

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2013**

**Marcel Sládek**

**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Experimentální analýza betonových kompozitních materiálů při extrémním  
teplotním namáhání**

**Marcel Sládek**

**Bakalářská práce**

**2013**



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Marcel Sládek  
Osobní číslo: D08371  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: Dopravní stavitelství  
Název tématu: Experimentální analýza betonových kompozitních materiálů  
při extrémním teplotním namáhání  
Zadávající katedra: Katedra dopravního stavitelství

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. přehled řešené problematiky v ČR a zahraničí
2. příprava zkušebních těles pro experiment
3. laboratorní zkoušky na zkušebních tělesech
4. písemný elaborát o průběhu zkoušek
5. vyhodnocení a závěr
6. fotodokumentace

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Procházka J., Trtík K., Vodička J. Betonové konstrukce, příklady 1. část  
ČVUT Praha, 1994
- Procházka J., Krátký J., Navrhování betonových konstrukcí podle EC 2  
ČVUT Praha, 1995
- ČSN 73 1201 Navrhování betonových konstrukcí Vydavatelství Úřadu pro  
normalizaci a měření
- Ing. Lopour P., Stavební materiály, skripta, DFJP, Upa
- Pytlík P., Technologie betonu, VUT Brno, 2000
- Krátký J., Trtík K., Vodička J., Drátkobetonové konstrukce, IC ČKAIT, 2000

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.**

Katedra dopravního stavitelství

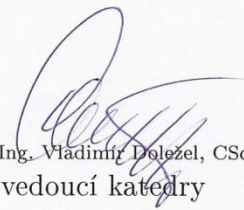
Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2013**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.  
děkan

L.S.



doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 20. 5. 2013

Marcel Sládek

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval za vedení této bakalářské práce a pomoc při jejím zpracování panu Ing. Aleši Šmejdrovi Phd. a za poskytnutí studijních materiálů panu Ing. Vladimíru Suchánkovi a panu Ing. Pavlovi Lopourovi. Děkuji také své rodině za patřičnou trpělivost a podporu během mého studia.

## **ANOTACE**

Hlavním zaměřením této práce je zkoumání vlastností betonu při extrémním teplotním namáhání. Jedná se o beton vyztužený ocelovými vlákny, polypropylenovými vlákny a o beton bez výztuže. Začátek práce je věnován teoretické části ohledně kompozitních materiálů. Další část popisuje vliv extrémních teplot na betonové konstrukce. Důraz je kladen na experimentální část, tedy na výrobu zkušebních těles, vystavení zkušebních těles extrémní teplotě v elektrické peci a na provádění pevnostních zkoušek. V závěru je provedeno vyhodnocení pevnostních zkoušek mezi zkušebními tělesy vystavených extrémní teplotě a tělesy, která této teplotě vystaveny nebyly. Jednotlivé postupy celé práce jsou podloženy fotodokumentací.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Beton, tepelné namáhání, ocelová vlákna, polypropylenová vlákna, pevnostní zkoušky

## **TITLE**

Experimental analysis of concrete composite materials under extreme thermal stress

## **ANNOTATION**

The main focus of this work is to examine the properties of concrete under the extreme thermal stress. It is a concrete reinforced with steel fibres, polypropylene fibres and concrete without a reinforcement. At the beginning, the work describes the theoretical section of concrete. The high emphasis is put on the experimental part, the production of test elements, the test elements exposed to extreme temperature in an electric furnace and the implementation of stress tests. In conclusion there are evaluations of strength tests between test elements exposed extreme temperature and elements, that have not been exposed to this temperature. Individual processes are supported by the photographs.

## **KEYWORDS**

Concrete, thermal loads, steel fibres, polypropylene fibres, strength tests

# OBSAH

ÚVOD .....	10
1. PROBLEMATIKA BETONŮ .....	11
1.1. Beton .....	11
1.1.1. Historie betonu .....	11
1.1.2. Charakteristika betonu .....	12
1.1.2.1. Druhy a označení betonu .....	12
1.1.2.2. Vlastnosti betonu .....	13
1.1.3. Složky betonu .....	14
1.1.3.1. Voda .....	15
1.1.3.2. Cement .....	15
1.1.3.3. Kamenivo .....	16
1.1.3.4. Přísady .....	17
1.1.3.5. Příměsi .....	17
1.2. Beton vyztužený polypropylenovými vlákny .....	17
1.2.1. Historie .....	17
1.2.2. Charakteristka .....	17
1.2.3.1. Polypropylenová vlákna (PP vlákna) .....	18
1.2.4. Oblasti použití .....	18
1.3. Drátkobeton .....	19
1.3.1. Historie drátkobetonu .....	19
1.3.2. Charakteristika materiálu .....	19
1.3.2.1. Vlastnosti drátkobetonu .....	20
1.3.2.2. Používaný materiál a jeho dávkování .....	21
1.3.3. Současný výzkum .....	23



1.3.4. Příklad použití drátkobetonu.....	23
2. VLIV EXTRÉMNÍCH TEPLOT NA BETONY .....	25
2.1. Terminologie.....	25
2.1.1. Požární odolnost .....	25
2.1.2. Ohnivzdornost.....	25
2.1.3. Požární bezpečnost .....	25
2.2. Normové požadavky .....	26
2.2.1. Aktuální normy pro odolnost betonu vůči vysokým teplotám .....	27
2.3. Degradace betonů .....	28
2.3.1. Charakteristika .....	28
2.3.2. Běžné cementové betony .....	28
2.3.2.1. Změny mechanických vlastností betonu vystaveného vysokým teplotám .....	29
2.3.3. Vysokohodnotné betony .....	30
2.3.3.1 Explosivní odprýskávání betonu.....	31
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	33
3.1. Výroba zkušebních těles .....	33
3.1.1. Betonová směs .....	33
3.1.2. Betonová směs s drátky a polypropylenovými vlákny .....	33
3.1.2.1. Drátky: .....	34
3.1.2.2. Polypropylenová vlákna .....	34
3.1.3. Pomůcky .....	34
3.1.4 Plnění forem.....	34
3.1.5. Vyrobená tělesa a jejich ošetřování .....	35
3.2. Vystavení zkušebních těles extrémní teplotě.....	36
3.2.1. Elektrická pec .....	36
3.2.2. Fotodokumentace zkušebních těles .....	37
3.3. Měření.....	38

3.3.1. Rozměry a hmotnost .....	38
3.3.2. Jednoosá tlaková zkouška .....	39
3.3.3. Tříbodová zkouška tahu za ohybu .....	39
3.4. Vyhodnocování .....	40
3.4.2. Statistika – aritmetický průměr, směrodatná odchylka.....	40
3.4.3. Objemová hmotnost.....	40
3.4.4. Pevnost v tlaku.....	40
3.3.6. Pevnost v tahu za ohybu .....	40
4. VÝSLEDKY .....	41
4.1. Bez působení extrémních teplot.....	41
4.1.1. Objemová hmotnost.....	41
4.1.2. Pevnost v tlaku.....	42
4.1.3. Pevnost v tahu za ohybu .....	42
4.2. Působení extrémních teplot.....	43
4.2.1. Objemová hmotnost.....	43
4.2.2. Pevnost v tlaku.....	44
4.2.3. Pevnost v tahu za ohybu .....	45
5. ZÁVĚR .....	47
6. SOUPIS BIBLIOGRAFICKÝCH CITACÍ .....	48
7. SEZNAM TABULEK .....	50
8. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	51
9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	52

## ÚVOD

Pro výrobu pozemních a inženýrských staveb je nejrozšířenější a nejvýznamnější stavební hmotou cementový beton, a to hlavně díky snadné dostupnosti všech složek, jednoduchosti výrobního procesu, výrobní ceně a minimálním udržovacím nákladům.

V této práci jsme se ovšem nezabývali pouze prostým cementovým betonem, ale hlavně betonem vyztuženým ocelovými a polypropylenovými vlákny, který je nazýván také jako betonový kompozitní materiál. Dále nás zajímal vliv extrémních teplot na tento materiál.

Hlavní část této bakalářské práce se odehrávala v technické laboratoři Univerzity Pardubice. Byla zde zhotovena zkušební tělesa ve tvaru krychle a kvádrů o normových rozměrech, pro pozdější zkoumání mechanických vlastností betonů, a to především pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. První polovina zkušebních těles byla po uplynutí stanovené doby připravena k laboratorním testům, druhá polovina se podrobila extrémnímu teplotnímu namáhání ve speciální elektrické peci, která byla Univerzitě Pardubice poskytnuta, a až poté byla zkušební tělesa testována. Nejvíce nás zajímaly výsledky testů na zkušebních tělesech, které byla podrobena extrémnímu teplotnímu namáhání.

# 1. PROBLEMATIKA BETONŮ

Betonovým kompozitním materiálům je v poslední době věnována stále větší pozornost. Spekuluje se čím dál více o možnostech vhodného využití betonů s rozptýlenou výztuží, a proto je velká pozornost věnována i oblasti výzkumu tohoto konstrukčního materiálu. Za posledních 30 let si odborníci uvědomili, kolik výhod jim tento konstrukční materiál přináší. Není to jen větší pevnost v tlaku a obzvláště v tahu, ale i vysoká odolnost proti rozvoji mikrotrhlin, trvanlivost, větší pružnost nebo odolnost vůči náhlým teplotním změnám. Rozvoj tohoto materiálu brzdí především jeho cena, respektive správné posouzení. Dokud investoři nepřijmou vztah mezi cenou a užitnými vlastnostmi tohoto materiálu, bude jeho nárůst jen velmi pozvolný.

I když zde spekulujeme o tomto kompozitním materiálu, měli bychom si uvědomit, že jeho hlavními surovinami jsou stále jen směs kameniva, pojiva a vody. Souhrnně tedy beton, tak jak ho nazýváme již tisíce let.

## 1.1. Beton

Beton se často označuje jako umělý kámen. Je pevný, trvanlivý, snadno zpracovatelný a nehořlavý. Má výbornou pevnost v tlaku. Můžeme ho libovolně tvarovat. Snadno udrží teplo či chlad a zajišťuje tak tepelnou stabilitu. Díky snadné tvarovatelnosti a jeho možné recyklaci, je vhodný pro použití v pozemním a inženýrském stavitelství, ale i v drobném stavebnictví.

Beton se stal po dobu svého užívání pojmem odolnosti. Ke splňování kladeným požadavků musí být čerstvý beton vyráběn ve stále stejné jakosti. Toho se nejnanejději dosáhne pomocí výroby ve specializovaných velkovýrobnách čerstvého betonu neboli betonárnách, odbornou přepravou a odborným ukládáním čerstvého betonu podle platných norem<sup>1</sup>.

### 1.1.1. Historie betonu

Kdy vlastně beton vznikl a jak dlouho se používá, záleží na tom, jak volně či konkrétně chceme beton definovat. Pokud se bude jednat o jednoduchý popis betonu jako „umělý

---

<sup>1</sup> ČSN EN 206-1 Beton-část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ČSN EN 206-1 Beton-část 1 byla vydána v září 2001. ČSN EN 206-1 Změna Z3 je platná od 1. 5. 2008. Hlavní důraz je kladen na kvalitu betonu a jeho trvanlivost, nikoli pouze na pevnost. Znamená to, že rozhodujícím kritériem pro volbu minimální požadované pevnostní třídy bude ve většině případů prostředí, ve kterém beton bude umístěn.

kámen - slepenec“ můžeme uvést příklady z období několika století př. n. l. Prvopočátky se objevily již ve starém Egyptě, přibližně 3600 př. n. l. V Jeruzalémě byly postaveny vodní nádrže 1000 let př. n. l. První použití hydraulického betonu s pojivem na bázi hydraulických vápen, velmi podobného tomu, který používáme dnes, je datováno do období starověkého Říma, přibližně 200 let př. n. l. Tehdy se začal používat na výrobu pojiva sopečný produkt pucolán - přírodní hydraulický cement. O pucolánu je již písemná zmínka v knize Marca Vitruvia Pollia, Caesarova vojenského stavitele: Deset knih o architektuře. Se zánikem Římské říše údajně zanikla i znalost používání hydraulických pojiv a byla znovuobjevena až s novověkými pokusy Smeatona. Ten v roce 1796 poprvé použil moderní portlandský cement.

V naší zemi byl beton poprvé použit v Praze, při stavbě budovy Akademie věd, v roce 1912.

Vlastnosti dnešního betonu jsou výsledkem zkoumání, zdokonalování a vylepšování jeho technických kvalit po několik století.

### **1.1.2. Charakteristika betonu**

Během tuhnutí (hydratace) a tvrdnutí betonu probíhá v materiálu nespočet fyzikálních a chemických procesů, při kterých se uvolňuje teplo. Díky těmto procesům získává beton své mechanické vlastnosti. Proces tuhnutí začíná přibližně po 45 minutách od namíchání a trvá až 12 hodin. Tuhnutí není závislé na atmosféře, beton tuhne i pod vodou. Beton neztvrdne tím, že vyschne, ale že postupně během několika týdnů vykrytalizuje. Čím je tepleji, tím proces krystalizace probíhá rychleji. Tento proces nejde žádným způsobem zastavit, a proto není možné beton skladovat k opětovnému použití. Při krystalizaci voda nesmí zamrznout. Při teplotě kolem 5 °C dochází sice ke zpomalení krystalizace, ale při oteplení opět pokračuje.

#### **1.1.2.1. Druhy a označení betonu**

Druhů je nespočet a rovněž tak kritérií, podle kterých je rozdělujeme.

Betony nejběžněji rozdělujeme podle pevnosti (běžné, vysoko pevnostní), způsobu výroby (monolitický, prefabrikovaný), objemové hmotnosti (lehký, obyčejný, těžký), tvaru zkušebního tělesa (krychelná pevnost, válcová pevnost), vyztužení (prostý, předpjatý, vláknobeton, železobeton), konečného vzhledu (pohledový, probarvený, vymývavý).

Označení:

**BETON ČSN EN 206-1**

**C25/30 – XC3, XF1 – Cl 0,2 – Dmax 16 mm – S1**

**Max průsak 40 mm dle ČSN EN 12 390 – 8**

**Modul pružnosti 25 GPa dle ČSN ISO 6784**

Povinné parametry

C25/30 – pevnost v tlaku (válcová/krychelná)

XC3, XF1 – stupně vlivu prostředí

Cl 0,2 – obsah chloridů

Dmax 40 mm – maximální velikost zrna kameniva

S1 – konzistence

Nepovinné parametry

Max průsak 40 mm dle ČSN EN 12 390 – 8

Modul pružnosti 25 GPa dle ČSN ISO 6784

### **1.1.2.2. Vlastnosti betonu**

Vlastnosti betonu jsou určeny vlastnostmi jeho složek a jejich objemovým podílem (kamenivo, cement, voda, přísady a příměsi), způsobem míchání betonové směsi, dopravou, ukládáním, zhutňováním a ošetřováním betonu. Rozhodující význam pro vlastnosti betonu má cementový kámen.

Vlastnosti betonu můžeme rozdělit do 4 skupin:

- **mechanické** - pevnost v tlaku, v příčném tahu, tahu za ohybu, ve smyku
- **deformační** – vlastnosti související se změnou objemu působících sil (modul pružnosti, dotvarování), nebo působením vnitřních sil (smrštění)
- **permeabilita betonu** – pohyb média nebo toku energie (vodotěsnost, vzlínavost, nasákavost, tepelná a elektrická vodivost)
- **trvanlivost** – odolnost proti působení vnějších sil a vlivů (mrazuvzdornost, ohnivzdornost, obrusnost, odolnost proti korozi betonu a oceli)

### Výhody:

- **velká pevnost v tlaku** – běžné betony 5-60 MPa, vysokopevnostní 80-120 MPa, upravené při teplotě okolo 250 °C 600-800 MPa
- **trvanlivost** – na vzduchu i ve vodě velmi vysoká, závisí na dodržení technologických postupů, na prostředí, kterému je beton vystaven
- **odolnost vůči mechanickému poškození** – lze vyrobit betony houževnaté, otěruvzdorné, pancéřové
- **ohnivzdornost** - závisí především na použitém kamenivu. Nevhodné je kamenivo obsahující křemen (praskání při teplotě nad 500 °C) a živec (nízká teplota tání). Běžný beton se poruší při déle trvající teplotě okolo 800 °C
- **jednolitost a tvárlivost** – vytváření prvků různých tvarů
- **hospodárnost** - je dána velkou trvanlivostí betonových konstrukcí, nízkými náklady udržování a levnou výrobou z domácích surovin
- **recyklovatelnost** – beton, který již dosloužil, může být použit jako kamenivo, pro výrobu betonu nového

### Nevýhody:

- **malá pevnost v tahu** – (1/10 – 1/20 pevnosti v tlaku)
- **velká objemová hmotnost** – prostý beton 1800-2400 kg.m<sup>-3</sup>, železobeton až 3000 kg.m<sup>-3</sup>
- **tepelná a zvuková vodivost** – pro zlepšení můžeme beton vylehčit
- **obtížnost rekonstrukce** - vzhledem k monolitčnosti, velké objemové hmotnosti a pevnosti jsou rekonstrukce pracné a nákladné
- **objemové změny** – vznikají při tuhnutí a tvrdnutí betonu a při změnách teploty konstrukce. Při tuhnutí a tvrdnutí na vzduchu dochází ke smršťování betonu. Objemovým změnám vlivem teplot čelíme vytvořením dilatačních spár.
- **citlivost na kvalitu výroby** – nedodržení technologického postupu vede ke snížení všech důležitých vlastností betonu

### 1.1.3. Složky betonu

Beton vznikne smícháním cementu, hrubého a drobného kameniva, vody, příměsí a přísad. Smícháním cementu s vodou se nastartuje chemická reakce zvaná hydratace. Cement působí

v betonu jako pojivo, kamenivo jako plnivo. Poté beton tuhne a tvrdne. Poměr jednotlivých složek významně ovlivňuje charakter betonové směsi.

### **1.1.3.1. Voda**

Betonářská voda – slouží k výrobě betonu

Záměsová voda – slouží k přípravě betonové směsi

Požadavky na záměsovou vodu stanoví **ČSN EN 1008 (732028)**

Ošetřovací voda – slouží k ošetřování betonu při jeho tvrdnutí

Pitná voda – považuje se za vhodnou pro použití do betonu. Voda se nemusí zkoušet. (dle ČSN 830611 – Pitná voda)

### **1.1.3.2. Cement**

Cement je hydraulické pojivo. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která díky chemické reakci tuhne a tvrdne. Cement se vyrábí podle normy ČSN EN 197-1 (72 2101) Cement-Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití platné od července 2001.

Cementy se dělí z několika hledisek:

#### **Podle složení:**

- CEM I – portlandský cement
- CEM II – portlandský cement směsný
- CEM III – vysokopecní cement
- CEM IV – pucolánový cement
- CEM V – směsný cement

#### **Podle množství příměsí:**

- A – 6 až 20 %
- B – 21 až 35 %

#### **Podle konkrétních druhů příměsí:**

- K – slínek
- S – vysokopecní struska



- D – křemičitý úlet
- P – přírodní pucolány
- V – křemičité popílky
- W – vápenaté popílky
- T – kalcinovaná břidlice
- LL, L – vápence

**Podle vaznosti (pevnosti):**

Číslo uvádí vaznost (pevnost) v MPa po 28 dnech

- 32,5
- 42,5
- 52,5

**Podle rychlosti vývoje počáteční pevnosti:**

- R – rychlý
- N – normální

**1.1.3.3. Kamenivo**

Je zrnitý anorganický materiál. Pokud má vhodné složení a zrnitost, může být použit pro výrobu betonu. Skládá se z několika frakcí, které tvoří pevnou matici a slouží jako plnivo.

**Podle velikosti:**

Čísla udávají rozmezí velikosti částic v mm

- drobné kamenivo – frakce 0/2 a 0/4
- hrubé kamenivo – frakce 4/8, 8/16, 11/22, 16/22
- široká frakce – 0/22, 0/32 označovány jako šterkodrt' nebo šterkopísek

**Podle druhu:**

- těžené
- těžené drcené

**Podle původu:**

- umělé – v ČR vyráběn pouze liapor (keramzit)
- přírodní

- recyklované – využití již jednou použitého materiálu

#### **1.1.3.4. Přísady**

Přísady se používají ve formě roztoků, emulzí nebo prášků, dávkování je obvykle do 5% hmotnosti cementu. Účelem dávkování přísad je zlepšení vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu nebo získání nových vlastností umožňujících zavedení zcela nových technologických postupů. Nejrozšířenější oblastí je používání plastifikačních nebo superplastifikačních přísad, umožňujících snížení obsahu záměsové vody a tedy drahocennou úsporu cementu.

#### **1.1.3.5. Příměsi**

Příměsi jsou práškovitý materiál, který se přidává do betonu za účelem zlepšení určitých vlastností nebo dosažení speciálních vlastností. Mezi příměsi patří například vysokopecní struska, létavé popílky, křemičité úlety. Dále k příměsím řadíme barevné pigmenty, organické polymery a vláknité látky (**skleněná, plastová vlákna a ocelové drátky**).

## **1.2. Beton vyztužený polypropylenovými vlákny**

### **1.2.1. Historie**

Polypropylenová vlákna se začala prakticky používat v 70. letech 20. století. Jejich využití z počátku bylo velmi neperspektivní. V dnešní době je tomu však jinak a polypropylenová a polymerová vlákna jsou vyhledávanou složkou do betonových směsí. Zejména kvůli lepší protipožární ochraně konstrukce a schopnosti zamezení vzniku smršťovacích trhlin.

### **1.2.2. Charakteristika**

Polypropylenová vlákna (PP) zabraňují vzniku smršťovacích trhlin v raném stádiu tuhnutí a ztvrdnutí betonu. Po ztvrdnutí betonu jeho vlastnosti prakticky neovlivňují. Z omezení vzniku trhlin lze dále odvozovat, že v důsledku snížení počtu trhlin dochází ke zlepšení mrazuvzdornosti, snížení permeability a zvýšení vodonepropustnosti, a že přítomnost vláken pozitivně ovlivňuje zvýšení odolnosti proti rázům a zvýšení lomové houževnatosti. Nejčastěji se používají u jemnozrnných potěrů a vodotěsných betonů. Dávkování se pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,9 kg.m<sup>-3</sup>. Vlákna se dodávají v rozpustných sáčkách a jsou dávkována do

autodomíchávače. Beton vyztužený polypropylenovými vlákny také zvyšuje protipožární ochranu betonových konstrukcí. Při teplotě asi 160 °C dochází k tání vláken a tím vytvoření sítě kanálků v betonu, které umožňují odpaření vázané vody. Zabrání se tak explozivnímu oddělování povrchových vrstev betonu a odhalení výztuže, jejímu přehřátí a ztráty pevnostních charakteristik. Bylo prokázáno, že přidáním 1 kg PP vláken do 1 m<sup>3</sup> betonu dochází pouze k částečnému nebo nepatrnému poškození konstrukce. A je také důležitou skutečností, že PP vlákna v dávce do 1 % neovlivňují výrazným způsobem pevnosti v tlaku a tahů betonů.

### **1.2.3.1. Polypropylenová vlákna (PP vlákna)**

PP vlákna tvoří významnou skupinu materiálů pro rozptýlenou výztuž. Jsou to syntetická vlákna z organických materiálů. Polypropylen je nejlehčí ze všech textilních vláken (0,91 g.cm<sup>-3</sup>). Jsou odolná proti kyselinám, zásadám, mechanickému poškození během míchání a jsou kompatibilní se všemi známými typy přípravků a přísad do betonů. Nasákavost je nulová, takže jeho vlastnosti jak ve vysušeném stavu, tak ve vlhkém jsou srovnatelné. V současnosti se pro vyztužování cementových matric vyrábí 3 druhy PP vláken - monofilamentní, fibrilovaná, sdružená.



Obr. 1 – Polypropylenová vlákna

### **1.2.4. Oblasti použití**

PP vlákna se používají při zhotovování průmyslových podlah, dlažeb, podlahových potěrů, injektovaného betonu, tunelů, požárně odolných jímek, silnic, letišť, sil, přehrad, nosných zdí,

přehrad vodních elektráren, nosných pilířů, zkrátka v dnešní době v celém odvětví stavebnictví.

### **1.3. Drátkobeton**

Beton vyztužený ocelovými drátky, které přenášejí tlakové, ale i tahové pevnosti. Vše, co jsme si doposavad popsali u prostého betonu, platí i pro takto vyztužený beton. Dokonce drátkobeton dosahuje lepších mechanicko-fyzikálních vlastností. Technologický postup se podařilo natolik zdokonalit, že o tento materiál je čím dál větší zájem. Našel využití zejména pro průmyslové stavebnictví, a to jako podlahy v halách, skladovacích prostorech, letištních plochách, ostění tunelů nebo mostovkách.

#### **1.3.1. Historie drátkobetonu**

První pokusy o využití drátkobetonu spadají do poloviny 70. let. V té době na trhu bohužel nebyly k dispozici ocelové drátky, které by byly možné pro vyztužování použít. Až v roce 1989 začala působit řada dovozců. I české firmy po tomto roce začínají produkovat tyto ocelové drátky. V dnešní době je trh s ocelovými drátky velmi rozmanitý a k dispozici je celé spektrum drátků různých vlastností a tvarů.

Překážkou k většímu využití bylo zhodnocení ceny drátkobetonu. Drátky i v minimálním množství, ve kterém se do betonu vkládají, představovaly nemalý nárůst ceny. Při pouhém mechanickém porovnání ceny drátkobetonu a prostého betonu, nebylo možné očekávat jiné rozhodnutí, než zamítnutí realizace s drátky. Pokud by se ale do ekonomických parametrů zavedla například vyšší životnost konstrukce, mohlo by se již o tomto materiálu uvažovat. Naštěstí tato skutečnost byla vnímána stále větší skupinou odborníků, a proto v dnešní době má drátkobeton čím dál vyšší uplatnění.

#### **1.3.2. Charakteristika materiálu**

Drátkobeton (dále DB) patří k moderním kompozitním materiálům. Materiálům kombinující 2 různé složky s odlišnými vlastnostmi. Díky ocelovým drátkům, které jsou přidány do betonu, vzniká materiál s obdobnými vlastnostmi, jaké má železobeton vyztužený klasickým způsobem, tedy betonářskou výztuží. DB vyniká tahovými vlastnostmi a odolností proti šíření

smršťovacích trhlin. V posledních letech jeho využívání roste a objevují se nové typy konstrukcí, kde je možné částečně nebo úplně nahradit klasickou prutovou výztuž ocelovými drátky rozptýlenými rovnoměrně v betonu a tím uspořit čas, práci a finanční prostředky. Využívání DB pro průmyslové podlahy a základové desky se rozrůstá o použití na ostění tunelů, tenkostěnné konstrukce či vodohospodářské stavby.

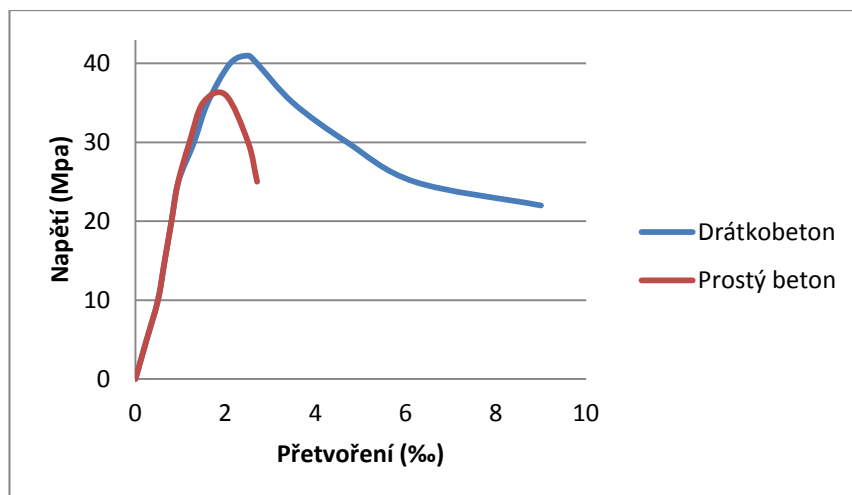
Pro dosažení očekávaných vlastností DB v čerstvém i ztvrdlém stavu je nutné rovnoměrně rozptýlit drátky v celé směsi a obalit je cementovou maltou. Někdy mají ocelové drátky při větší hmotnostní koncentraci tendenci tvořit shluky, tzv. ježky. Ocelové drátky procházejí dávkovacím a rozřazovacím zařízením (rotační bubny, síta), aby se tomuto jevu zabránilo.

DB konstrukce se realizují pomocí dvou technologií. První technologií je klasické ukládání DB směsi do bednění a její následné zpracování. Druhou technologií je tvorba konstrukcí nástřikem DB, používá se suchý i mokvý způsob nástřiku.

#### **1.3.2.1. Vlastnosti drátkobetonu**

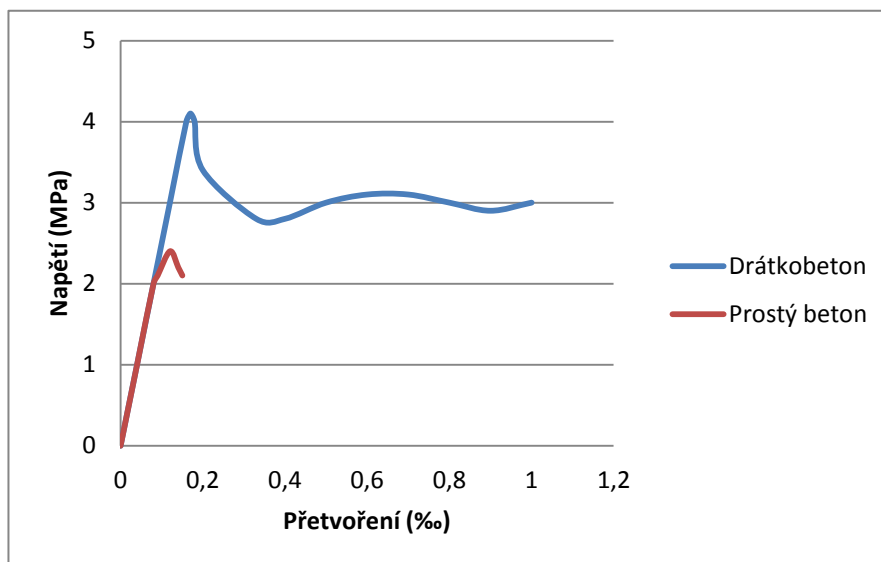
Rozptýlenou výztuží je výrazně ovlivněn pracovní diagram DB v tahu, ale i tlaku. Tím se materiál odlišuje kvalitativně od prostého betonu, jelikož dosahuje vyšších pevností a houževnatostí. Z toho vyplývá, že je schopen daleko lépe odolávat rázům, a proto je využíván u dynamicky namáhaných konstrukcí, jako jsou vozovky, piloty atd.

DB dosahuje velkého plastického přetvoření po dosažení maximálního napětí - pevnosti v tlaku (obr. 1). Při poklesu napětí asi na polovinu má pracovní diagram DB téměř vodorovný směr a přetvoření materiálů má charakter tečení.



Obr. 2 – Pracovní diagram v tlaku drátkobetonu a prostého betonu

Výraznější rozdíl je u pracovního diagramu v tahu (obr. 2). Projeví se nejen vzrůst pevnosti v tahu DB, způsobený oddálením rozvoje mikrotrhlin v jeho struktuře, ale především skutečnost, že i po vzniku trhlin aktivovaná vlákna způsobí, že DB, jako houževnatý materiál, je schopen přenášet jistá reziduální tahová napětí. Mezní protažení DB je až desetinásobně větší než u prostého betonu.



Obr. 3 – Pracovní diagram v tahu drátkobetonu a prostého betonu

### 1.3.2.2. Používaný materiál a jeho dávkování

Charakteristickou složkou DB jsou ocelové drátky. Měly by být dostatečně dlouhé, měly by protínat celý prostor mezi zrny hrubé frakce kameniva, a zasahovat až za ně, aby se o tyto

zrna mohly opřít. Délka drátků je tedy závislá na množství a velikosti použité hrubé frakce kameniva. Ohybová tuhost drátků je další vlastnost, na kterou je kladen důraz. Musí být tak velká, aby si drátky při míchání, ukládání a zhutňování zachovaly svůj původní tvar. Drátky se vyrábí v mnoha tvarech, velikostech a pevnostech. Jsou přímé nebo tvarované z drátů tažených za studena, někdy se používají i ocelové třísky z obráběné oceli. Nejčastěji se používají drátky o délce 12 – 60 mm, štíhlostního poměru (poměr délky a průměru drátků) 60 – 100 u přímých a 45 – 80 u tvarovaných drátků.

Kamenivo v drátkobetonu by mělo být stejné jako kamenivo používané v osvědčených konstrukčních betonech. Betonová směs se navrhuje obdobně jako pro případ prostého betonu, jediný rozdíl je ve vodním součiniteli, který se v případě DB pohybuje maximálně kolem 0,4. Je tak zajištěno, aby se drátky ve směsi během výroby, zpracování a dopravy neshlukovaly ani neoddělovaly. Ke zlepšení zpracovatelnosti DB se používají plastifikační a ztékající přísady.

Dávkování by mělo být přibližně 20 až 50 kg.m<sup>-3</sup>. V tomto množství je směs stále dobře zpracovatelná. V některých případech, pro ještě větší pevnost v tahu při vzniku trhlin dosahuje množství drátku až 150 kg.m<sup>-3</sup>, ale směs je již velmi obtížně zpracovatelná. Ocelové drátky se dávkují v procentech objemu betonu a podle jejich tvaru.

- Přímé drátky – 0,8 – 1,8 % (v maltě 1,0 – 2,0 %)
- Tvarované drátky – 0,3 – 0,9 % (v maltě 0,5 – 1,0 %)

### **Ocelové vlákno Dramix RL 45/50 – BN (obr. 3)**

Kruhové, hladké za studena tažené ocelové vlákno pro standardní nároky se zahnutými konci. Volba štíhlostního faktoru zaručuje rychlé a jednoduché rozmíchání v betonu a dokonalé rozptýlení vláken.

Použití:

Silnice, venkovní betonové plochy, základy a opěrné zdi, průmyslové podlahy.

Technické parametry:

- Délka: 50 mm

- Tloušťka: 1 mm
- Poměr l/d: 50
- Pevnost v tahu: min 1050 N.mm<sup>-2</sup>
- Počet vláken v 1 kg: 2800 ks



Obr. 4 – Ocelové vlákno DRAMIX

### 1.3.3. Současný výzkum

Využívání DB v současné době stále roste a snahou projektantů i výrobců je použití tohoto materiálu co nejvíc rozšířit. Je tedy potřeba znát jeho skutečnou únosnost. Pro navrhování drátkobetonových konstrukcí neexistuje v současnosti žádná platná norma, a proto se chování materiálů s konkrétním množstvím drátků snaží odhalit odborníci ve specializovaných laboratořích. Cílem jejich studií je určení vhodných hodnot parametrů odpovídajících určitým typům drátkobetonu (různé množství drátků), které by se používaly na navrhování konstrukcí z tohoto materiálu.

### 1.3.4. Příklad použití drátkobetonu

#### Rekonstrukce prahu vrat hangáru letiště Ruzyně

Cíl aplikace DB: zlepšit fyzikálně mechanické vlastnosti betonu v rekonstruované části prahu, zmenšit pravděpodobnost výskytu smršťovacích trhlin



Datum realizace: 1998

Údaje o konstrukci: betonáž 25 cm vysokého základového prahu o šířce 2,5 m a délce 200 m rozdělené do 3 dilatačních celků

Složení DB směsi:  $45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  drátků Dramix, 1 kg polypropylenových vláken, maximální zrno kameniva 16 mm

Technologie výroby: výroba DB směsi v betonárně, zrání DB bez urychlování tvrdnutí

Doprava směsi: autodomíchávače, přímé přemístění směsi do bednění

Závěr: byla potvrzena možnost realizace DB vysokých fyzikálně-mechanických vlastností navzdory užití pouze běžného technologického vybavení

## **2. VLIV EXTRÉMNÍCH TEPLOT NA BETONY**

### **2.1. Terminologie**

#### **2.1.1. Požární odolnost**

Odolnost vyztuženého betonu proti požáru je definována jako její schopnost zachovat v případě požáru původní funkci betonu, udržet statické vlastnosti, ochránit ocelovou výztuž a chránit okolí před toxickými vlivy. Poškození betonu se nepovažuje za degradační mechanismus v důsledku požáru, ale za nehodu a vnější přímý vliv.

Mechanismy, které způsobují explozivní drolení nebo rozpad při požáru, nebyly zatím plně vysvětleny. Je však zřejmé, že nejdůležitějšími faktory jsou mikrostruktura materiálu a vlhkost betonu. Voda obsažená v betonu se při teplotě 100 °C mění na vodní páru. Když roste teplota, roste i tlak vodní páry v betonu. Pokud je mikrostruktura betonu otevřená, tzn. vysoký vodní součinitel, pára může unikat rychle, čímž se sníží její tlak. Pokud je beton hutnější, tlak vodní páry může dosáhnout vysokých hodnot (až 3 MPa) a v důsledku vysokého vnitřního tlaku dojde k odtržení malé vrstvy cementového kamene u povrchu betonu, které nazýváme explozivní drolení. Explozivní drolení je sledováno především u vysokohodnotného betonu. U běžného betonu explozivní drolení většinou nenastává, jelikož má otevřenější pórovitou strukturu.

#### **2.1.2. Ohnivzdornost**

Beton není hořlavý a odolává účinkům požáru lépe než ocel. Beton se v žádném případě nemůže samovolně vznítit a nepřispívá k dalšímu šíření požáru, neboť všechny jeho minerální složky jsou nehořlavé (nezapálí se) při teplotách běžně dosažených při požáru.

#### **2.1.3. Požární bezpečnost**

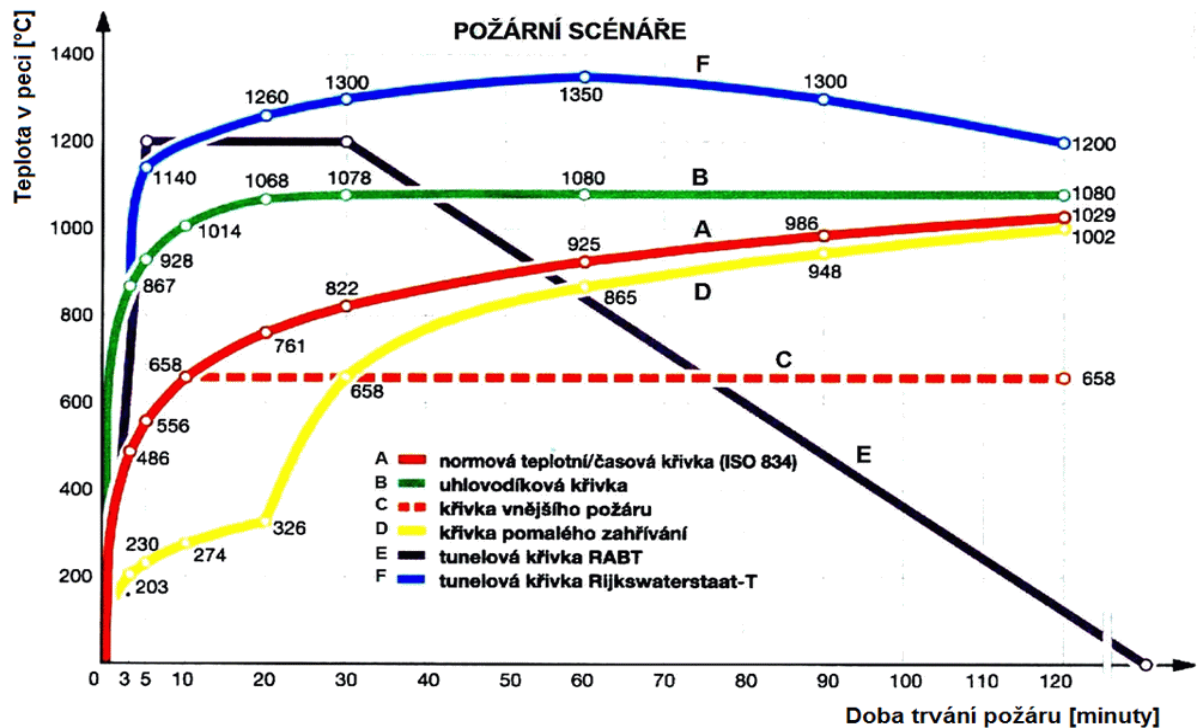
Požární bezpečností se rozumí souhrn organizačních, stavebních a technických opatření k zabránění vzniku požáru nebo výbuchu s následným požárem a k ochraně osob, zvířat a majetku v případě vzniku požáru a k zamezení jeho šíření.

## 2.2. Normové požadavky

Všechny základní požadavky na stavby a stavební výrobky vyjadřující obecný zájem jsou v ČR zapracovány do stavebního zákona (§ 156 ods.2 zákona č. 186/2006 Sb.) Cílem navrhovaných opatření je zaručit po určitou dobu stabilitu nosných, únosnost, celistvost a izolaci požárně dělících konstrukcí.

Zajištění požární bezpečnosti stavebního objektu se děje jednak pasivní požární ochranou, tj. správně navrženými konstrukcemi, a tzv. aktivními prostředky požární ochrany, což jsou technická požárně bezpečnostní zařízení (elektrické signalizace požáru a zařízení pro odvod kouře a tepla).

Spousta rozsáhlých požárů v tunelech ukázalo, že je potřeba brát požární scénář ještě vážněji. V Nizozemsku byly založeny „RWS“ požární křivky pro hodnocení pasivní ochrany materiálů v tunelech. RWS 98 představují nejvážnější uhlovodíkový oheň rychle přesahující 1200 °C a následnému vzestupu na 1350 °C po dobu 60 minut a poté pokles zpět na 1200 °C po dobu 120 minut ke konci křivky. 1350 °C = TÁNÍ BETONU! RWS scénář byl stanoven na základě Nizozemských zkušeností při požárech v tunelech. Je určen pro simulaci v tunelech s požárním zatížením 300 MW. RABT, německé požární křivky, představuje méně závažné požárové scénáře v tunelech, než křivky RWS.



Obr. 5 - Požární scénáře pro oblast požárního zkušebnictví

### 2.2.1. Aktuální normy pro odolnost betonu vůči vysokým teplotám

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

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

ČSN EN13501-1+A1 a 2: Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň

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

ČSN EN 73 0863: Požárně technické vlastnosti hmot. Stanovení šíření plamene po povrchu stavebních hmot

ČSN EN 73 0855: Stanovení požární odolnosti obvodových stěn

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

ČSN EN 2001-1-2 Eurokód 11: Obecné aspekty designu struktury vystavené působení ohně

ČSN EN ISO 1182: Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Zkouška nehořlavosti

ČSN EN ISO 11925-2: Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene

ČSN EN ISO 1716: Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stanovení spalného tepla

ISO 834-1:1999: Zkoušení požární odolnosti – Základy stavebnictví – Část 1: Všeobecné požadavky

## **2.3. Degradace betonů**

### **2.3.1. Charakteristika**

Beton je nehořlavý materiál, který pod vlivem teplot mění své vlastnosti. Chrání výztuž před žářem, která měkne a bortí se při teplotách kolem 450 °C. Účinek teplot závisí hlavně na složení betonu, hutnosti a homogenitě.

U betonů s křemičitým kamenivem se výrazně snižuje pevnost než u betonů s uhličitanovým kamenivem. Křemičité kamenivo snižuje pevnost již při teplotě 573 °C. Vznikají pukliny a trhliny, které mají za důsledek snížení pevnosti v tlaku až o 80 %. Betony s vápencem nebo expandovaným jílem ztrácejí při teplotách kolem 650 °C pouze 20 % své původní pevnosti.

Portlandský cement se vlivem působení teplot smršťuje. Při vyšších teplotách (nad 500 °C) probíhá dehydratace  $\text{Ca(OH)}_2$  na  $\text{CaO}$ . Smršťování je trvalé a vznikají trhlinky. Po ochlazení dochází k nové hydrataci  $\text{CaO}$ , což je doprovázeno růstem objemu a opět možností vzniku trhlinek.

Vodní součinitel nemá vliv na procentuální snížení pevnosti po vystavení betonu žáru, ale bylo potvrzeno, že beton s nižším vodním součinitelem si uchová vyšší pevnost i po vystavení žáru.

### **2.3.2. Běžné cementové betony**

Při požáru se teplota šplhá až na hodnotu 1200 °C, dochází při ní k celkové destrukci betonové konstrukce. V některých případech se potvrdilo, že dokonce pouze při teplotě 200 °C může dojít k explosivnímu odprýskávání betonu. Základní otázky teplotního vlivu na beton zahrnují komplexní identifikaci změn cementové matrice. Analýza se komplikuje tím, že cementový beton je kompozit složený ze dvou podstatně odlišných složek. Z cementového tmelu a kameniva. Různé druhy kameniva se liší svým mineralogickým složením. Když se minerály zahřejí, každý se charakterizuje jinými metamorfními změnami. Z tohoto vyplývá, že v konečném efektu se mění fyzikální, tepelné a mechanické vlastnosti. Explosivní odprýskávání bylo poprvé pozorováno v roce 1964 Harmatym, jenž se specializoval na běžné

betony. Tento jev se především pozoruje u betonů s vysokou hustotou a nízkou pórovitostí, což je typické pro Vysokohodnotné betony (HPC).

Působení extrémních teplot na betony má za následek postupné zhoršení kvality betonu. Betonové konstrukce vystavené extrémním teplotám se v důsledku tepelné deformace mohou zhroutit, nastává ztráta pevnosti celku, nebo ztráta pevnosti jednotlivých částí. Jedním z hlavních problémů betonů vystavených extrémním teplotám je tzv. spalling (odlupování). Je závislý na pevnosti betonu, zatížení a nárůstu teploty. Po přidání odpovídajících polypropylenových vláken do betonu při navrhování betonových konstrukcí bylo prokázáno snížení rizika odlamování betonu při zatížení extrémní teplotou.

Silniční a železniční tunely jsou vystaveny působení uhlovodíkových požárů v důsledku přenosu těkavých kapalin. Vzhledem k rychlému nárůstu teploty při uhlovodíkových požárech se výrazně zvyšuje i riziko odprýskávání betonu. V minulosti se staly nehody v tunelech s následkem požáru, při kterých došlo k již zmiňovanému odprýskávání betonu, a to i přes to, že požáry nebyly tak závažné.

### **2.3.2.1. Změny mechanických vlastností betonu vystaveného vysokým teplotám**

Vysoké teploty působí na beton v konstrukcích přechodně (požár) nebo trvale (pece, komíny). Bezpečnost a trvanlivost je závislá na tom, jakou pevnost má beton po dobu trvání žáru anebo jak se jeho pevnost změní žářem a ochlazením. Zajímají nás teploty od 300 °C do 1000 °C někdy až do 1300 °C. Vysoké teploty pevnost betonu zmenší, protože se tmel a kamenné složky žářem mění. Změny jsou různé podle složení použitého cementu a pevných složek, podle výše a doby žáru. Zahřívání betonu způsobuje různé pevnosti v tlaku betonu.

Tab. 1 – Přehled změn, ke kterým dochází v betonu při zahřívání

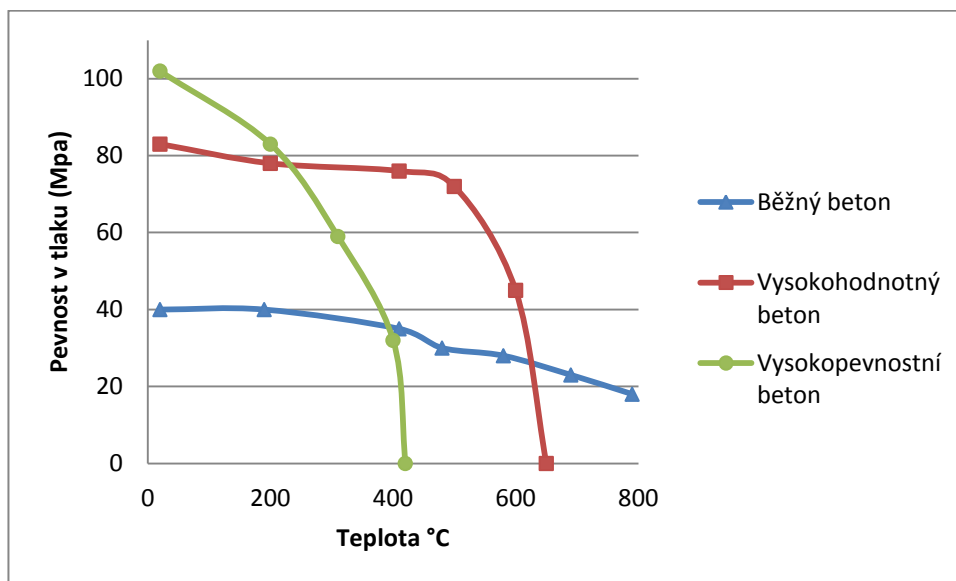
20- 80 °C	Pomalá ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti	Explosivní odprýskávání
100 °C	Zřetelné zvýšení propustnosti vody. 80-150 °C dehydratace etingitu, 150-170 °C rozklad sádry $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 171 °C tavení polypropylenových vláken, Počátek hydratace CSH gelu.	
200 °C	Ztráta fyzikálně vázané vody. Zvýšení vnitřního tlaku.	
300 °C	Praskání křemičitého kameniva (350 °C). Kritická teplota pro vodu (374 °C), poté už není možnost přítomnost volné vody.	
400 °C	Rozklad Portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	Výskyt trhlin
500 °C	Změna krystalové fáze z $\beta$ na $\alpha$ (573 °C) v kamenivu a písku	
600 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta - \text{C}_2\text{S}$	
700 °C	Rozklad uhličitanu vápenatého $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ Silná endotermická reakce, která je doprovázená uvolňováním oxidu uhličitého.	
800 °C	Začátek vzniku keramické vazby.	
1100-1200 °C	Tvorba Wollastonitu-metamorfovaný vápenec, $\beta$ ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{SiO}_2$ )	
1300 °C	Celkový rozklad betonu, tavení některých složek.	

### 2.3.3. Vysokohodnotné betony

V případě těchto betonů zabraňuje hutná mikrostruktura úniku páry při požáru. Pára vzniká odpařováním volné vody a vody z rozkládajících se fází CSH, CAH a Portlanditu CA. Pára je uzavřena v cementové matici a při růstu teploty nad 550 °C dosahuje tlak takových hodnot, že způsobuje odstřelování kousků betonů. Pokud je vystaven žáru beton s pevností 100 MPa, tlak vodní páry při 250 °C vzroste natolik, že beton začne odprýskávat a explodovat.

Ke kompletní destrukci dojde kolem 400 °C. Vysokopevnostních betonů (HSC) s pevností přes 100 MPa se dosahuje použitím superplastifikátorů (z důvodů snížení vodního součinitele) společně s použitím minerálních směsí.

Na následujícím obrázku (obr. 6) je ilustrován vliv původní pevnosti betonu na úbytku pevnosti betonu způsobený žářem. Jedná se o beton běžný, vysokohodnotný a vysokopevnostní, kde všechny obsahovaly uhličitánové kamenivo.



Obr. 6 - Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu

V některých případech experimentálního zkoumání betonu mělo význam přidání malého množství polypropylenových vláken. Snížilo se explozivní drolení při požáru. Mechanismy stojící za tímto pozitivním účinkem nejsou plně pochopeny. Podle vědců je možné dosáhnout vyšší pórovitosti, pokud se polypropylenová vlákna rozpustí při teplotě kolem 170 °C. Významnější účinek má propojení porézního systému po rozpuštění vláken, čímž materiál získá vyšší difuzivitu.

### 2.3.3.1 Explosivní odprýskávání betonu

Explosivní reakce je jedním z nejzajímavějších jevů. Dochází k ní vlivem vysokých teplot. Jedná se o tzv. spalling. Mezi hlavní faktory odprýskávání patří: snížená porozita cementové matrice, používané směsi s pucolánovou aktivitou a vlhkost převyšující 3 %. Projevuje se v úvodní fázi, zhruba 30 minutách požáru. Nastává prudké odlupování větších a menších částí betonu (plošný rozměr 100-300 mm<sup>2</sup>, v hloubce do 20 mm) z povrchové plochy. Kritičnost



tohoto jevu spočívá v jeho vysoké intenzitě, vedoucí ke vzniku hlubokých výmolů a redukcii průřezové plochy konstrukčních prvků.

### **3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Tato experimentální část přináší údaje z praktických měření zkušebních těles betonů vystavených extrémnímu teplotnímu namáhání v porovnání se zkušebními tělesy, které tomuto namáhání vystaveny nebyly. Obsahuje jednotlivé postupy prováděných prací. Výrobu těles, jejich zkoušení a vyhodnocení výsledků.

Zkušební tělesa byla vyrobena ze stejné betonové směsi, ale s různými příměsemi. Příměsi tvořily drátky a polypropylenová vlákna. Byla tedy vyrobena tělesa z prostého betonu, drátkobetonu a betonu vyztuženého polypropylenovými vlákny. Po vytvrdnutí byla polovina těles odebrána a vystavena extrémnímu teplotnímu namáhání v elektrické peci. Nakonec byla tělesa zkoušena jednoosou tlakovou zkouškou a trojbodovou zkouškou v tahu za ohybu. Z výsledků byly vyhodnoceny pevnosti jednotlivých betonů. Z rozměrů a hmotností byly také stanoveny objemové hmotnosti jednotlivých betonů.

#### **3.1. Výroba zkušebních těles**

Zkouška pevnosti v tlaku (krychelná) byla provedena na krychlích o hraně 150 mm, zkouška pevnosti v tahu za ohybu na trámečcích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm.

##### **3.1.1. Betonová směs**

Betonová směs nebyla vyrobena z jednotlivých složek přímo v laboratoři, ale byla dovezena již namíchaná betonová směs z betonárny Holcim Pardubice.<sup>2</sup>

Beton dle ČSN EN 206-1/Z3 tab. F.2 (životnost 100 let)

C25/30 – X0 – D<sub>max</sub> 22 mm – S1

##### **3.1.2. Betonová směs s drátky a polypropylenovými vlákny**

Jednotlivé směsi byly vyrobeny přidáním drátků nebo PP vláken do již vyrobené směsi z betonárny. Promíchání proběhlo v míchačce v laboratoři. Jednotlivá vlákna měla tendenci se shlukovat, ale při dostatečném promíchání se rovnoměrně rozmístila v celé matici.

---

<sup>2</sup> Betonárna Holcim Pardubice-Semtín, Semtín 102, 533 54 Pardubice, [www.holcim.cz](http://www.holcim.cz)

### 3.1.2.1. Drátky:

Ocelové vlákno Dramix RL 45/50 – BN, průměr 1 mm, délka 50 mm, štíhlostní poměr 50, pevnost 1050 MPa, hustota  $7850 \text{ kg.m}^{-3}$

Dávkování: 1% objemu betonové směsi

### 3.1.2.2. Polypropylenová vlákna

PP vlákna FIBRED, délka 40 mm, hustota  $910 \text{ kg.m}^{-3}$

Dávkování: 1 kg PP vláken na  $1 \text{ m}^3$  betonové směsi

### 3.1.3. Pomůcky

Lopata, zednická lžíce, formy (krychle, trámeček), vibrační stůl, míchačka kapacita 50 l, váha KERN de60k20, ocelové hladítko



Obr. 7 – Příklady použitých pomůcek (míchačka, váha KERN, forma)

### 3.1.4 Plnění forem

Naplnili jsme formu do jedné třetiny betonovou směsí a na vibračním stole zhutnili. Tento postup jsme opakovali celkem třikrát, až byla forma úplně plná. Horní plochu jsme uhladili ocelovým hladítkem. Provedli jsme tento postup pro všechny formy, všech druhů betonů.



Obr. 8 – Trámečková forma na vibračním stole

### 3.1.5. Vyrobená tělesa a jejich ošetřování

Zkušební tělesa byla po 7 dnech vyjmuta z forem a uložena do vodní nádrže po dobu 21 dní.

Byla vyrobena tělesa pro zkoušky pevnosti v tlaku a pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu pro každý typ betonové směsi. Přehled vyrobených těles je v následující tabulce (tab. 2).

	Krychle	Trámeček
Prostý beton	9	6
BVPV <sup>3</sup>	9	6
Drátkobeton	9	6

Tab. 2 – Počty zkušebních těles

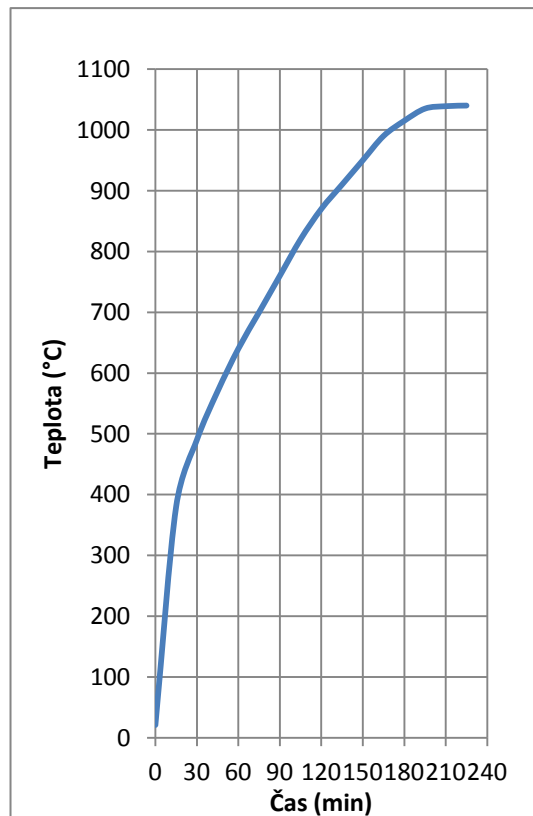


Obr. 9 – Vyrobená tělesa uložena ve vodní nádrži

<sup>3</sup> BVPV – Beton vyztužený polypropylenovými vlákny

### 3.2. Vystavení zkušebních těles extrémní teplotě

Polovina vyrobených zkušebních těles byla vystavena extrémnímu teplotnímu namáhání v elektrické peci. Předpokládaný průběh teploty měl být podle normové křivky – ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. Při zatěžování těchto těles bylo zjištěno, že elektrická pec instalovaná v laboratoři není schopna dosáhnout maximální požadované teploty ani očekávaného teplotního nárůstu za daný čas. Na obrázku (obr. 9) je znázorněna skutečná křivka nárůstu teploty v požadovaném čase, které bylo dosaženo v laboratorní peci.



Obr. 10 - Teplotní křivka

Zkušební vzorky byly vloženy do elektrické pece a po dobu 4 hodin vystaveny výše zmíněnému extrémnímu teplotnímu namáhání. Další fází bylo samovolné chladnutí. Po vychladnutí byly vzorky zváženy a následně podrobeny pevnostním zkouškám, které jsou popsány v následujících odstavcích.

#### 3.2.1. Elektrická pec

Zkušební tělesa byla zkoumána v elektrické peci těchto parametrů (obr. 10):

- Název: BVD-800/K
- Příkon: 49,2 KW
- Rozměry: 1300 x 1360 x 1860
- Objem: 0,65 m<sup>3</sup>



Obr. 11 – Elektrická pec BVD-800/K

### 3.2.2. Fotodokumentace zkušebních těles

Fotografie zkušebních těles po vytažení z pece, kde byla extrémně teplotně namáhána. Všechna tělesa degradovala. Tělesa z drátkobetonu dokonce teplotní namáhání nevydržela vůbec a pukla.



Obr. 12 – Tělesa z prostého betonu po extrémním teplotním namáhání



Obr. 13 – Drátobetón (vlevo) BVPV (vpravo) po extrémním teplotním namáhání



Obr. 14 – Zkušební tělesa z prostého betonu nevykazovala žádnou pevnost v tahu za ohybu

### **3.3. Měření**

#### **3.3.1. Rozměry a hmotnost**

Základní rozměry všech těles byly po ztvdnutí jednotlivých zkušebních vzorků změřeny posuvným měřítkem s přesností na 1 mm. Zároveň byla zvážena na váze KERN de60k20 s přesností na 20 g.

### 3.3.2. Jednoosá tlaková zkouška

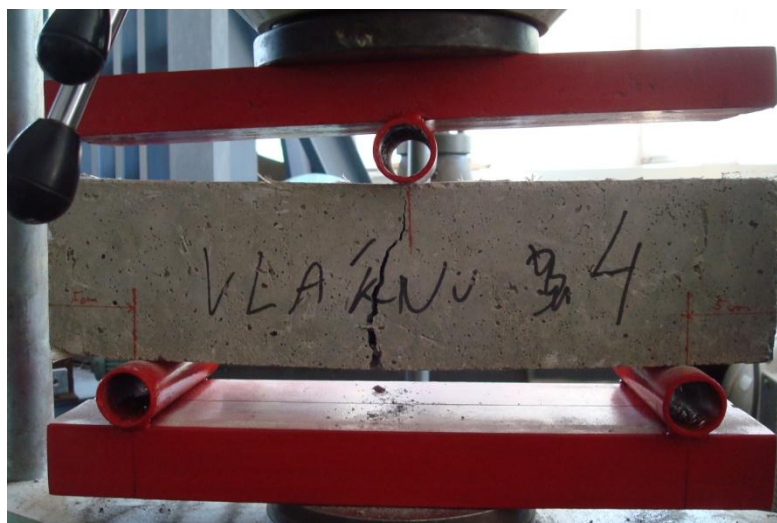
Zkouška provedena dle normy ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3 Pevnost v tlaku zkušebních těles. Jednoosá tlaková zkouška byla prováděna na přístroji Cyber – Tronic. Jako zkušební tělesa jsme použili krychli o hraně 150 mm. Způsob zatěžování byl definován konstantní rychlostí posunu  $0,5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 15 – Hydraulický lis Cyber-Tronic

### 3.3.3. Tříbodová zkouška tahu za ohybu

Zkouška provedena dle normy ČSN EN 12390-5 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5 Pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles. Zkouška byla prováděna na hydraulickém lisu s volným nárůstem zatěžovací síly. Jako zkušební tělesa jsme použili trámeč o rozměrech  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ . Účinná délka (vzdálenost spodních podpor) byla 300 mm. Vrchní podpora byla v polovině zkušební tělesa. Viz obr. 16.



Obr. 16 - Vzorek po ukončení zkoušky pevnosti tahu za ohybu



### 3.4. Vyhodnocování

#### 3.4.2. Statistika – aritmetický průměr, směrodatná odchylka

Spočítali jsme aritmetický průměr všech hodnot a směrodatnou odchylku pro danou skupinu měření. Následně byly vyřazeny všechny hodnoty, které se od průměru lišily o vyšší hodnotu, než je směrodatná odchylka. Poté byl opět spočítán aritmetický průměr ze zbylých hodnot, který charakterizuje výsledek daného měření.

#### 3.4.3. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost každého vzorku byla počítána jako podíl jeho hmotnosti a objemu. Objem byl spočítán součinem 3 rozměrů – šířky, výšky a délky. Jednotky jsou  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

#### 3.4.4. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla získána z jednoosé tlakové zkoušky jako podíl maximální dosažené síly a plochy průřezu. Plocha průřezu je součinem výšky a šířky. Hodnota je uvedena v jednotkách MPa.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

$f_c$  pevnost v tlaku (MPa)

$F$  maximální tlaková síla při porušení (N)

$A_c$  průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení ( $\text{mm}^2$ )

#### 3.3.6. Pevnost v tahu za ohybu

Za pevnost v tahu za ohybu bylo vzato maximální napětí dosažené při tříbodové zkoušce. Napětí bylo spočítáno jako podíl momentu a průřezového modulu.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{4} F \cdot l}{\frac{1}{6} b \cdot h^2}$$

$\sigma$  napětí (MPa)

$F$  maximální zatížení při porušení (N)

$l$  vzdálenost mezi podpěrami (mm)

$b, h$  rozměry příčného řezu tělesa (mm)

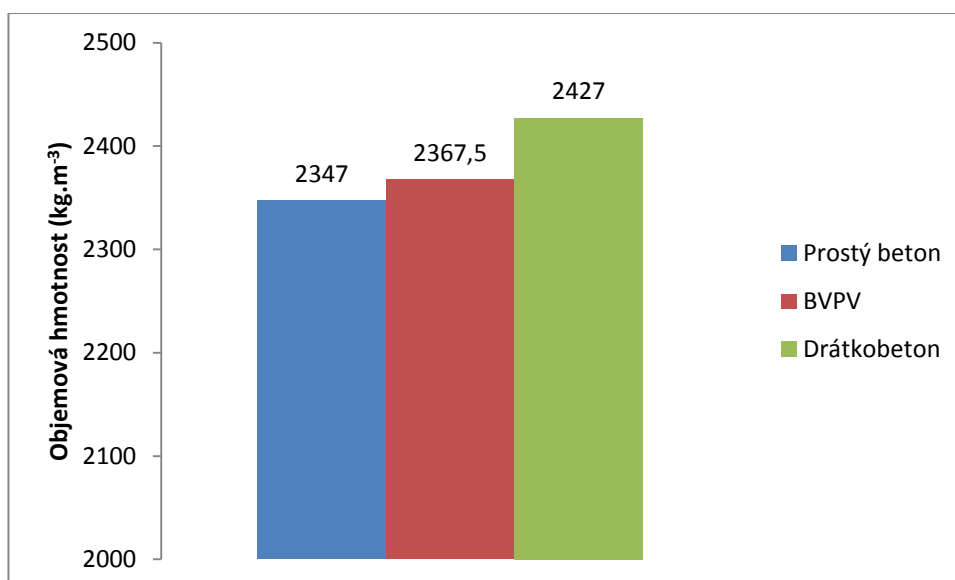
## 4. VÝSLEDKY

### 4.1. Bez působení extrémních teplot

#### 4.1.1. Objemová hmotnost

Tab. 3 – Objemová hmotnost těles jednotlivých druhů betonů

Teplota 21°C	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		
Vzorky č.	Prostý beton	BVPV	Drátkobeton
1	2334	2376	2441
2	2364	2364	2429
3	2346	2364	2417
4	2352	2368	2421
5	2348	2362	2419
6	2339	2371	2435
Aritmetický průměr	2347	2367,5	2427

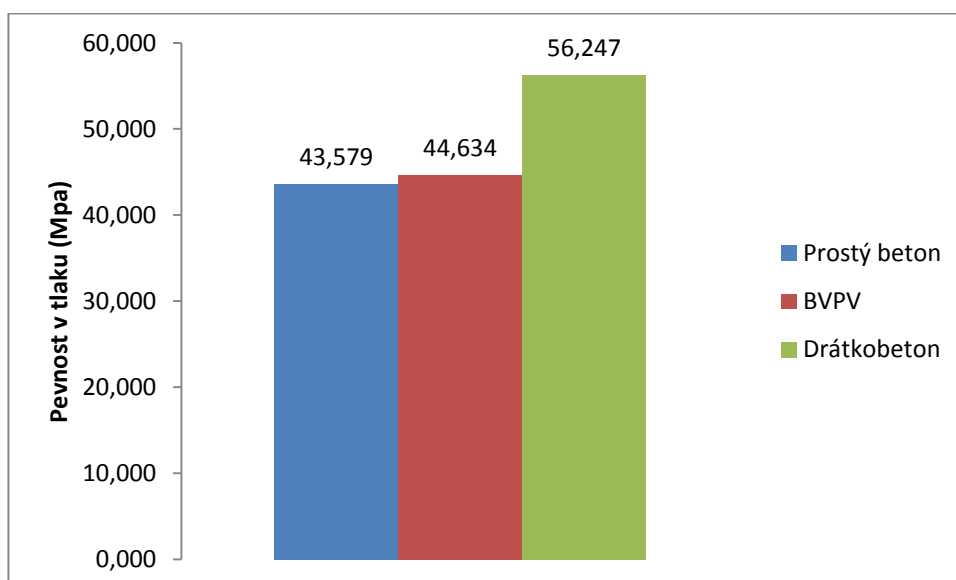


Obr. 17 – Objemová hmotnost těles jednotlivých druhů betonů

#### 4.1.2. Pevnost v tlaku

Tab. 4 - Pevnost v tlaku jednotlivých druhů betonů

Teplota 21°C	Napětí [MPa]		
	Vzorky č.	Prostý beton	Vláknobeton
1	44,658	41,61	55,729
2	44,311	49,092	59,461
3	41,769	43,2	53,551
Aritmetický průměr	43,579	44,634	56,247

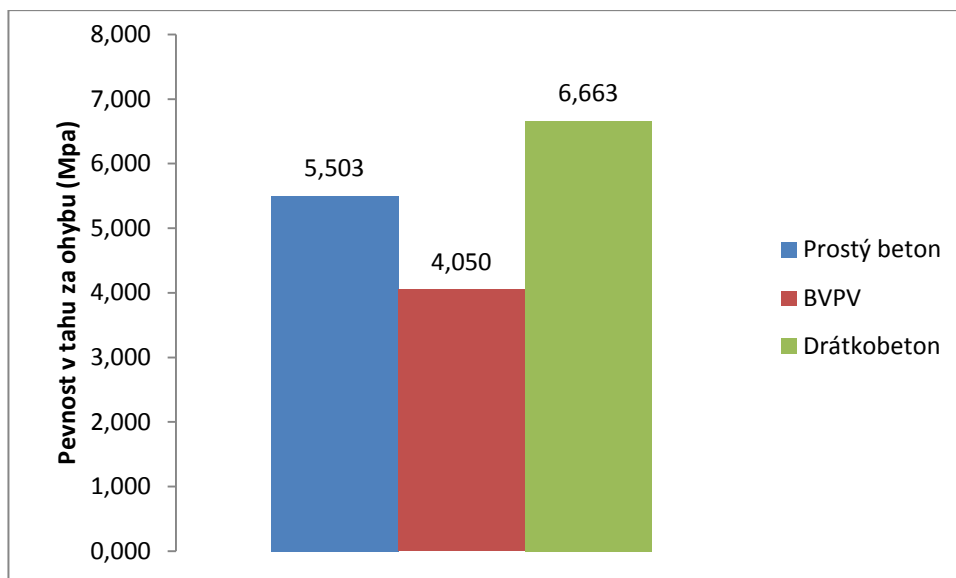


Obr. 18 Pevnost v tlaku jednotlivých druhů betonů

#### 4.1.3. Pevnost v tahu za ohybu

Tab. 5 – Pevnost v tahu za ohybu jednotlivých druhů betonů

Teplota 21°C	Napětí [MPa]		
	Vzorky č.	Prostý beton	BVPV
1	5,42	3,89	6,53
2	5,51	4,03	6,98
3	5,58	4,23	6,48
Aritmetický průměr	5,503	4,050	6,663



Obr. 19 – Pevnost v tahu za ohybu jednotlivých druhů beton

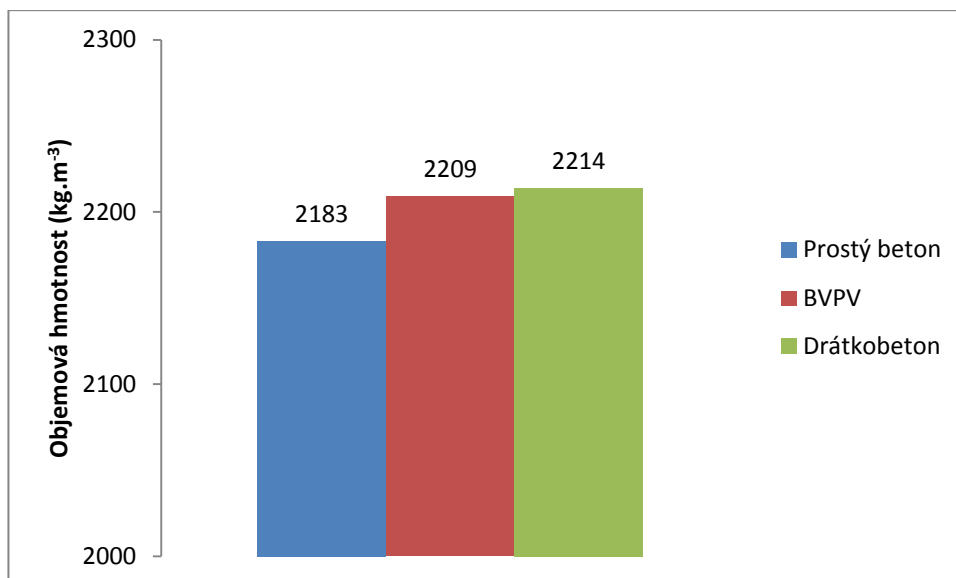
Výsledky zkoušek ukazují výrazně lepší chování betonu vyztuženého drátky 1 % podílem objemového množství betonu. Podle grafů zkoušek pevnosti tahu za ohybu a tlaku můžeme usoudit, že beton vyztužený pomocí drátků má pevnost větší až o 20 % oproti prostému betonu a BVPV. Mezi prostým betonem a BVPV se nám potvrdila teorie, že bude jen nepatrný rozdíl.

## 4.2. Působení extrémních teplot

### 4.2.1. Objemová hmotnost

Tab. 6 - Objemová hmotnost těles vystavených extrémním teplotám

Teplota 21°C	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		
	Vzorek č.	Prostý beton	BVPV
1	2195	2205	2214
2	2180	2201	2215
3	2186	2215	2225
4	2170	2209	2207
5	2192	2209	2211
6	2179	2213	2213
Aritmetický průměr	2183	2209	2214



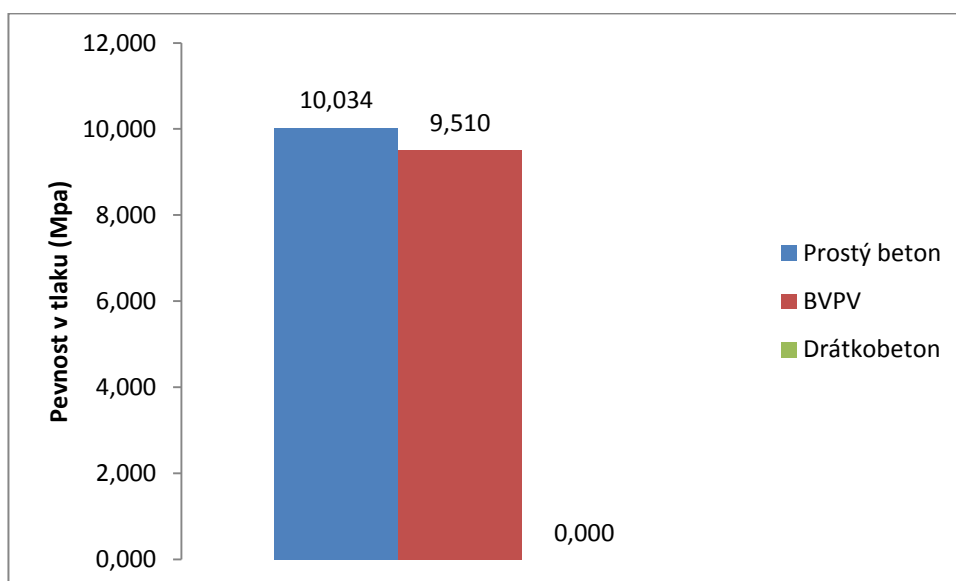
Obr. 20 – Objemová hmotnost těles vystavených extrémním teplotám

Z výsledků objemových změn můžeme vidět, že tělesa, která byla vystavena extrémním teplotám, mají přibližně o 7% menší objemovou hmotnost v každém druhu betonu. Což dokazuje vysokou přítomnost vlhkosti, a mohl to být jeden z důvodů tak velkého porušení těchto těles během extrémního namáhání.

#### 4.2.2. Pevnost v tlaku

Tab. 7 – Pevnost v tlaku těles vystavených extrémním teplotám

Teplota 21°C	Napětí [MPa]		
	Prostý beton	BVPV	Drátkobeton
Vzorky č.			
1	9,667	9,323	0
2	10,341	9,695	0
3	10,095	9,513	0
Aritmetický průměr	10,034	9,510	0,000

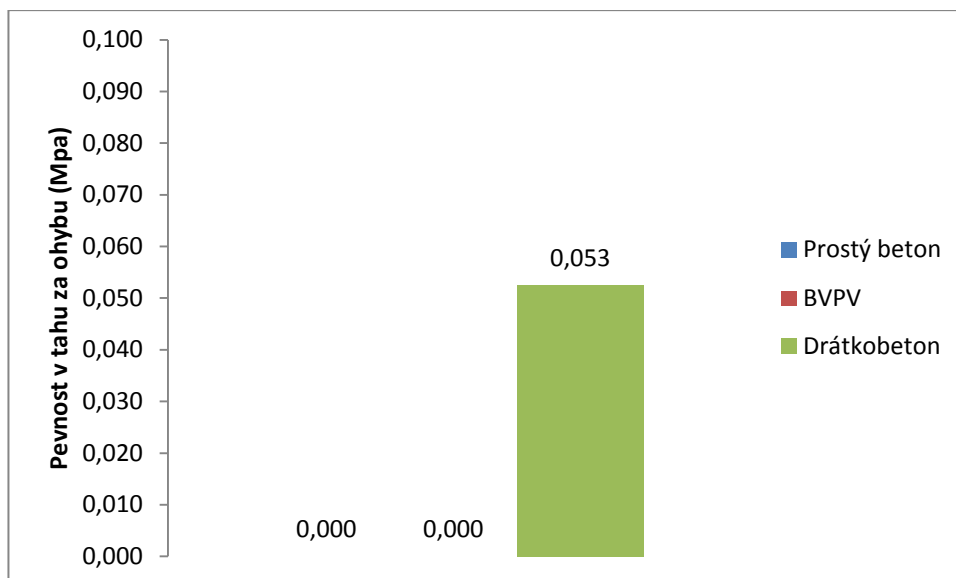


Obr. 21 – Pevnost v tlaku těles vystavených extrémním teplotám

#### 4.2.3. Pevnost v tahu za ohybu

Tab. 8 – Pevnost v tahu za ohybu těles vystavených extrémním teplotám

Teplota 21°C	Napětí [MPa]		
	Prostý beton	BVPV	Drátkobeton
Vzorky č.			
1	0	0	0,045
2	0	0	0,045
3	0	0	0,0675
Aritmetický průměr	0,000	0,000	0,053



Obr. 22 – Pevnost v tahu za ohybu těles vystavených extrémním teplotám

Výsledky zkoušek ukazují, že na tělesech vystavených extrémním teplotám není téměř co zkoušet. Na zkušebních tělesech z drátkobetonu pro zkoušení pevnosti v tlaku došlo dokonce k totální destrukci. Všechna tělesa z tohoto materiálu vlivem extrémní teploty pukla. Je ale zajímavé, že pro zkoušení pevnosti v tahu za ohybu vydržela naopak právě jenom tělesa z drátkobetonu. Z měření, které jsme mohli provést, vyplývá, že pevnost v tlaku prostého betonu a BVPV je přibližně o 75 % menší, než když tato tělesa nejsou vystaveny extrémním teplotám po dlouhou dobu. Porovnávat zkoušky pevnosti v tahu za ohybu nemá význam, jelikož naměřené hodnoty jsou tak malé, že na tělesech při pokusu provedení zkoušky dojde k okamžité destrukci.

## 5. ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na problematiku betonových kompozitních materiálů namáhaných extrémní teplotou. Pro orientaci je v úvodní části přehlednou formou uvedena terminologie a normové požadavky vztahující se k problematice betonových kompozitních materiálů. Další část analyzuje vliv extrémních vysokých teplot na jednotlivé druhy betonu.

V experimentální části jsme se snažili porovnat výsledky zkoušek pevností v tlaku a tahu za ohybu jednotlivých druhů betonu. Měli jsme k porovnání prostý beton, drátkobeton a beton vyztužený polypropylenovými vlákny. Výsledky dopadly, tak jak jsme předpokládaly, a jak je většinou uváděno v literatuře. Drátkobeton byl téměř o 20 % odolnější. Zbývající dva druhy betonu dopadly velmi vyrovnaně, v což jsme také doufali, jelikož polypropylenová vlákna údajně zvyšují pevnost v tlaku, ale ta narůstá jen o minimální hodnoty. Jinak jsou PP vlákna do betonů přidávána hlavně kvůli vlivům extrémních teplot.

Naším dalším cílem bylo zjistit dopady extrémního teplotního namáhání na betony. Zjistili jsme, že působení extrémních teplot na jakýkoliv druh betonu má katastrofální a ničivé účinky. Při působení na drátkobeton došlo k rozpadu celého tělesa. U BVPV a prostého betonu došlo ke snížení pevnosti v tlaku téměř o 75 %. Pevnosti v tahu za ohybu na těchto tělesech byly skoro neměřitelné. Na všech tělesech byly rozsáhlé trhliny. Z toho vyplývá, žádný druh z námi vyrobených betonů není schopen odolávat tak vysokému extrémnímu namáhání, jaké bylo nastaveno v elektrické peci.



## 6. SOUPIS BIBLIOGRAFICKÝCH CITACÍ

JIŘÍ KRÁTKÝ, KAREL TRTÍK, JAN VODIČKA. Drátkobetonové konstrukce. 1. Vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1999. ISBN 80-86364-00-3

JIŘÍ KOLÍSKO, Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylenových mikro a makro vláken na vlastnosti cementových malt a betonů. ISBN 978-80-01-04072

KAREL TRTÍK. Betonové konstrukce 1 – Technologie betonu. 2.vyd. ČVUT Praha, 2009. ISBN 978-80-0104-408-7

KOLEKTIV AUTORŮ. ČSN EN 12390-5 Oprava – Zkoušení ztvrdlého betonu – část 5, Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Oprava únor 2007. Český normalizační institut

KOLEKTIV AUTORŮ. ČSN EN 12390-3 - Zkoušení ztvrdlého betonu – část 3, Pevnost v tlaku zkušebních těles. Září 2002. Český normalizační institut

KOLEKTIV AUTORŮ. ČSN EN 12390-7 Oprava - Zkoušení ztvrdlého betonu – část 7, Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Oprava únor 2007. Český normalizační institut

KOLEKTIV AUTORŮ. ČSN EN 12390-1 Oprava - Zkoušení ztvrdlého betonu – část 1 Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. Oprava únor 2007. Český normalizační institut

KOLEKTIV AUTORŮ. ČSN EN 12390-2 - Zkoušení ztvrdlého betonu – část 2 Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Květen 2001. Český normalizační institut

A. JÍLEK, V. NOVÁK. Betonové stavitelství. Typové číslo L17-B3-V-31f/72096, Praha 1

A JÍLEK, L. GREŇČÍK, V.NOVÁK. Betonové stavitelství. Typové číslo L17-C3-V-41/78240, Praha 1

PYTLÍK P., Technologie, VUT Brno, 2000

LOPOUR P., Stavební materiály, skripta, DFJP, Upa

KOLEKTIV AUTORŮ. ČSN 73 1201, Navrhování betonových konstrukcí. Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření.

BECHYNĚ, S. Betonové stavitelství, Technologie betonu a stavebních, SNTL Praha, 1954

SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv, New generation cement concretes – Ideas, Design, Technologz and Application, 1. Vydání Košice, červen 2008, 156 str. ISBN 978-80-553-0040-5

KODUR, V.K.R. Designing Concrete Structures for fire Safety, American Concrete Institute, 2008, ISBN: 978-0-87031-291-5

<http://www.cideas.cz/>

<http://www.krampeharex.cz>

<http://www.fce.vutbr.cz/PST/bstud/BH11/pozarod.pdf>

<http://www.ebeton.cz>

## 7. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Přehled změn, ke kterým dochází v betonu při zahřívání.....	30
Tab. 2 – Počty zkušebních těles.....	35
Tab. 3 – Objemová hmotnost těles jednotlivých druhů betonů.....	41
Tab. 4 - Pevnost v tlaku jednotlivých druhů betonů.....	42
Tab. 5 – Pevnost v tahu za ohybu jednotlivých druhů betonů.....	42
Tab. 6 - Objemová hmotnost těles vystavených extrémním teplotám.....	43
Tab. 7 – Pevnost v tlaku těles vystavených extrémním teplotám.....	44
Tab. 8 – Pevnost v tahu za ohybu těles vystavených extrémním teplotám.....	45

## 8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Polypropylenová vlákna .....	18
Obr. 2 – Pracovní diagram v tlaku drátkobetonu a prostého betonu .....	21
Obr. 3 – Pracovní diagram v tahu drátkobetonu a prostého betonu .....	21
Obr. 4 – Ocelové vlákno DRAMIX.....	23
Obr. 5 - Požární scénáře pro oblast požárního zkušebnictví.....	27
Obr. 6 - Vliv teploty na ztrátu pevnosti betonu .....	31
Obr. 7 – Příklady použitých pomůcek (míchačka, váha KERN, forma) .....	34
Obr. 8 – Trámečková forma na vibračním stole .....	35
Obr. 9 – Vyrobena tělesa uložená ve vodní nádrži .....	35
Obr. 10 - Teplotní křivka .....	36
Obr. 11 – Elektrická pec BVD-800/K .....	37
Obr. 12 – Tělesa z prostého betonu po extrémním teplotním namáhání .....	37
Obr. 13 – Drátkobeton (vlevo) BVPV (vpravo) po extrémním teplotním namáhání .....	38
Obr. 14 – Zkušební tělesa z prostého betonu nevykazovala žádnou pevnost v tahu za ohybu	38
Obr. 15 – Hydraulický lis Cyber-Tronic.....	39
Obr. 16 - Vzorek po ukončení zkoušky pevnosti tahu za ohybu .....	39
Obr. 17 – Objemová hmotnost těles jednotlivých druhů betonů .....	41
Obr. 18 Pevnost v tlaku jednotlivých druhů betonů .....	42
Obr. 19 – Pevnost v tahu za ohybu jednotlivých druhů beton .....	43
Obr. 20 – Objemová hmotnost těles vystavených extrémním teplotám .....	44
Obr. 21 – Pevnost v tlaku těles vystavených extrémním teplotám.....	45
Obr. 22 – Pevnost v tahu za ohybu těles vystavených extrémním teplotám .....	46

## **9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

BVPV – Beton Vyztužený Polypropylenový Vlákny

DB – Drátkobeton

PP – Polypropylen

HPC – High Performance Concrete (vysokohodnotný beton)

HSC – High Strength Concrete (vysokopevnostní)

RWS - Rijkwaterstaat