cementu. Dávkuje se do betonové směsi až po přidání všech komponent (kamenivo, cement, voda). [18]



#### 4.2.4 Vlákna do betonu

Byla použita polypropylenová vlákna KrampeHarex Fibrin 3/15, která byla přidávána do suché směsi, kde byla 2 minuty rozmíchávána a až poté se přidala voda. Vlastnosti vláken jsou shrnuty v tabulce 14.

*Tabulka 14: Vlastnosti vláken Fibrin 3/15 [19]*

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Barva	přírodní, bezbarvá	-
Hustota	910	kg/m <sup>3</sup>
Délka	12	mm
Průměr	16	μm
Pevnost v tahu	370	MPa
Bod tání	160	°C

### 4.3 Navržené receptury

Pro experimentální práci byly navrženy 3 receptury. První 2 byly totožné až na změnu druhu kameniva a do třetí receptury bylo navíc přidáno 1 kg/m<sup>3</sup> polypropylenových vláken.

#### 4.3.1 Receptura MF

*Tabulka 15: Navržená receptura MF*

Složka	množství kg/m <sup>3</sup>
CEM II / B-M (S-LL) 32,5 R	340
Kamenivo 0-4 mm Mastý	1100
Kamenivo 4-8 mm Mastý	325
Kamenivo 8-16 mm Mastý	474
voda	219
Plastifikátor Mapefluid N 200 1,5% z m <sub>c</sub>	5,1

### 4.3.2 Receptura BF

Tabulka 16: Navržená receptura BF

Složka	množství kg/m <sup>3</sup>
CEM II / B-M (S-LL) 32,5 R	340
Kamenivo 0-4 mm Bohučovice	1100
Kamenivo 4-8 mm Bohučovice	325
Kamenivo 8-16 mm Bohučovice	474
voda	219
Plastifikátor Mapefluid N 200 1,5% z m <sub>c</sub>	5,1

### 4.3.3 Receptura MFP

Tabulka 17: Navržená receptura MFP

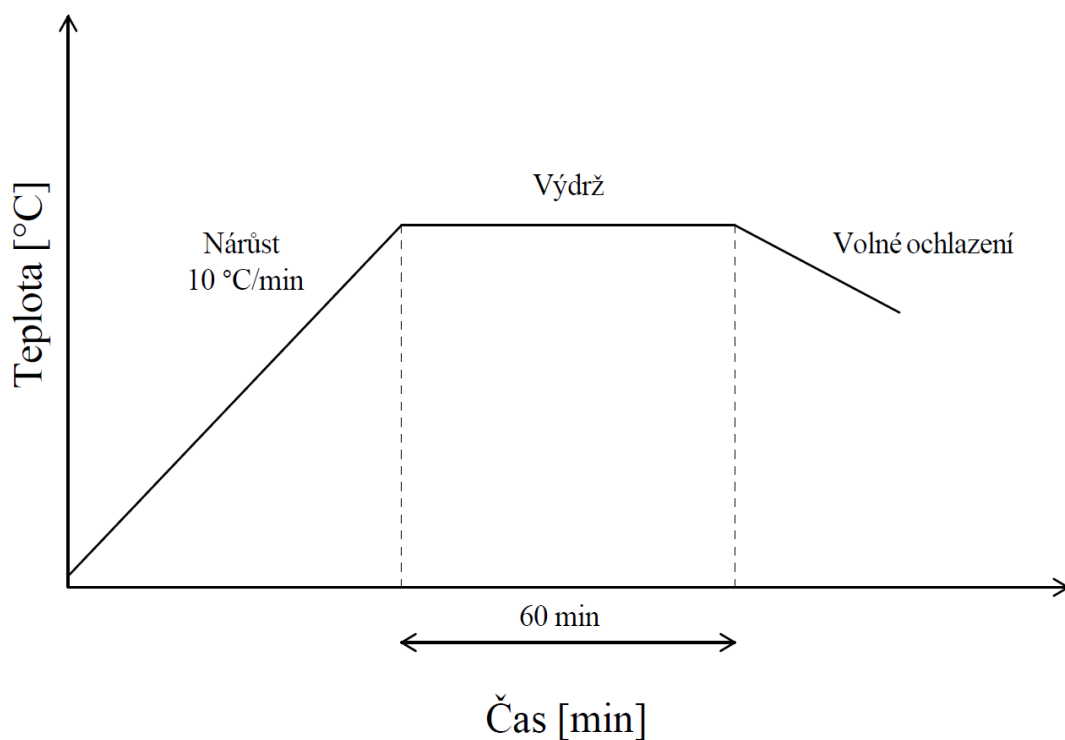
Složka	množství kg/m <sup>3</sup>
CEM II / B-M (S-LL) 32,5 R	340
Kamenivo 0-4 mm Mastý	1100
Kamenivo 4-8 mm Mastý	325
Kamenivo 8-16 mm Mastý	474
voda	219
Plastifikátor Mapefluid N 200 1,5% z m <sub>c</sub>	5,1
Vlákna KrampeHarex FIBRIN 315	1

## 4.4 Metodika experimentální práce

Vzorky byly po odformování uloženy ve vodním uložení, ze kterého byly vyjmuty cca 1 den před zkoušením a na referenčních tělesech byla zjištěna pevnost v tlaku. Poté u těles, která byla zatěžována teplotami bylo provedeno měření dynamických modulů pružnosti ultrazvukovou impulsní metodou. Dále byly vzorky vysušeny při teplotě 120 °C. Po vysušení byla pro výpal vzorků použita laboratorní muflová pec (Obrázek 31), kde bylo možno naskládat celkem 6 zkušebních těles. Vzorky v peci byly zatíženy dle křivky, která je zobrazena na obrázku 32.



*Obrázek 31: Muflová pec použitá pro teplotní zatěžování vzorků*



Obrázek 32: Způsob teplotního zatěžování vzorků

Pro měření dynamických modulů pružnosti byl použit přístroj Proceq TICO. Jako akustický spoj byl použit akustický gel. Přístroj TICO měří dobu průchodu zkoušeným vzorkem, ze které se poté dá vypočítat dynamický modul pružnosti.



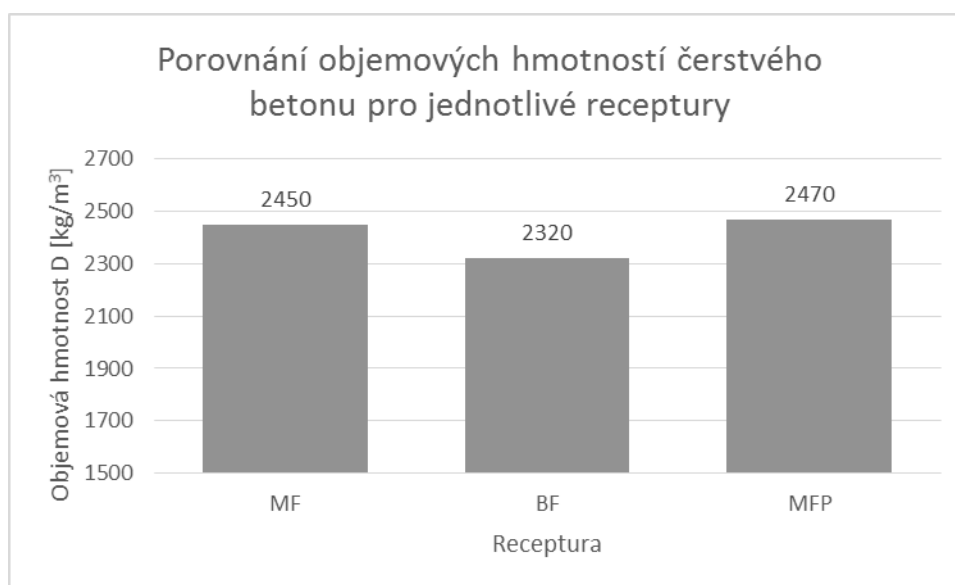
Obrázek 33: Přístroj pro měření Proceq TICO [19]

## 4.5 Výsledky experimentální části

### 4.5.1 Objemová hmotnost čerstvého betonu

Tabulka 18: Objemové hmotnosti jednotlivých receptur v čerstvém stavu

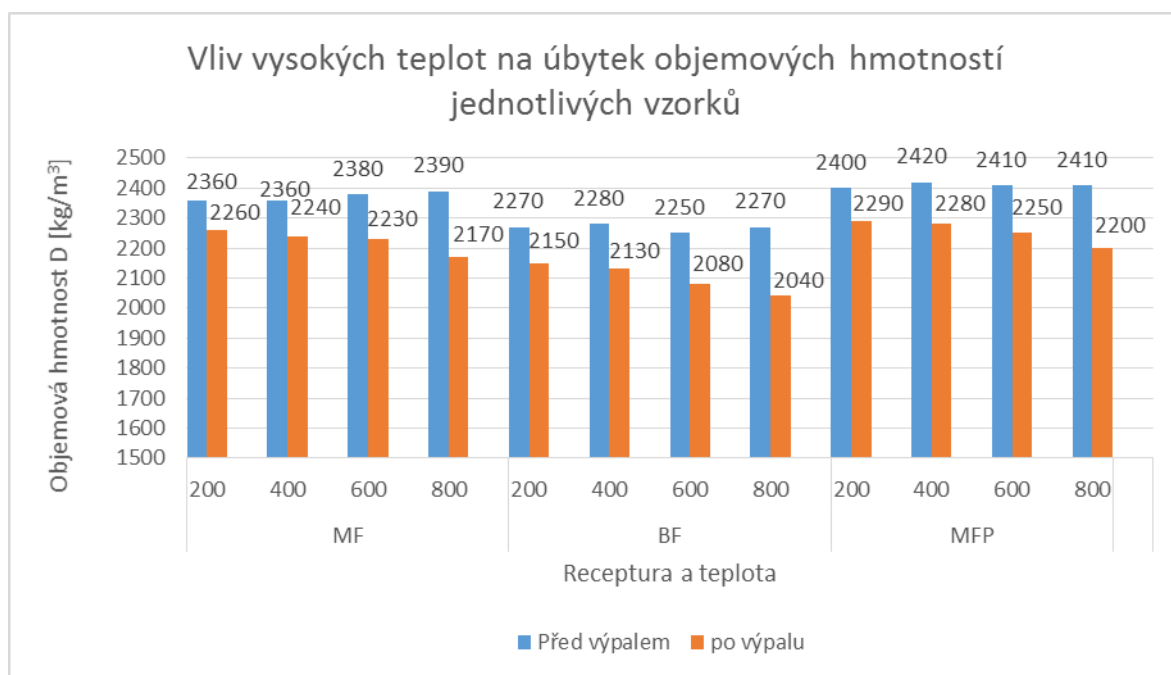
Receptura	Objemová hmotnost ČB [kg/m <sup>3</sup> ]
MF	2450
BF	2320
MFP	2470



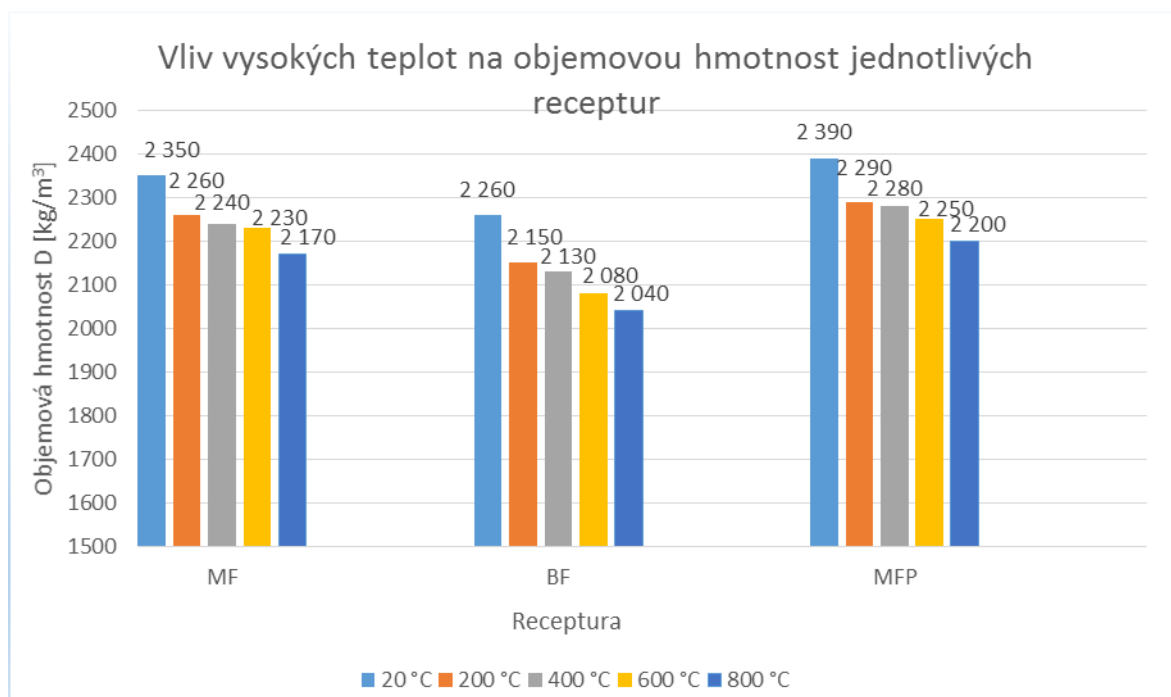
Obrázek 34: Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu pro jednotlivé receptury

Tabulka 19: Objemové hmotnosti ztvrdlého betonu se změnami při vysokých teplotách

receptura	Teplota [°C]	označení	před výpalem	po výpalu	Změna D [%]
			ø D [kg/m³]	ø D[kg/m³]	
MF	200	MF3	2360	2260	-4,2
		MF4			
	400	MF5	2360	2240	-5,1
		MF6			
	600	MF7	2380	2230	-6,3
		MF8			
	800	MF9	2390	2170	-9,2
		MF10			
BF	200	BF3	2270	2150	-5,3
		BF4			
	400	BF5	2280	2130	-6,6
		BF6			
	600	BF7	2250	2080	-7,6
		BF8			
	800	BF9	2270	2040	-10,1
		BF10			
MFP	200	MFP3	2400	2290	-4,6
		MFP4			
	400	MFP5	2420	2280	-5,8
		MFP6			
	600	MFP7	2410	2250	-6,6
		MFP8			
	800	MFP9	2410	2200	-8,7
		MFP10			



Obrázek 35: Vliv vysokých teplot na objemovou hmotnost jednotlivých vzorků



Obrázek 36: Úbytek objemové hmotnosti pro jednotlivé receptury

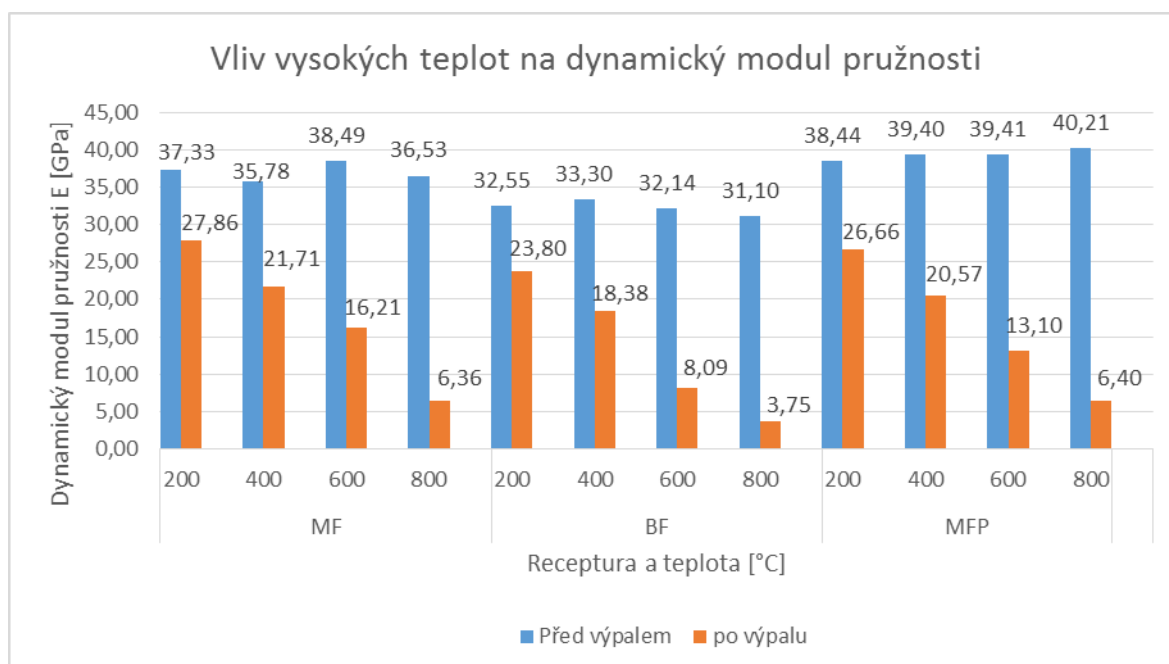
## 4.5.2 Dynamický modul pružnosti

Měření a vyhodnocování dynamického modulu pružnosti bylo prováděno dle normy ČSN 73 1371 - Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu.

Tabulka 20: Výsledné dynamické moduly pružnosti před a po zatížení teplotami

receptura	Teplota [°C]	označení	před výpalem	po výpalu	Změna $E_{cu}$ [%]
			$\sigma E_{cu}$ [GPa]	$\sigma E_{cu}$ [GPa]	
MF	200	MF3	37,33	27,86	-25,4
		MF4			
	400	MF5	35,78	21,71	-39,3
		MF6			
	600	MF7	38,49	16,21	-57,9
		MF8			
	800	MF9	36,53	6,36	-82,6
		MF10			
BF	200	BF3	32,55	23,80	-26,9
		BF4			
	400	BF5	33,30	18,38	-44,8
		BF6			
	600	BF7	32,14	8,09	-74,8
		BF8			
	800	BF9	31,10	3,75	-87,9
		BF10			
MFP	200	MFP3	38,44	26,66	-30,6
		MFP4			
	400	MFP5	39,40	20,57	-47,8
		MFP6			
	600	MFP7	39,41	13,10	-66,8
		MFP8			
	800	MFP9	40,21	6,40	-84,1
		MFP10			

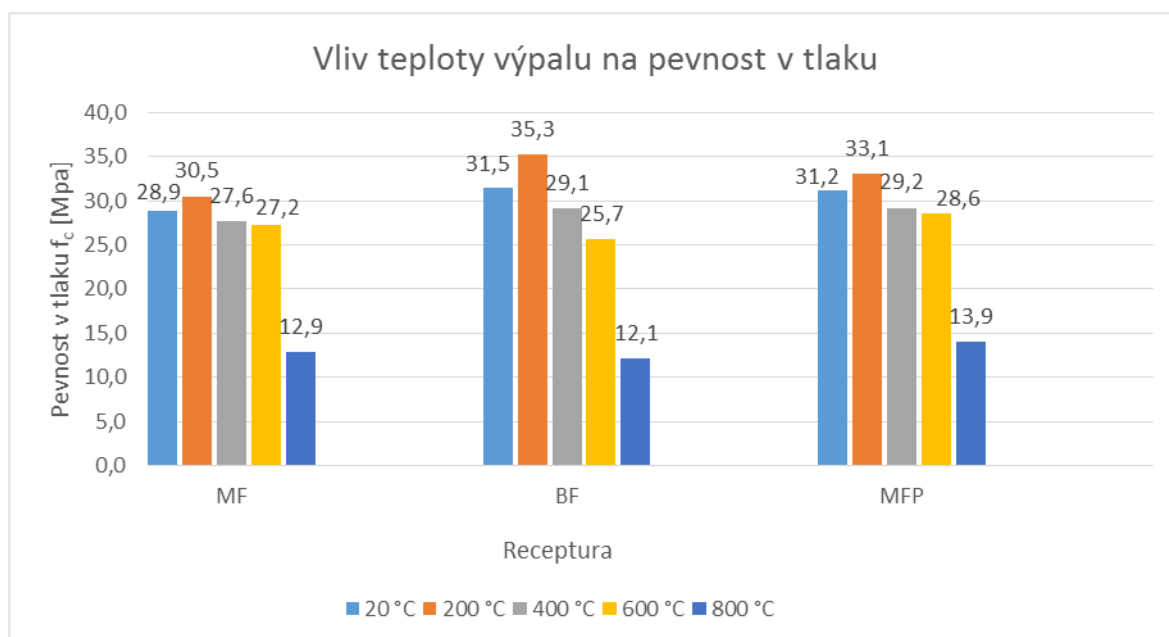




Obrázek 37: Vliv vysokých teplot na dynamický modul pružnosti

#### 4.5.3 Pevnost betonu v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku byla provedena dle normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Tělesa byla dle normy změřena a zvážena a poté se přešlo ke zkoušce betonu v tlaku.



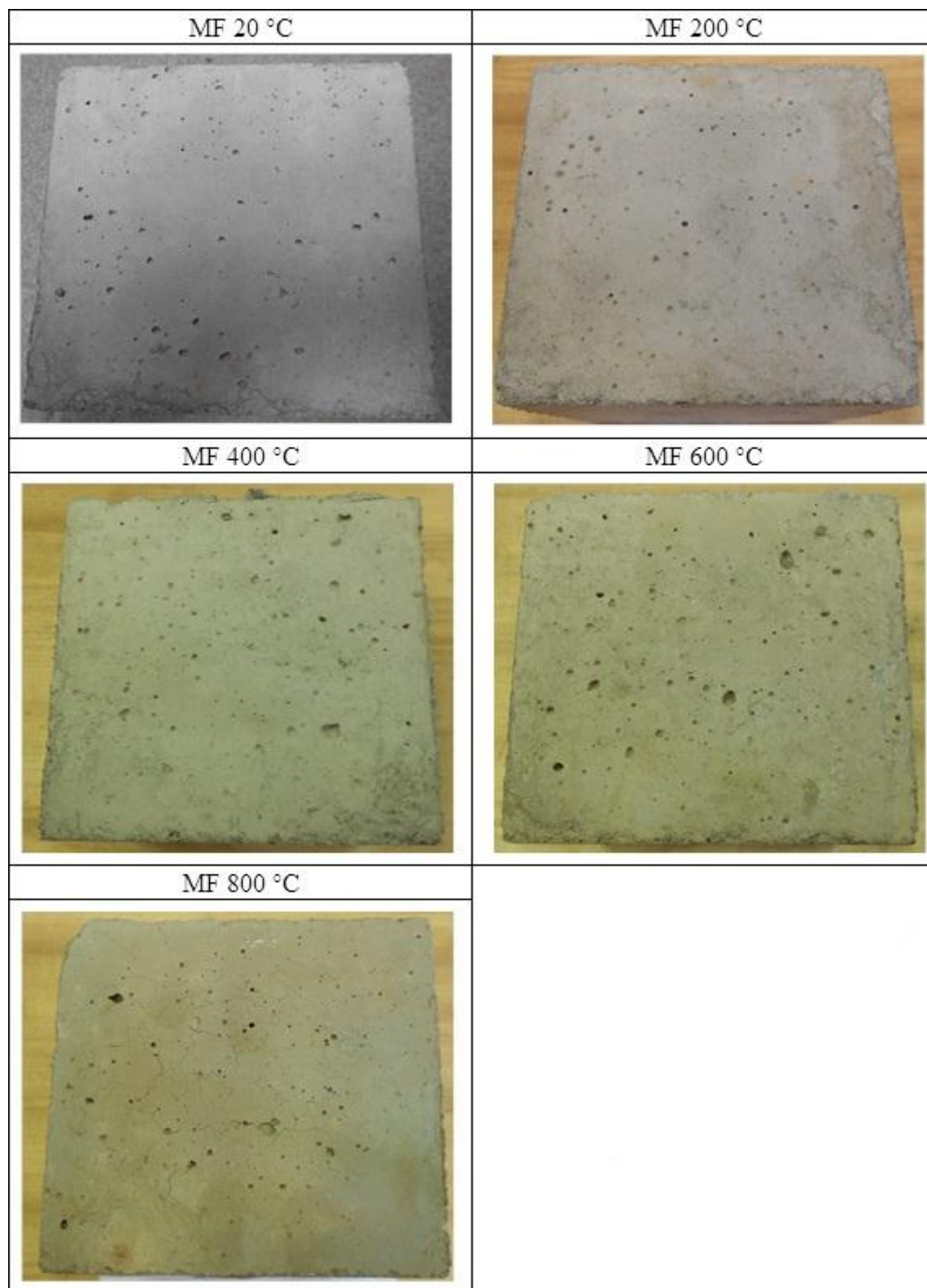
Obrázek 38: Vyhodnocení pevnosti v tlaku

Tabulka 21: Pevnost v tlaku po teplotním zatěžování

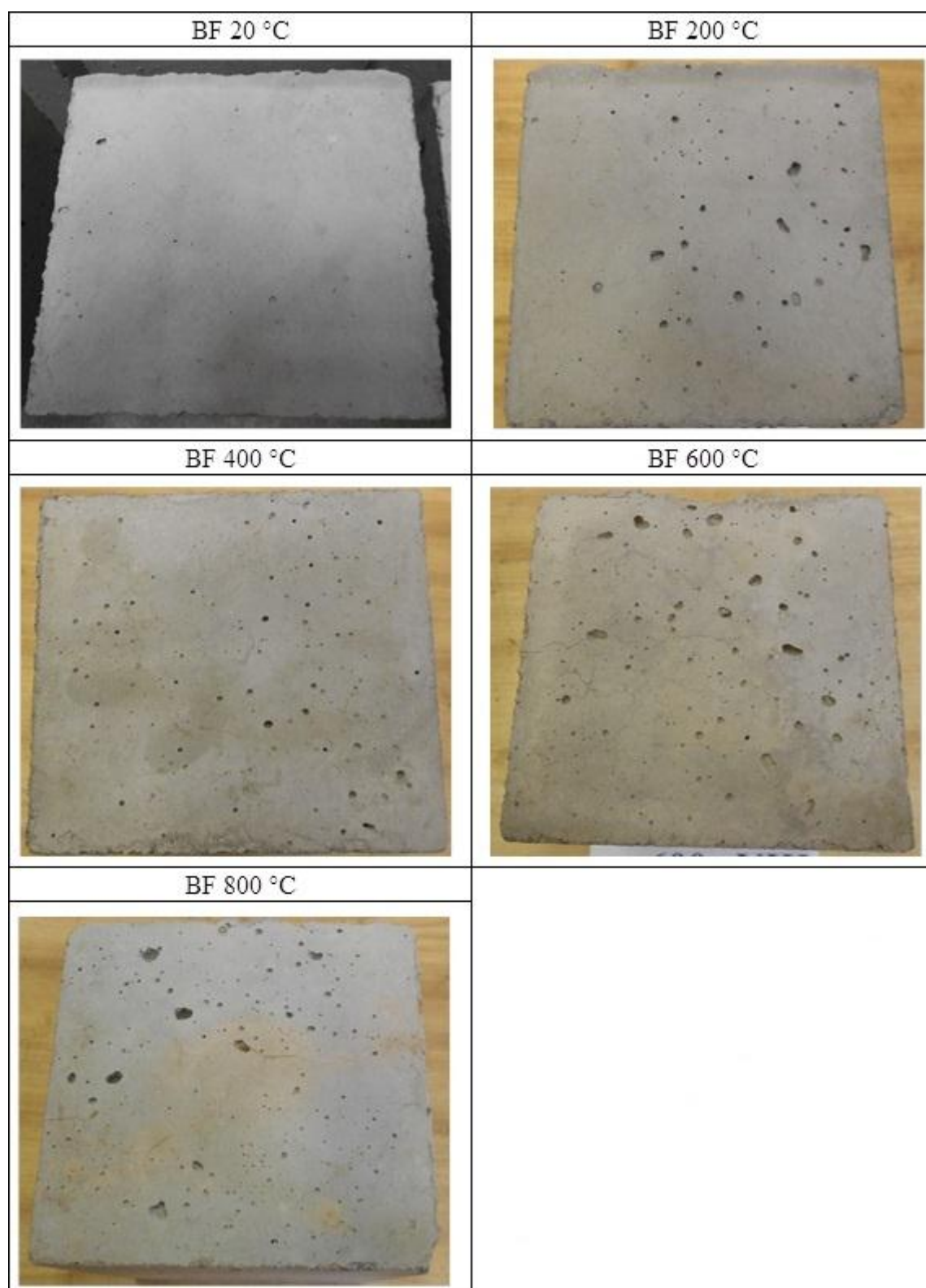
receptura	Teplota [°C]	označení	$\sigma f_c$ [MPa]	Změna $f_c$ [%]
MF	20	MF1	28,9	
		MF2		
	200	MF3	30,5	+5,2
		MF4		
	400	MF5	27,6	-4,6
		MF6		
	600	MF7	27,2	-6,3
		MF8		
	800	MF9	12,9	-55,5
		MF10		
BF	20	BF1	31,5	
		BF2		
	200	BF3	35,3	+10,8
		BF4		
	400	BF5	29,1	-8,1
		BF6		
	600	BF7	25,7	-22,7
		BF8		
	800	BF9	12,1	-61,5
		BF10		
MFP	20	MFP1	31,2	
		MFP2		
	200	MFP3	33,1	+5,6
		MFP4		
	400	MFP5	29,2	-7,1
		MFP6		
	600	MFP7	28,6	-9,4
		MFP8		
	800	MFP9	13,9	-55,3
		MFP10		

#### 4.5.4 Vizuální hodnocení povrchu zkušebních těles

##### 4.5.4.1 Receptura MF

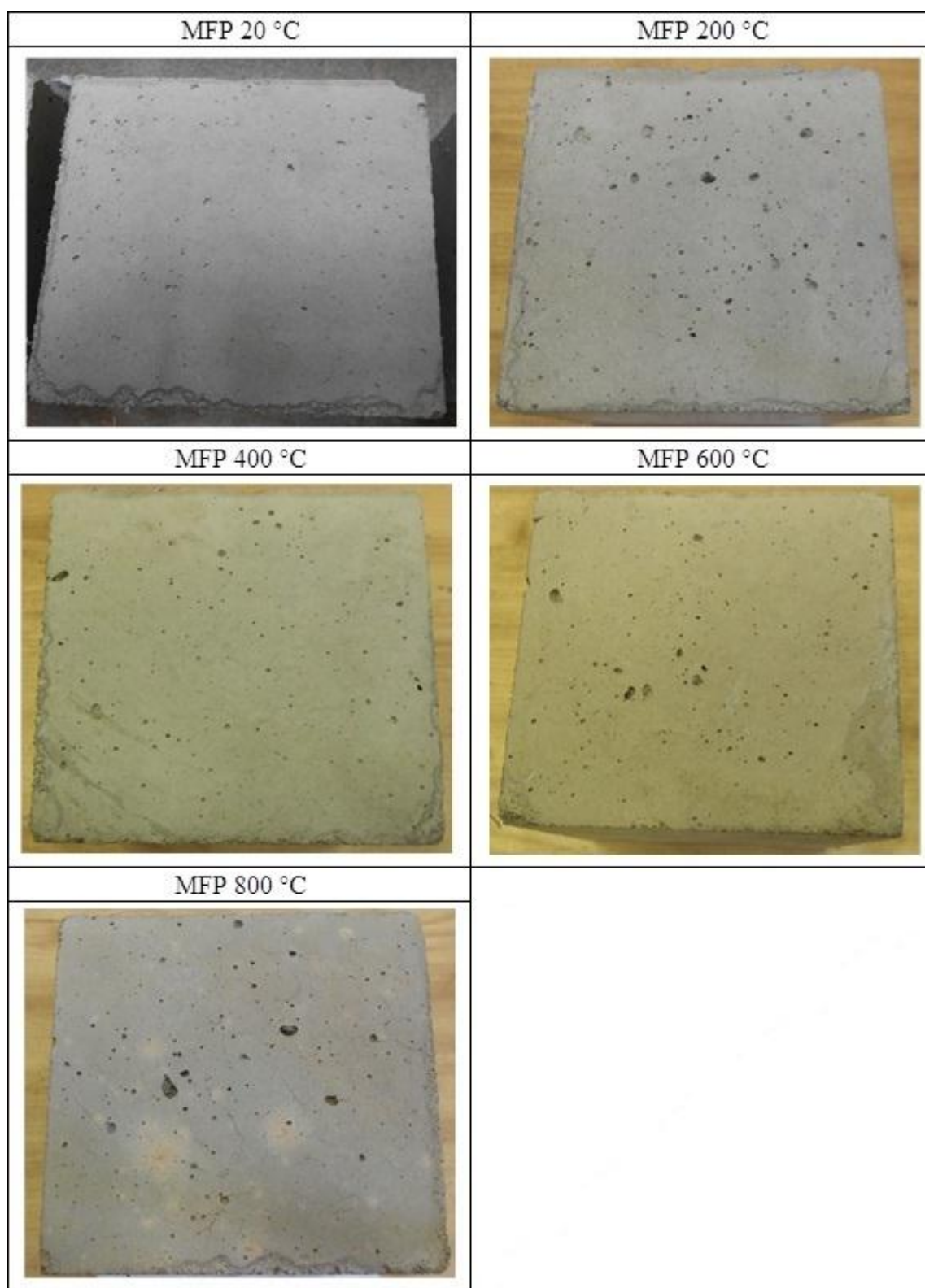


Obrázek 39: Vizuální posouzení zkoušených vzorků receptury MF

**4.5.4.2 Receptura BF**

*Obrázek 40: Vizuální posouzení zkoušených vzorků receptury BF*

#### 4.5.4.3 Receptura MFP



Obrázek 41: Vizuální posouzení zkoušených vzorků receptury MFP

## 4.6 Vyhodnocení experimentální části

### 4.6.1 Objemová hmotnost betonu

Z hlediska objemové hmotnosti v čerstvém stavu vykazala nejvyšší objemovou hmotnost receptura MFP s amfibolitickým kamenivem a polypropylenovými vlákny ( $2470 \text{ kg/m}^3$ ). Zhruba stejnou objemovou hmotnost vykazala receptura MF, která byla pouze s amfibolitickým kamenivem bez přídavku vláken ( $2450 \text{ kg/m}^3$ ). Nejnižší objemovou hmotnost měla receptura BF s kamenivem Moravská droba ( $2320 \text{ kg/m}^3$ ).

Pro objemovou hmotnost v ztvrdlém stavu přetrval stejný trend a receptura MFP vykazala objemovou hmotnost  $2390 \text{ kg/m}^3$ . Receptura MF měla již oproti první receptuře vyšší pokles objemové hmotnosti, a to z toho důvodu, že u receptury MFP s polypropylenovými vlákny, které vážou vodu a nedochází tak k rychlému vypařování vody jako u receptury MF. Receptura MF vykazala objemovou hmotnost  $2350 \text{ kg/m}^3$ . Nejnižší objemovou hmotnost měla opět receptura BF a to  $2260 \text{ kg/m}^3$ .

U všech receptur po teplotním zatížení byl pozorován stejný trend snižování objemové hmotnosti. Objemová hmotnost se snižovala se vzrůstající teplotou. U všech receptur byl nejvyšší pokles objemové hmotnosti pozorován při nejvyšší teplotě  $800^\circ\text{C}$ . Nejvyšší pokles zaznamenala receptura BF s kamenivem Moravská droba a to 10,1 %. U receptury MF s amfibolitickým kamenivem byl pokles 9,2 % a u receptury MFP s PP vlákny byl pokles 8,7 %.

### 4.6.2 Dynamický modul pružnosti betonu

Dynamický modul pružnosti byl zjišťován pomocí ultrazvukové impulsní metody přístrojem TICO. U všech zatěžovaných vzorků byl modul pružnosti změřen před zatížením teplotami a následně po zatížení teplotami. U všech receptur byl pozorován stejný trend poklesu dynamického modulu pružnosti. Již při zatížení  $200^\circ\text{C}$  byl pozorován pokles modulu pružnosti o zhruba 25 až 31 %. Nejvyšší pokles dynamického modulu pružnosti zaznamenala receptura BF (87,9 %). U receptury MFP byl pozorován pokles 84,1 % a u receptury MF 82,6 %. Při vyhodnocování dynamického modulu pružnosti musely být některá měření vyřazena z důvodu vysokého rozptylu hodnot a průměry byly vyhodnoceny bez nich. Toto bylo provedeno pouze u teplot  $800^\circ\text{C}$  u receptury BF a MFP.

### 4.6.3 Pevnost betonu v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku byla provedena dle normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Pevnost v tlaku referenčních vzorků byla stanovena po 28 dnech. Poté byly všechny vzorky podrobeny teplotnímu zatížení na teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C. Po teplotním zatížení byly vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku. U všech receptur byl při teplotě 200 °C pozorován mírný nárůst pevností, což je připisováno další hydrataci při mírně zvýšené teplotě a tím způsobené zvýšení pevností. Nejvyšší zvýšení pevností dosáhla receptura BF (+10,8 %), která obecně oproti ostatním recepturám vykazovala větší objem změn při vyšších teplotách. Při vyšších teplotách než 200 °C již byl pozorován úbytek pevností betonu v tlaku se zvyšující se teplotou. Nejvyšší úbytek pevnosti byl pozorován mezi teplotami 600 °C a 800 °C. Což bylo způsobeno rozkladem  $\text{CaCO}_3$ . Při 800 °C byl u receptury MF s amfibolitickým kamenivem pozorován pokles pevnosti betonu v tlaku o 55,5 %, u receptury MPF se stejným kamenivem a přídavkem polypropylenových vláken byl pozorován podobný pokles (55,3 %). Při této teplotě již polypropylenová vlákna nemají žádný kladný účinek. U receptury BF (kamenivo Moravská droba) byl pozorován vyšší pokles pevností při 800 °C a to 61,5 %.

### 4.6.4 Vizuální posouzení zkoušených těles

Po teplotním zatěžování byly jednotlivé vzorky vyfoceny a bylo provedeno vizuální posouzení. Receptury MFP a MF s amfibolitickým kamenivem při 600 °C vykazaly změnu barvy ze šedivé na hnědou. Při teplotě 800 °C se tato změna začala vracet zpět na barvu počáteční. U receptury BF (kamenivo Moravská droba) toto nebylo zpozorováno v takovém rozsahu. Při posouzení trhlin se žádné trhliny nevyskytovaly při 200 °C. Při zatížení 400 °C byl pozorován vznik prvních malých trhlinek. Trhliny ve vyšším množství se začaly tvořit trhliny při 600 °C u všech receptur. Receptura MFP s Polypropylenovými vlákny vykazovala vyšší počet trhlinek, ale oproti recepturám bez Polypropylenových vláken byly tyto trhlínky kratší a daleko menších průměrů. Toto odpovídá funkci polypropylenových vláken pro vytvoření systému pórů pro únik vodní páry a zamezení explozivního odprýskávání.

## 5 ZÁVĚR

V teoretické části byla popsána problematika chování betonu při působení vysokých teplot. Byla popsána problematika požární bezpečnosti a požární odolnosti. Popsáno bylo navrhování betonových konstrukcí z hlediska požární bezpečnosti včetně křivek, které se dnes pro navrhování používají a přispívají tak k lepší ochraně osob při případném požáru. Dále je zde popsáno, jak se chová beton při působení vysokých teplot a také působení těchto teplot na jednotlivé komponenty betonu. Byla provedena rešerše pro návrh vhodného cementu, kameniva a příměsí a rozptýlené výztuže. Dále byl popsán proces explosivního odprýskávání, které je jedním z nejvíce nebezpečných dějů, které se při vysokých teplotách mohou vyskytnout. Explosivní odprýskávání způsobuje rychlejší průnik vyšších teplot do vnitřku konstrukce a tím rychlejší ohřívání výztuží v konstrukci, což vede k rychlejšímu kolapsu konstrukce. Dále bylo dle rešeršní literatury sledováno zkoušení betonu při působení vysokých teplot jeho druhy a základní vlastnosti a nakonec byly shrnuty požadavky na správné teplotní zatěžování a další okrajové podmínky těchto zkoušek dle doporučení organizace RILEM.

V experimentální části bylo cílem porovnat vlastnosti receptur s rozdílným kamenivem a vláknitou výztuží. Byly připraveny receptury s kamenivem Masty, což je amfibolitické kamenivo a lišily se pouze přidávkem polypropylenových vláken. A třetí receptura obsahovala kamenivo Bohučovice, kde byla horninou moravská droba. Byly sledovány tyto veličiny, objemová hmotnost čerstvého a ztvrdlého betonu a její rozdíl před a po působení vysokých teplot. Dále byla práce zaměřena na sledování změn dynamického modulu pružnosti vlivem působení vysokých teplot. Nejvyšší modul pružnosti vykazovala receptura s amfibolitickým kamenivem a polypropylenovými vlákny, ale od druhé receptury se stejným kamenivem se prakticky neodlišovala. Receptura s kamenivem z moravské droby vykazovala nejnižší modul pružnosti. Úbytek dynamického modulu pružnosti po teplotním zatížení byl u receptur z amfibolitického kameniva podobný, ale oproti receptuře BF byl menší. Dále byla zkoumána zbytková pevnost v tlaku po teplotním zatížení, která byla srovnávána s referenčními vzorky. Při zatěžování vzorků vysokými teplotami jsme u všech receptur docílili mírného zvýšení pevnosti betonu v tlaku při 200 °C, což je důsledkem dodatečné hydratace při mírně zvýšené teplotě. Při vyšších teplotách již docházelo k úbytku zbytkových pevností betonu v tlaku. Největší rozdíl byl pozorován



mezi teplotami 600 °C a 800 °C, kde docházelo z rozkladu  $\text{CaCO}_3$  a tím k velkému poklesu pevností.

Bakalářská práce dává předpoklad pro pokračování tohoto tématu v magisterském studiu, a to zejména v oblasti rešerší směrnic organizace RILEM a možností zkoušení materiálů dle těchto směrnic.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRADÁČOVÁ, Isabela, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Stavby z hlediska požární bezpečnosti*. 1. vyd. Brno: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007, vi, 156 s. Technická knihovna. ISBN 978-80-7366-090-1.
- [2] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010, 189 s. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [3] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. 1. vyd. Praha: Grada, 2006, 262 s. Stavitel. ISBN 80-247-1329-2.
- [4] SIČÁKOVÁ, Alena. *New generation cement concretes: ideas, design, technology and applications*. 1st ed. Košice: Technical University, 156 s. ISBN 978-80-553-0040-5.
- [5] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton: ideas, design, technology and applications*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [6] Doc. Ing. HELA, CSc., Rudolf , Ing. BODNÁROVÁ, Ph.D., Lenka, Ing. KŘÍŽOVÁ, Klára, Ing. VÁLEK, Jaroslav, Vytvoření postupů a receptur pro použití betonu s vyšší trvanlivostí vůči působení vysokých teplot v konstrukcích, Dílčí výzkumná zpráva za rok 2010, CIDEAS – Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, listopad 2010.
- [7] KHOURY, Gabriel Alexander. *Pasivní protipožární ochrana tunelů. Beton: Technologie, Konstrukce, Sanace*. 2004, čtvrtý, 2/2004, s. 50-54.
- [8] Rilem Technical Committee HTC, *Behaviour of Concrete at High Temperatures part 1 Ordinary Concrete*, Dec. 2004
- [9] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [10] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 122 s. ISBN 80-214-2266-1.
- [11] <http://www.redrock-cz.com> [online]. [cit. 2014-03-17]. dostupné z: <http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Fibred.pdf>

- [12] <http://www.merkuro.cz/> [online]. [cit. 2014-03-17].
- [13] BRIATKA, P., ŠEVČÍK, P. Hodnotenie vplyvu rozptýlenej výstuže na vlastnosti betónu, *Beton TKS*, 2/2009
- [14] Information bulletin IB:39 - *Fibre Reinforced Concrete*, Cement & Concrete Association of New Zealand, December 2009.
- [15] Betoniek – High Alumina Cement, *Betoniek IX*/1998
- [16] NEVŘÍVOVÁ, L. Žárovzdorné materiály, Speciální keramika, Studijní opory VUT Brno, 2006.
- [17] <http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/home.htm> [online]. [cit. 2014-04-12].], dostupné z:  
[http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/volne\\_lozeny\\_cement/kvalita/cemiibmsl325r.htm](http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/volne_lozeny_cement/kvalita/cemiibmsl325r.htm)
- [18] <http://www.mapei.cz/> [online]. [cit. 2014-05-05].
- [19] <http://www.ampri.res.in/eng/index.php/facilities-nfc> [online]. [cit. 2014-03-13].
- [20] Materials and Structures: November 2007, Volume 40, Issue 9. In: *Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications*. s. 841-853. DOI: 10.1617/s11527-007-9285-2.
- [21] MIKULINEC, David. *Betony s vyšší odolností vůči působení vysokých teplot*. Brno, 2011. 83 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D..
- [22] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*.
- [23] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Pevnost v tlaku zkušebních těles*.

## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozdělení aktivní a pasivní ochrany [2] .....	6
Obrázek 2: Příklad teplotní křivky se skutečným průběhem teplot plynů [2] .....	8
Obrázek 3: Nominální teplotní křivky [3] .....	9
Obrázek 4: Parametrická teplotní křivka [2] .....	10
Obrázek 5: Tepelná přetvoření některých kameniv [4] .....	14
Obrázek 6: Křivky měřené DTA přístrojem při ohřevu 10 °C/min v dusíku [4] .....	14
Obrázek 7: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících křemičité kamenivo [5] .	15
Obrázek 8: Vliv teploty na pevnost v tlaku betonů obsahujících vápencové kamenivo [5]	15
Obrázek 9: Vliv druhu kameniva a pevnosti v tlaku při vyšších teplotách [5] .....	16
Obrázek 10: Vliv molárního poměru (CaO/ SiO <sub>2</sub> ) a teploty na CSH fáze hydratačních produktů [4] .....	17
Obrázek 11: Vývoj normalizované intenzity základních minerálů pro portlandskou cementovou pastu [4] .....	18
Obrázek 12: Diagram vysvětlující výskyt explozivního odprýskávání vlivem zvýšeného vnitřního tlaku v ohřívaném prvku. PP vlákna jako efektivní metoda snížení tlaku par [4]	22
Obrázek 13: Porovnání vlivu teploty na ztrátu pevnosti běžného betonu (OC), vysokopevnostního betonu (HS) a vysokopevnostního betonu s pevností nad 100 MPa (VHS) [5] .....	23
Obrázek 14: Změny v relativní pevnosti v tlaku betonu porovnané s teplotou dle eurokódu 2(class 1 až 3) oproti výsledkům získaných z betonů s vápencovým kamenivem [4] .....	25
Obrázek 15: Deformační diagram pro beton s pevností v tlaku 100 MPa, získaný pro teploty 120, 250, 400, 600 °C [4] .....	26
Obrázek 16: Ocelová vlákna do betonu [12] .....	28
Obrázek 17: Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu vyztuženého polypropylenovými vlákny; OC = běžný beton; HS = vysokopevnostní beton; VHS = vysokopevnostní beton s pevností nad 100 MPa [5] .....	29
Obrázek 18: Polypropylenová vlákna do betonu .....	30
Obrázek 19: Celulózová vlákna [14] .....	31
Obrázek 20: Různé druhy metod pro určení mechanických vlastností [8] .....	37
Obrázek 21: Zkoušky při kontrolovaném napětí [8] .....	38
Obrázek 22: Zkoušky při kontrolované deformaci [8] .....	39
Obrázek 23: Rozmístění termočlánků na zkušebním tělese [20] .....	41
Obrázek 24: Způsob přípravy vzorku před zatěžováním [20] .....	42
Obrázek 25: Křivka zrnitosti kameniva Masty frakce 0-4 mm .....	44
Obrázek 26: Křivka zrnitosti kameniva Masty frakce 4-8 mm .....	45
Obrázek 27: Křivka zrnitosti kameniva Masty frakce 8-16 mm .....	46
Obrázek 28: Křivka zrnitosti kameniva Bohučovice frakce 0-4 mm .....	47
Obrázek 29: Křivka zrnitosti kameniva Bohučovice frakce 4-8 mm .....	48
Obrázek 30: Křivka zrnitosti kameniva Bohučovice frakce 8-16 mm .....	49
Obrázek 31: Muflová pec použitá pro teplotní zatěžování vzorků .....	52
Obrázek 32: Způsob teplotního zatěžování vzorků .....	53
Obrázek 33: Přístroj pro měření Proceq TICO [19] .....	53
Obrázek 34: Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu pro jednotlivé receptury .....	54

Obrázek 35: Vliv vysokých teplot na objemovou hmotnost jednotlivých vzorků .....	56
Obrázek 36: Úbytek objemové hmotnosti pro jednotlivé receptury.....	56
Obrázek 37: Vliv vysokých teplot na dynamický modul pružnosti .....	58
Obrázek 38: Vyhodnocení pevnosti v tlaku .....	58
Obrázek 39: Vizuální posouzení zkoušených vzorků receptury MF .....	60
Obrázek 40: Vizuální posouzení zkoušených vzorků receptury BF.....	61
Obrázek 41: Vizuální posouzení zkoušených vzorků receptury MFP .....	62

## 8 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Změny probíhající v betonu při vysokých teplotách [2] .....	12
Tabulka 2: Koeficienty lineární tepelné roztažnosti různých typů hornin [4].....	13
Tabulka 3: Zhodnocení jednotlivých opatření betonu proti odprýskávání [7] .....	24
Tabulka 4: Vlákná používaná do betonu a jejich vlastnosti [10] .....	27
Tabulka 5: Dávkování celulóзовých vláken [14].....	32
Tabulka 6: Doporučené rychlosti nárůstu teplot pro standardní tělesa [20].....	41
Tabulka 7: Statické hodnocení kvality cementu dle ČSN EN 197 – 1 [17] .....	43
Tabulka 8: Sítový rozbor kameniva Mastý frakce 0-4 mm .....	44
Tabulka 9: Sítový rozbor kameniva Mastý frakce 4-8 mm .....	45
Tabulka 10: Sítový rozbor kameniva Mastý frakce 8-16 mm .....	46
Tabulka 11: Sítový rozbor kameniva Bohučovice frakce 0-4 mm .....	47
Tabulka 12: Sítový rozbor kameniva Bohučovice frakce 4-8 mm .....	48
Tabulka 13: Sítový rozbor kameniva Bohučovice frakce 8-16 mm .....	49
Tabulka 14: Vlastnosti vláken Fibrin 3/15 [21] .....	50
Tabulka 15: Navržená receptura MF .....	50
Tabulka 16: Navržená receptura BF .....	51
Tabulka 17: Navržená receptura MFP .....	51
Tabulka 18: Objemové hmotnosti jednotlivých receptur v čerstvém stavu .....	54
Tabulka 19: Objemové hmotnosti ztvrdlého betonu se změnami při vysokých teplotách..	55
Tabulka 20: Výsledné dynamické moduly pružnosti před a po zatížení teplotami.....	57
Tabulka 21: Pevnost v tlaku po teplotním zatěžování .....	59