

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

### **METODY MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ BETONU PŘI VYSOKÝCH TEPLOTÁCH**

Mechanical Properties of Concrete at Elevated  
Temperatures – Test Methods

Autor: Bc. Filip Rochelt

Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Konzultant: Ing. Josef Novák, Ph.D.

2018

# Zadání



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Rochelt	Jméno: Filip	Osobní číslo: 423847
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Metody měření mechanických vlastností betonu při vysokých teplotách	
Název diplomové práce anglicky: Mechanical Properties of Concrete at Elevated Temperatures – Test Methods	
Pokyny pro vypracování: Rešerše literatury. Spolupráce na experimentech. Vyhodnocení experimentů. Závěr.	
Seznam doporučené literatury: GUO, Zhenhai a Xudong SHI. Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-0-12-386962-3. ČSN EN 12390-1. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. Únor 2013 Compressive strength for service and accident conditions. Materials and Structures. 1995, 28(7), 410–414.	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: // 10. 10. 2018	Termín odevzdání diplomové práce: 6. 1. 2019 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

10. 10. 2018	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

---

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Radka Štefana, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 6. 1. 2019

.....  
Bc. Filip Rochelt

---

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za trpělivost, podporu a cenné rady, které mi udělil při zpracovávání této práce. Dále děkuji Ing. Martinovi Benýškovi za konzultace a v neposlední řadě děkuji Ing. Josefu Novákovi, Ph.D., za odborné konzultace a umožnění zúčastnit se zajímavých experimentů spojených s touto prací. Nakonec bych poděkoval rodičům, přátelům a mým blízkým, kteří mě vždy rádi podpořili.

Práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR, v rámci projektu GA17-23067S.

V Praze, dne 6. 1. 2019

.....  
Bc. Filip Rochelt

---

## Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na různé metody měření mechanických vlastností betonu při zvýšených teplotách a je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. V úvodu teoretické části jsou popsány mechanické vlastnosti různých druhů betonu za běžné i zvýšené teploty. Dále je popsána problematika měření mechanických vlastností za zvýšené teploty a měření reziduálních vlastností. Jsou zde vyzdvíženy doporučení unie RILEM a možnost použití českých technických norem. Na konci teoretické části je práce věnována zkušebnímu zařízení a všech jeho součástí. Tedy systému pro ohřívání a ochlazování vzorku, systému zatěžování a způsobu měření jednotlivých veličin. Praktická část sestává z dvou experimentů. První experiment se věnuje zkoušení tlakové pevnosti různých druhů betonu za zvýšené teploty. Experiment druhý se zaměřuje na zkoušení reziduální pevnosti v tlaku různých druhů betonu. Dále je ukázán rozdíl mezi různými rychlostmi ohřevu betonu a porovnání reziduální zkoušení se zkoušením za tepla.

### Klíčová slova

Pevnost v tlaku, pevnost v tahu, modul pružnosti, pracovní diagram, beton, vláknobeton, provzdušněný beton, mechanické vlastnosti, zvýšená teplota, zkušební metody, experiment

## Abstract

This thesis is focused on test methods of mechanical properties of concrete at elevated temperatures. The thesis is divided into two parts – theoretical and practical part. The theoretical part is focused on the description of mechanical properties of concrete at elevated temperatures and its test methods. It also describes recommendations of RILEM and possibility of using Czech technical standards. The end of the theoretical part is focused on testing device and its components such as system of heating and cooling, system of loading the specimen and system for measuring and recording data. In the practical part there are two experiments. First experiment focuses on compressive strength of different concrete types at elevated temperature. On the other hand, second experiment deals with residual compressive strength of different types of concrete. Also it shows differences between various heating rates of concrete and the differences between residual and hot state testing of concrete.

### Keywords

Compressive strength, tensile strength, Young's modulus, stress-strain diagram, concrete, fibre-reinforced concrete, air-entrained concrete, mechanical properties, elevated temperature, test methods, experiment

---

# Obsah

<b>Zadání</b>	<b>I</b>
<b>Prohlášení</b>	<b>II</b>
<b>Poděkování</b>	<b>III</b>
<b>Abstrakt</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>VI</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Mechanické vlastnosti betonu	1
<b>2 Metody měření mechanických vlastností</b>	<b>7</b>
2.1 Rozměry zkušebních těles	7
2.2 Doporučení RILEM TC-129-MHT	8
2.3 Měření pevnosti v tlaku	9
2.4 Měření pevnosti v tahu	11
2.5 Měření modulu pružnosti	14
<b>3 Zkušební zařízení</b>	<b>18</b>
3.1 Systém pro ohřívání a ochlazování vzorku	18
3.2 Systém pro zatížení vzorku	19
3.3 Systém pro měření a záznam naměřených hodnot	20
<b>4 Experiment 1 – pevnost v tlaku za zvýšené teploty</b>	<b>23</b>
4.1 Příprava vzorků	27
4.2 Průběh experimentu	28
4.3 Výsledky experimentu	31
4.4 Závěr experimentu	34
<b>5 Experiment 2 – reziduální pevnost v tlaku</b>	<b>35</b>
5.1 Ohřev vzorků	36
5.2 Průběh experimentu	40
5.3 Výsledky experimentu	41
5.4 Závěr experimentu	45
<b>6 Závěr</b>	<b>47</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>50</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>52</b>
<b>Literatura</b>	<b>53</b>

---

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Latinské symboly

$E_{\theta}$	Modul pružnosti za zvýšené teploty	MPa
$f_{ck}$	Charakteristická pevnost betonu v tlaku	MPa
$f_{c,\theta}$	Pevnost betonu v tlaku při dané teplotě	MPa
$f_{ck,t}$	Charakteristická pevnost betonu v tahu	MPa
$f_{ck,t,\theta}$	Pevnost betonu v tahu při dané teplotě	MPa

### Řecké symboly

$\varepsilon_c$	Tlakové přetvoření betonu	-
$\sigma_c$	Tlakové napětí v betonu	MPa
$\theta$	Teplota	°C

### Zkratky

PP	Polypropylen
EC	Eurokód (myšlen Eurokód 2: Část 1-2)
NSC	Normal strength concrete – běžný beton
HSC	High strength concrete – vysokopevnostní beton

# 1 Úvod

Tato práce navazuje na předchozí seminární práci [1], která byla vypracována v rámci předmětu Diplomový seminář.

Beton je často používaný stavební materiál zejména pro jeho četné výhody. Mezi ně patří vysoká pevnost, trvanlivost, snadnost prefabrikace a nehořlavost. Betonové stavební konstrukce musí splnit i požadavky na požární odolnost. Důvodem je četnost požárů. Požár je totiž jeden z nejčastějších mimořádných scénářů, kterým může být konstrukce ohrožena. Pro návrh betonových konstrukcí je tedy nutné znát jeho mechanické vlastnosti.[2]

Mechanické vlastnosti materiálů se zjišťují při různých podmínkách pro to, aby bylo možné jejich vlastnosti matematicky vyjádřit a poté díky matematickému modelu předpovídat jejich budoucí chování za těchto podmínek. Díky znalosti mechanických vlastností materiálu lze provádět statické výpočty. Pokud dokážeme popsat chování materiálu i za zvýšené teploty, pak lze navrhovat budovy i na účinky požáru.

Měření mechanických vlastností za běžné teploty je dnes běžné a v národních normách lze najít unifikovaný postup pro měření dané vlastnosti. Také se dá na trhu najít zařízení určené pro tato měření.

To bohužel neplatí o měření mechanických vlastností za zvýšené teploty. Konkrétně pro betonové prvky v České republice neexistuje žádný právní předpis, který by stanovil postup pro měření mechanických vlastností betonu při zvýšené teplotě. Nicméně Eurokód 2: Část 1-2 [3] alespoň stanovuje redukční součinitele pro vyjádření mechanických vlastností v závislosti na teplotě. Tyto redukční součinitele ovšem platí pouze pro prostý beton. Pro drátkobeton a beton vyztužený polypropylenovými vlákny je třeba zjišťovat vlastnosti ze zahraničních publikací nebo z vlastního experimentu.

Měření mechanických vlastností betonu při zvýšené teplotě navíc znesnadňuje právě zvýšená teplota. Asi největším problémem je zajištění rovnoměrného ohřátí vzorku a udržení této teploty při procesu zkoušení.

## 1.1 Mechanické vlastnosti betonu

*„Mechanické vlastnosti udávají vztah mezi mechanickým namáháním a odporem, který materiál účinkům tohoto namáhání vzdoruje“*[4]. Podrobněji se dělí na vlastnosti přetvárné a vlastnosti pevnostní. Mezi pevnostní vlastnosti patří pevnost v tlaku, pevnost v tahu, pevnost v příčném tahu a pevnost v ohybu. Přetvárné vlastnosti vyjadřuje pracovní diagram a modul pružnosti.



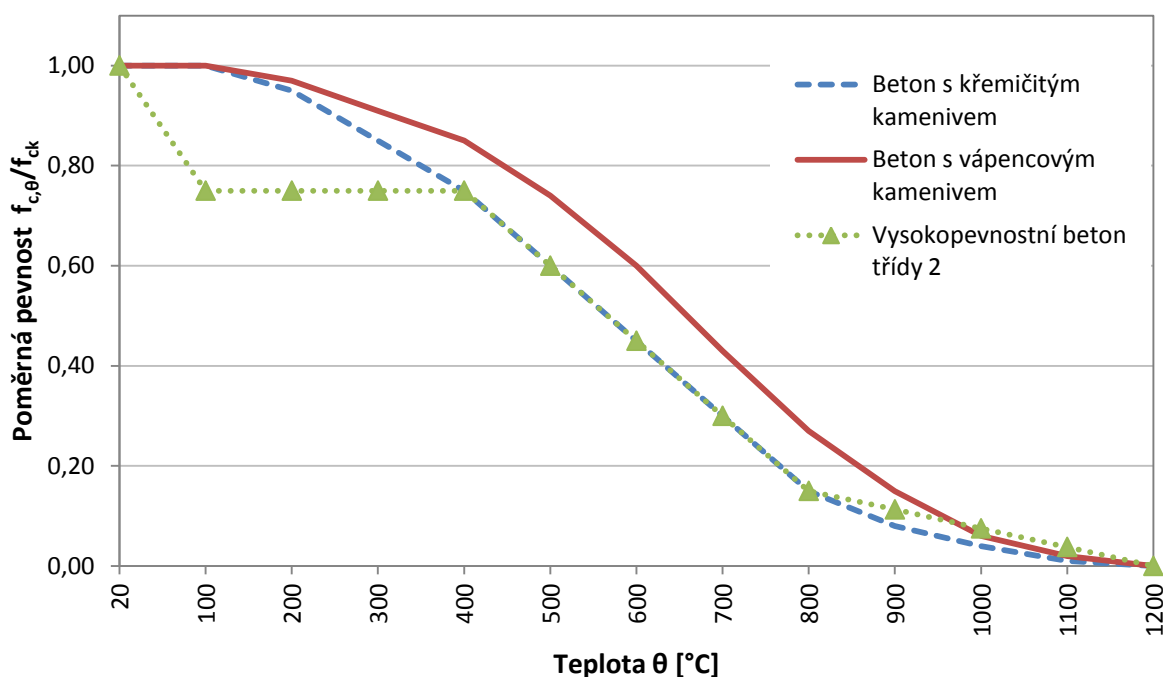
## a) Pevnost v tlaku

Tlaková pevnost betonu je závislá na jeho složení. Zásadní vliv má zejména podíl kameniva v betonu a pevnostní třída použitého cementu. Pevnost v tlaku běžného betonu může být až  $60 \text{ MPa}^1$ . Beton s vyšší tlakovou pevností se nazývá vysokopevnostní.

Teplota má výrazný vliv na tlakovou pevnost betonu. Při zahřátí betonu na teplotu  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  se jeho pevnost mírně zvýší díky vysušování betonu vlivem odpařování volné a částečně i fyzikálně vázané vody. Beton neztrácí svoji původní pevnost ani při ohřátí na  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při dalším ohřívání přibližně na  $400\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$  dochází k uvolňování chemicky vázané vody v podobě páry, která způsobuje uvolňování vazeb. Dochází ke snižování pevnosti betonu. Při dalším ohřívání stále klesá pevnost běžného betonu. U žáruvzdorných betonů se pevnost při  $800\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$  nepatrně zvyšuje. Při dosažení  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  dochází k tavení některých složek betonu a při  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  dochází k celkovému tavení betonu. Při těchto teplotách je pevnost betonu téměř nulová. [5]

Vliv na rychlost poklesu pevnosti má použitý druh kameniva. Beton s vápencovým kamenivem odolává teplotám lépe než beton s křemičitým kamenivem (viz Obr. 1).

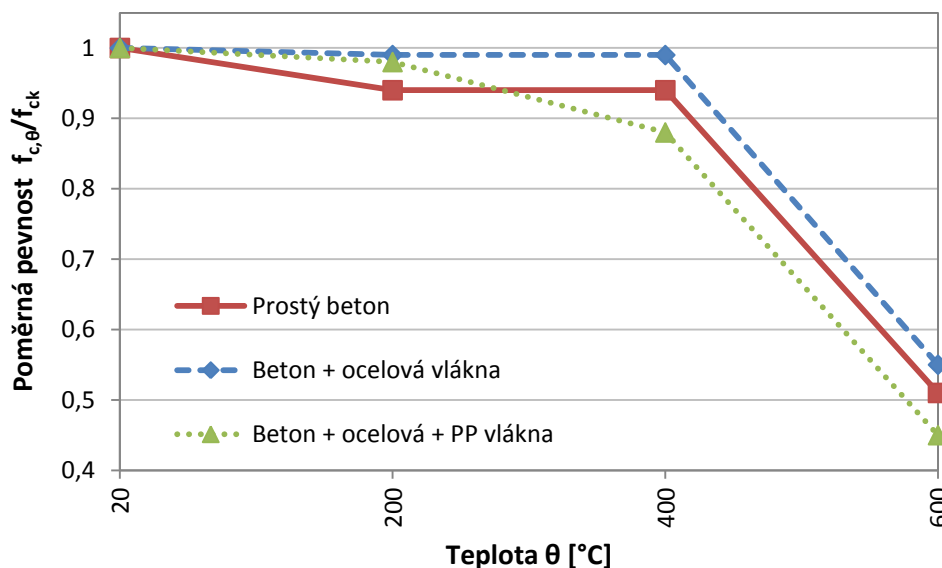
Lze předpokládat, že beton, jehož teplota nepřesáhla  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , získá z ovzduší opět téměř původní vlhkost a jeho pevnost se ustálí na přibližně 90 % původní hodnoty.[6]



Obr. 1 – Pevnost betonu v tlaku v závislosti na teplotě a použitém kamenivu. Hodnoty převzaty z [3].

<sup>1</sup> Myšlena charakteristická pevnost na krychli o hraně 150 mm (tedy beton třídy C 50/60).

Eurokód 2: Část 1-2 [3] doporučuje použití polypropylenových vláken v betonu pro zlepšení chování při požáru. Vlákná omezují odštěpování betonu způsobující oslabení průřezu, které může mít za následek i kolaps konstrukce. Při požáru totiž polypropylenová vlákna vyhoří a umožní tak průchod vlhkosti, která je vytlačována z konstrukce. Současně z důvodu vyhoření polypropylenových vláken se zvyšuje pórovitost betonu. To má za následek mírné snížení pevnosti v tlaku. (viz Obr. 2).[7]



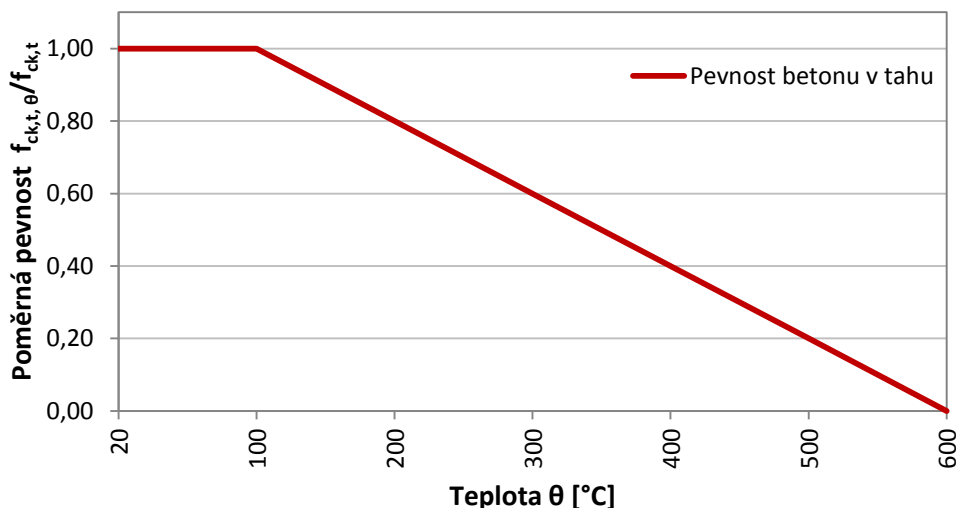
Obr. 2 – Tlaková pevnost různých betonových kompozitů v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [8].

## b) Pevnost v tahu

Pevnost betonu v tahu za běžné teploty nabývá přibližně jedné desetiny pevnosti betonu v tlaku. Proto se betonové konstrukce nenamáhají prostým tahem. Tahová pevnost v ohybu se nejčastěji řeší vyztužením betonářskou výztuží.

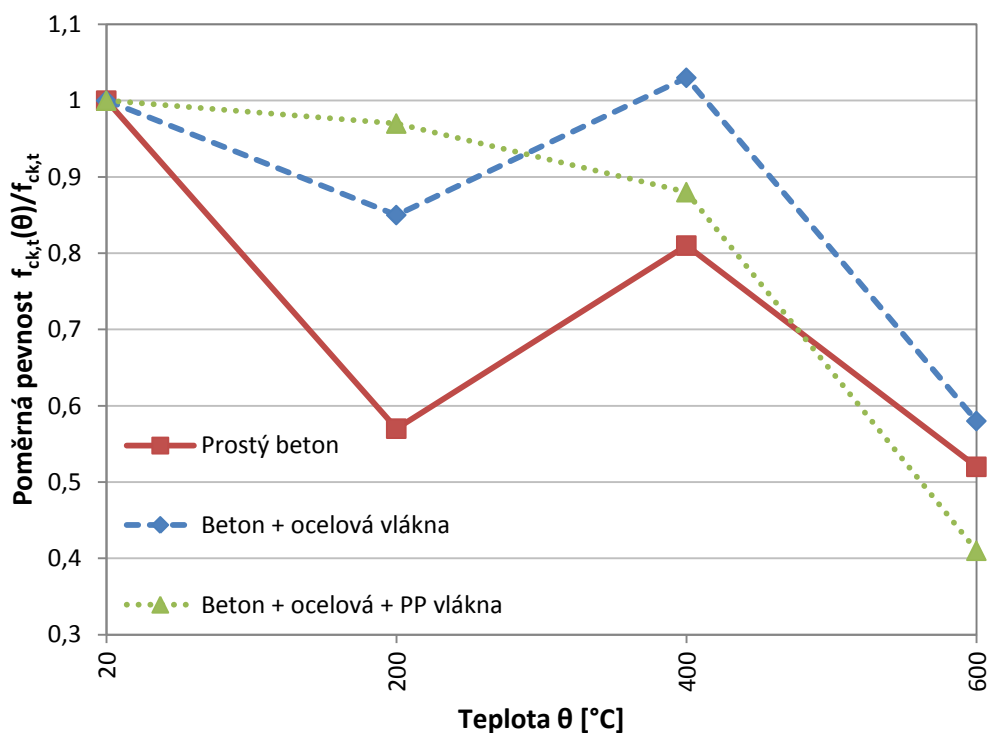
Vliv teploty na tahovou pevnost betonu je velice podobný jako u pevnosti v tlaku. V Eurokódu 2: Části 1-2 [3] je vyjádřen vliv teploty na tahovou pevnost betonu jednoduše (viz Obr. 3 na další straně). Předpokládá se, že vliv teploty do 100 °C na tahovou pevnost je nulový. Poté tahová pevnost lineárně klesá až do 600 °C, kdy už se předpokládá nulová.

Při použití polymerových vláken v betonu se zvyšuje houževnatost betonu a omezuje se vznik trhlin. Nicméně pokud se použijí pouze polypropylenová vlákna, pak se pevnost v tahu výrazně nemění [9]. Pro zvýšení tahové pevnosti je třeba přidat ocelová vlákna.



Obr. 3 – Pevnost betonu v tahu v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [3].

Na Obr. 4 jsou výsledné hodnoty z experimentu J.Nováka, kde byl zkoušen prostý beton, beton s ocelovými vlákny a beton vyztužený ocelovými i polypropylenovými vlákny. U pevnosti v tahu při teplotě 200 °C je nižší hodnota než při 400 °C. Stalo se tak kvůli odštěpení betonu při zkoušení vzorků. Díky polypropylenovým vláknům tento jev u třetího vzorku nenastal.[8]

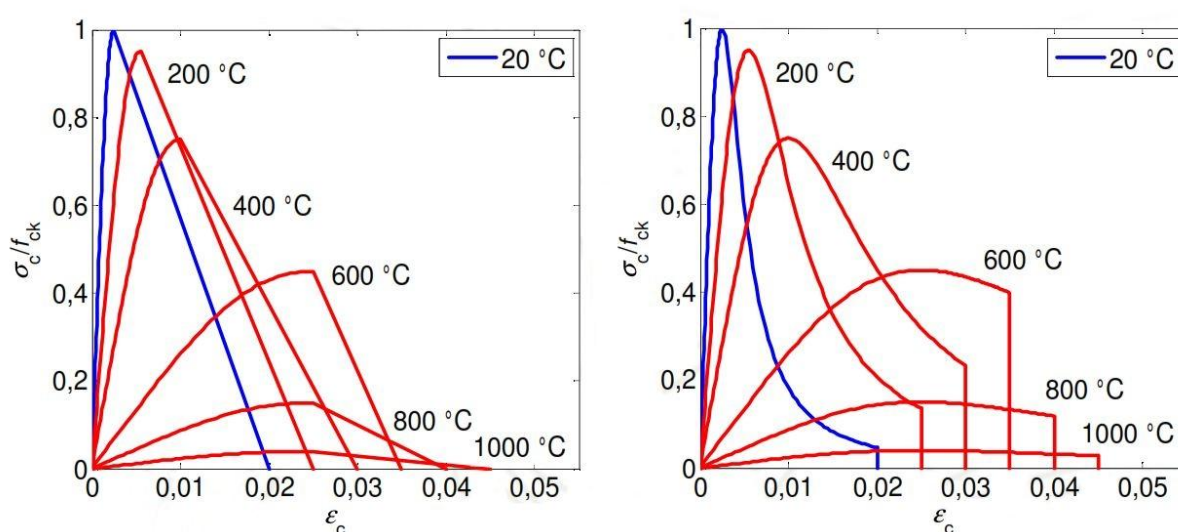


Obr. 4 – Tahová pevnost různých betonových kompozitů v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [8].

### c) Pracovní diagram

Mechanická odolnost betonu se často vyjadřuje pracovním diagramem, jehož hodnoty lze použít ve výpočetních modelech. Pracovní diagram vyjadřuje deformační chování betonu při účinku napětí. Vzhled pracovního diagramu betonu je nejvíce ovlivněn vlastní tlakovou pevností.[2]

Pracovní diagram betonu při zvýšené teplotě se snižuje a prodlužuje s rostoucí teplotou. Vliv na to má hlavně pokles tlakové pevnosti betonu a rostoucí duktilita<sup>2</sup>. Běžný i vysokopevnostní beton má v pracovním diagramu vždy téměř lineární rostoucí větev na začátku. V blízkosti nejvyššího napětí nastává parabolický přechod do prudce klesající větve na konci vlivem porušení betonu. Obecně lze říci, že vysokopevnostní beton oproti běžnému má strmější a lineárnější rostoucí i klesající větev.[2]



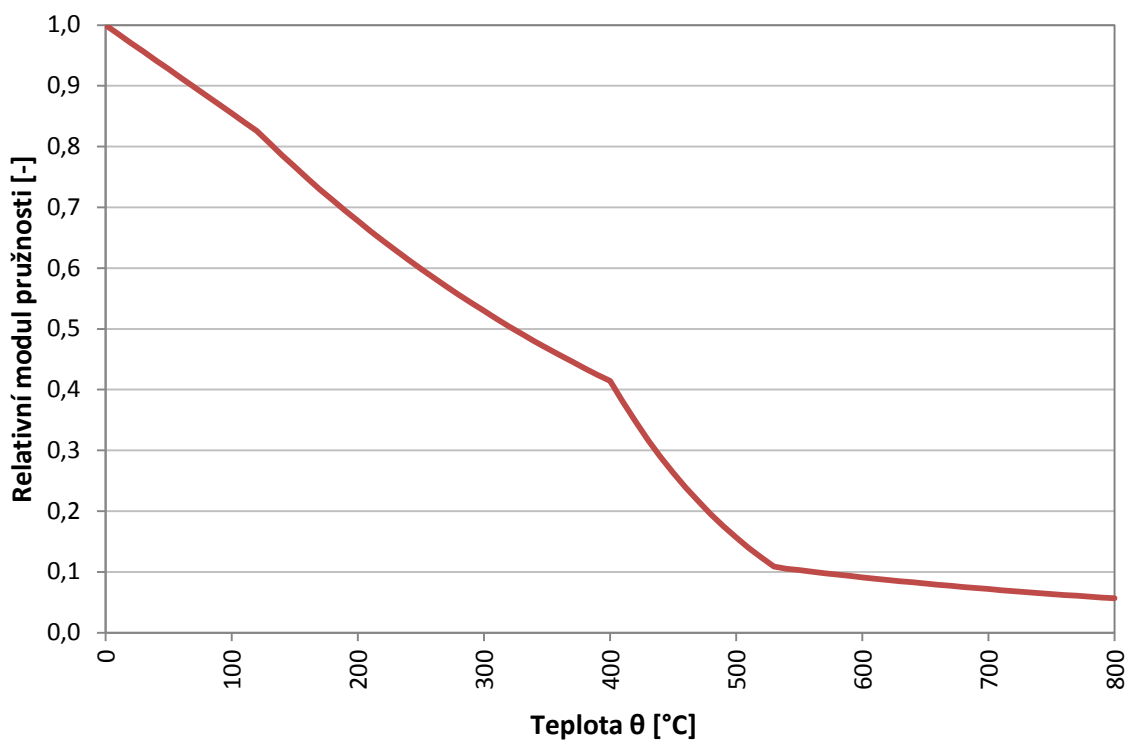
Obr. 5 – Pracovní diagram běžného betonu při různých teplotách. Vlevo lineární model sestupné větve, vpravo nelineární model sestupné větve [10].

<sup>2</sup> Duktilita znamená tažnost, tvárnost, houževnatost

### d) Modul pružnosti

Modul pružnosti betonu při běžné teplotě dosahuje hodnot 5–35 GPa. Závisí hlavně na vodním součiniteli, stáří betonu, způsobu ošetřování a na podílu přírodního kameniva.[2]

Hodnota modulu pružnosti betonu s rostoucí teplotou prudce klesá (viz Obr. 6). Zda je použito v betonu křemičité nebo vápencové kamenivo má zanedbatelný vliv na modul pružnosti.[2]



Obr. 6 – Modul pružnosti betonu v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [11].

## 2 Metody měření mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti betonu se mohou měřit při ohřátí vzorku na požadovanou teplotu („hot state testing“) nebo lze z této teploty beton opět ochladit na běžnou teplotu. V tom případě se zkouší tzv. reziduální vlastnosti betonu („residual testing“).

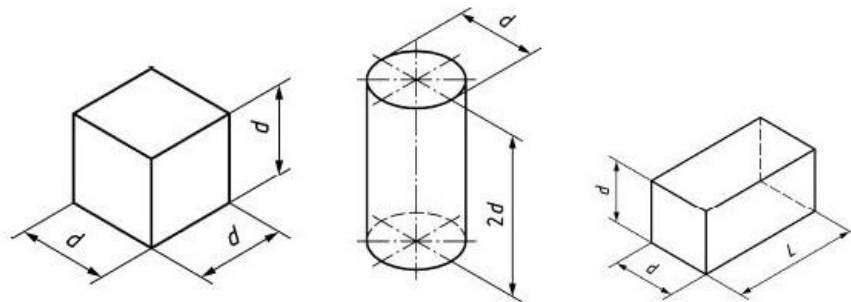
Z hlediska náročnosti je nejjednodušší zkoušet reziduální vlastnosti betonu. Při zkoušení reziduálních vlastností se betonový vzorek ohřeje na požadovanou teplotu a poté se nechá zchladnout na běžnou teplotu, při které se vzorek zkouší. Veškeré operace se vzorkem jsou prováděny za běžné teploty, což zkoušení usnadňuje. Také proto se více experimentů provádí za těchto podmínek.

Zkoušení mechanických vlastností vzorku při zvýšené teplotě bez ochlazení je obtížnější. Jednak je třeba vzorek o teplotě například 800 °C přemístit ze zařízení, ve kterém je ohříván do místa, kde bude zatížen. Při tomto přemístění je třeba dbát na nepoškození zahřátého vzorku a na co nejmenší ochlazení vzorku. Také zařízení, ve kterém se vzorek bude zatěžovat, musí být odolné vůči takto vysokým teplotám.

Ve své podstatě je jednodušší ohřívát a zatěžovat vzorek v jednom zařízení. Na druhou stranu takové zařízení se komerčně nevyrábí a je třeba ho vyvinout, případně se inspirovat v publikovaných výzkumech. V České republice je takové zařízení pouze jedno – na Kloknerově ústavu ČVUT v Praze.

### 2.1 Rozměry zkušebních těles

ČSN EN 12390-1 [12] definuje rozměry zkušebních těles, jak je uvedeno na Obr. 7. Doporučné rozměry těles dle RILEM pro různé druhy zkušek jsou uvedeny v následujících podkapitolách.



Rozměry vzorků	Krychle	d [mm]	100	150	200	250	300	
	Válec	d [mm]	100	113	150	200	250	300
	Kvádr	d [mm]	100	150	200	250	300	

Obr. 7 – Rozměry vzorků dle ČSN EN 12390-1 [12].

## 2.2 Doporučení RILEM TC-129-MHT

Unie RILEM (z francouzské zkratky pro mezinárodní unii laboratoří a expertů v oblasti stavebních materiálů, technických zařízení a konstrukcí) byla založena roku 1947 za účelem vědecké spolupráce v oblasti stavebních materiálů a konstrukcí. Mezi její cíle patří zapojit do výzkumu experty z oblasti stavebnictví a vědy stejně jako mladé vědce a inženýry. Dále tato unie chce udávat směr současného výzkumu a výsledky publikovat do celého světa.[13]

Celá unie se skládá z technických komisí (označení zkratkou TC a pořadovým číslem), kterých za celou dobu svého působení bylo přibližně 250. Technická komise číslo 129 se zabývala metodami měření mechanických vlastností betonu při vysoké teplotě a jejím předsedou byl Ulrich Schneider z Rakouska.[13]

### Obecná doporučení

Veškerá doporučení jsou platná pro měření mechanických vlastností všech druhů betonů včetně vysokohodnotného betonu, a to při teplotách od 20 °C do 750 °C.[14–16]

Testované vzorky by měly být mimo skladované prostředí maximálně 2 hodiny pro vzorky neuzavřené po dobu skladování, nebo maximálně 4 hodiny pro vzorky uzavřené po dobu skladování.[14–16]

Formy pro betonáž vzorků by měly být válcové a dostatečně tuhé. Měly by být vyrobeny z oceli nebo z materiálu na bázi plastů. Formy by měly být vodotěsné, aby zabránily průsaku cementové pasty nebo vody při odlévání. Pokud jsou použity formy na bázi plastů, je třeba použít nenasákavý polymer.[14–16]

Pro dostatečné zhutnění betonu by měl být použit vibrační stůl. Betonáž by měla být provedena ve 2 až 3 krocích.[14–16]

Veškeré vzorky by měly být skladovány prvních 7 dní při teplotě 18–22 °C. Během prvních 20–28 hodin by měly vzorky zůstat ve formě. Dalších 6 dní by mělo být zabráněno přístupu nebo úniku vlhkosti – to lze zajistit uzavřením formy shora pomocí těsného víka. Dále je třeba vzorky zvážit a změřit. Vzorky mohou být zkoušeny, pokud jsou souměrné podle centrální osy a pokud je jejich stáří minimálně 90 dnů.[14–16]

Počet testovaných vzorků by měl být alespoň 3 vzorky pro každou kombinaci zkoušených parametrů. Kombinací zkoušených parametrů je myšlena stejná teplota, způsob uskladnění vzorků, zatížení atd. Pokud se vzorky zkoušejí v dávkách, pak pro každou várku je třeba vyzkoušet alespoň 2 vzorky.[14–16]

Pro kontrolu je vhodné vyrobit dva vzorky navíc. Jeden, který se otestuje za běžné teploty po 28 dnech tvrdnutí a druhý, který se otestuje ve stejné době, jako ostatní vzorky.[14–16]

Přesnost měření teploty by měla být alespoň 0,5 °C. Rozdíl teplot vzorku po délce centrální osy nesmí překročit 1 °C při 20 °C, 10 °C při 100 °C a 20 °C při 750 °C. Teploty se mohou interpolovat. Pro měření lze použít termočlánky chráněné proti vlivu radiace.[14–16]

### 2.3 Měření pevnosti v tlaku

Ve výzkumu z roku 2011, který prováděli Guo a Shi [17], byly použity krychlové vzorky s délkou hrany 100 mm ze čtyř různých betonových směsí. Dvě směsi byly s vápencovým kamenivem a dvě se křemičitým kamenivem s maximální velikostí kameniva 15–20 mm. Každá z nich měla pevnostní třídy C20/25 a C40/50. Betonová směs byla namíchána a ručně vylita do ocelové formy a ztuhněna pomocí vibrátoru. Směs byla uložena ve formě po dobu 2 dnů a po odbednění byly vzorky umístěny na 28 dní do místnosti pro skladování vzorků<sup>3</sup>. [17]

Postup pro zkoušení tlakové pevnosti betonových vzorků za zvýšené teploty byl následující. Betonové vzorky byly ohřány v přehřívací peci na požadovanou teplotu. Po ohřátí byl každý vzorek zvlášť pomocí speciálních kleští vyjmut a umístěn do zkušební pece. Ve zkušební peci byla stabilizována teplota vzorku (to zabralo asi 20 minut) a poté se začalo se zatěžováním. Rychlost zatěžování byla stanovena stejná jako za běžné teploty – 0,25 MPa/s. [17]

Pro porovnání byly vzorky zkoušeny i na reziduální pevnost v tlaku. Betonové vzorky byly ohřány v přehřívací peci stejně jako při zkoušení tlakové pevnosti za zvýšené teploty. Po ohřátí vzorků na požadovanou teplotu byly otevřeny dvířka pece, aby se vzorky ochladily na pokojovou teplotu. Po 24 hodinách od otevření dveří bylo možné zatěžovat vzorek za běžné teploty. [17]

Z naměřených hodnot měření tlakové pevnosti při zvýšené teplotě i po ochlazení vzorku byly vyjádřeny rovnice znázorňující vliv teploty na pevnost betonu v tlaku. Rovnice vyjadřují poměr pevnosti v tlaku za zvýšené teploty (nebo reziduální pevnosti) a při běžné teplotě:

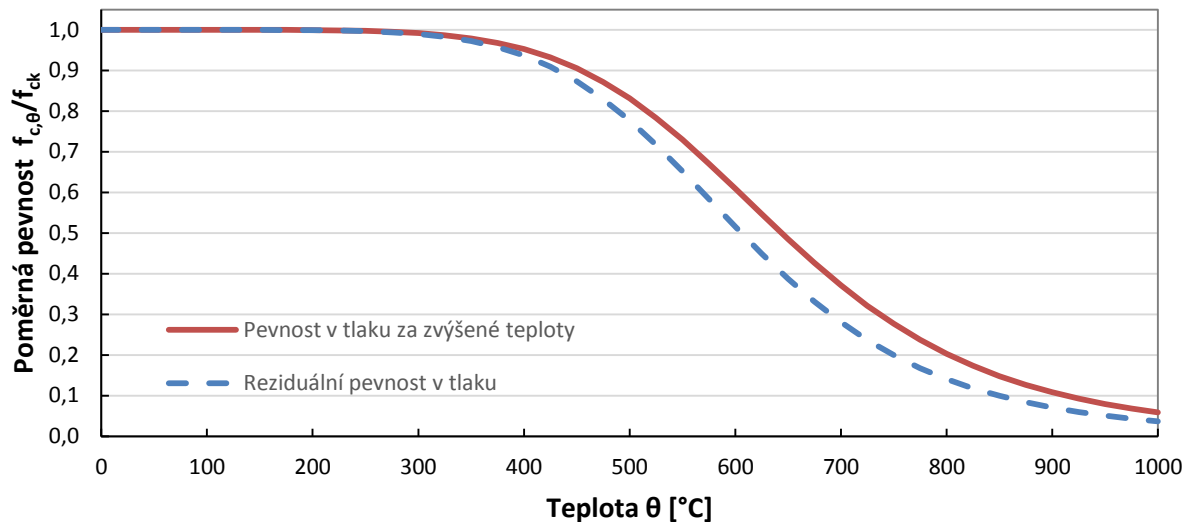
$$\text{Pevnost v tlaku za zvýšené teploty: } \frac{f_{CU}^T}{f_{CU}} = \frac{1}{1+16(T/1000)^{6,3}}$$

$$\text{Reziduální pevnost v tlaku: } \frac{f_{CU}^{TR}}{f_{CU}} = \frac{1}{1+26(T/1000)^{6,5}}$$

Porovnání těchto hodnot je vyjádřeno v následujícím grafu. [17]

<sup>3</sup> Dle originálního textu se jedná o „curing room“ [17].





Obr. 8 – Porovnání pevnosti v tlaku betonu za zvýšené teploty a reziduální pevnosti.[17]

### Měření pevnosti v tlaku - doporučení RILEM

Testované vzorky by měly mít válcový tvar s poměrem délky a průměru mezi hodnotami 3 a 4. Minimální průměr vzorku by měl být 4x až 5x větší, než největší rozměr kameniva pro jádrové vývrty a 5x větší pro vzorky betonované na místě.[14]

Jednosé tlakové zatížení by mělo být aplikováno ve směru centrální osy vzorku o nárůstu 0,5 MPa/s. Tento nárůst musí být konstantní až do dosažení referenční pevnosti.[14]

Teplota vzorku by měla být měřena ve třech bodech na centrální ose – ve středu a 25–50 mm od horního a dolního povrchu.[14]

Testovaný vzorek musí být zahříván krokovou nebo plynulou rychlostí zahřívání dle daných limitů (viz Tab. 1). Po dosažení potřebné teploty vzorku je třeba tuto teplotu udržet po 55–65 minut. Poté se na vzorek zatěhuje rychlostí 0,5 MPa/s až do selhání vzorku.[14]

Tab. 1 – Doporučené hodnoty rychlostí zahřívání a chladnutí povrchu vzorku [14].

Průměr vzorku [mm]	Rychlost zahřívání/chladnutí [K/min]
150	$\leq 0,5$
100	$\leq 1,0$
75	$\leq 2,0$
50	$\leq 4,0$

Vzorky testované na reziduální pevnost v tlaku by měly být ochlazovány uvnitř zařízení, které umožní ochlazování doporučenou rychlostí (viz Tab. 1). To vyloučí praskání betonu vlivem teplotního napětí nebo rychlým nabýváním vlhkosti.[14]

## 2.4 Měření pevnosti v tahu

Pevnost betonu v tahu lze zkoušet dvěma způsoby. Buď zkouškou pevnosti v tahu ohybem (flexural strength) nebo zkouškou pevnosti v příčném tahu (splitting tensile strength).

Pevnost v příčném tahu lze zkoušet pomocí lisu, kterým se zkouší tlaková pevnost. Zkouška vypadá téměř stejně, ale navíc jsou použity zatěžovací segmenty a roznášecí proužky (viz Obr. 9). Pro výpočet pevnosti v příčném tahu dle níže uvedeného schématu platí vzorec:

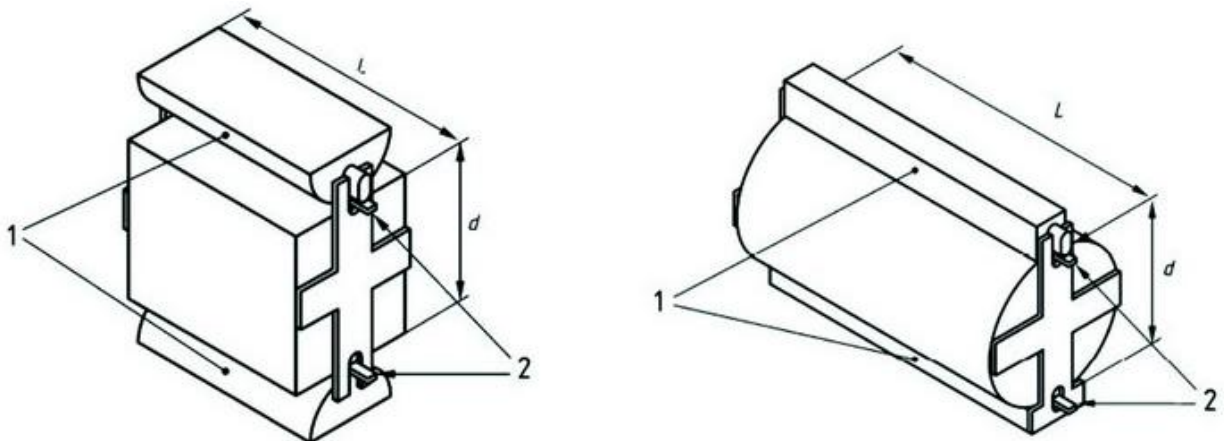
$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot D} \quad [18]$$

kde:  $F$  = maximální zatížení v N

$L$  = délka vzorku v mm

$D$  = výška / průměr vzorku v mm

$f_{ct}$  = pevnost v příčném tahu v MPa



1 – Ocelový zatěžovací segment

2 – Roznášecí proužek z dřevovláknité desky

$L$  – délka vzorku

$D$  – průměr / výška vzorku

Obr. 9 – Schéma zatěžovaných vzorků při zkoušce pevnosti v příčném tahu [18].

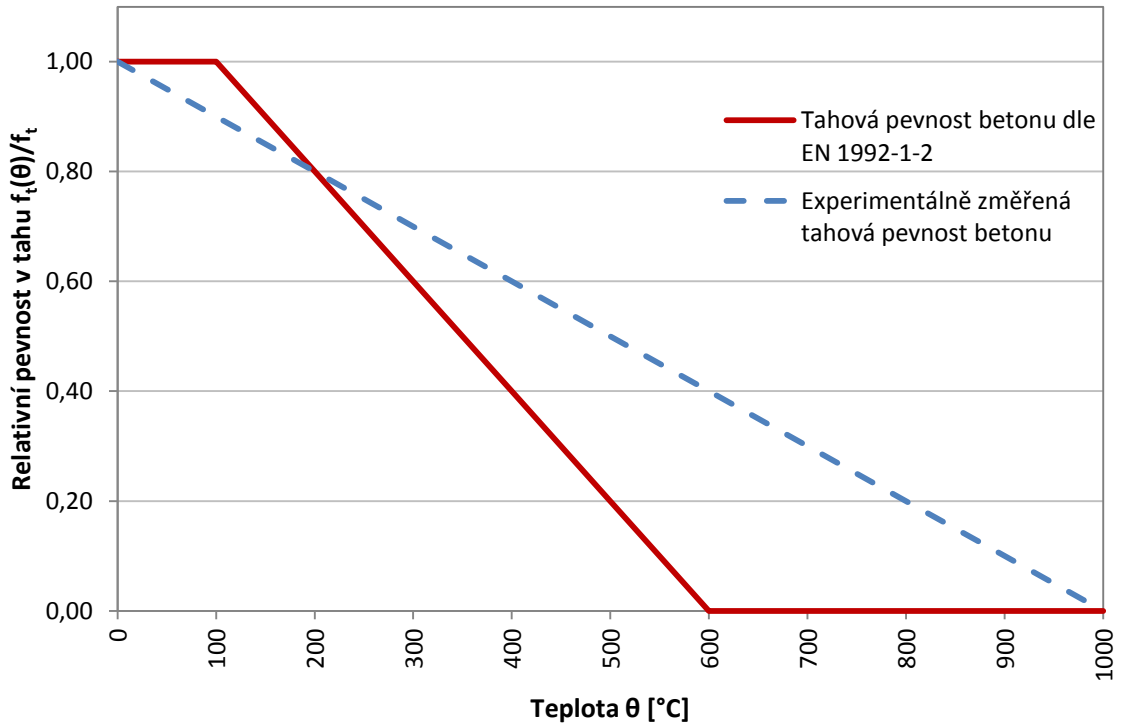
Guo a Shi [17] provedli také zkoušku betonových vzorků v příčném tahu za zvýšené teploty. Byly použity stejné křehlové vzorky jako pro zkoušení pevnosti v tlaku (viz kapitola 2.3). Vzorky byly ohřívány stejným způsobem, jako pro měření pevnosti v tlaku. Mezi vzorky a horní a spodní čelisti lisu byly připevněny roznášecí proužky z nerezové oceli o rozměru 5 x 5 mm, aby došlo k zatížení vzorku příčným tahem.[17]

Výsledkem jejich experimentu bylo zjištění, že tvar při porušení vzorku ohřátého na maximálně 300 °C je v podstatě totožný s tvarem porušení při zkoušení vzorku za běžné teploty. Při teplotě nad 500 °C se vzorek poruší v místech roznášecích proužků a vznikají i větší nepravidelné trhliny po celém průřezu vlivem vysoké teploty. Také bylo zjištěno, že relativní

pevnost<sup>4</sup> v tahu je znatelně menší než relativní pevnost v tlaku betonu. Znamená to tedy, že teplota má vyšší vliv na pevnost v tahu než na pevnost v tlaku. Pro vyjádření tahové pevnosti v závislosti na teplotě byla stanovena tato rovnice:

$$\frac{f_t^T}{f_t} = 1 - \frac{T}{1000}$$

Porovnání této naměřené závislosti s Eurokódem 2 je vyjádřena v následujícím grafu.[17]



Obr. 10 – Porovnání výsledků experimentu s EN 1992-1-2. Hodnoty převzaty z [3, 17].

### Měření pevnosti v tahu - doporučení RILEM

Testované vzorky nebo alespoň převažující část vzorků by měly mít válcový tvar s poměrem délky a průměru mezi hodnotami 1,5 a 2,5. Minimální průměr vzorku by měl být 4x až 6x větší než největší rozměr kameniva pro jádrové vývrty a 5x až 7,5x větší pro vzorky betonované na místě. Mezi doporučené průměry patří 150 mm, 100 mm, 80 mm a 60 mm. Konce vzorků mohou být rozšířeny pro lepší aplikaci zatížení.[15]

Testovaný vzorek by měl být umístěn do testovacího stroje a vycentrován s přesností na 1 % průměru vzorku. Vzorky je třeba přilepit nebo upnout do testovacího stroje. V případě lepení vzorku ke stroji je třeba, aby koncové povrchy vzorku byly k sobě paralelní a kolmé na centrální osu. Maximální odchylka od centrální osy je 1°. V případě upnutí vzorku do stroje by měl mít vzorek kónické konce a mezi nimi válcový průřez. Upnutí by mělo být provedeno tak,

<sup>4</sup> Relativní pevnost = poměr pevnosti za zvýšené teploty a pevnosti za běžné teploty

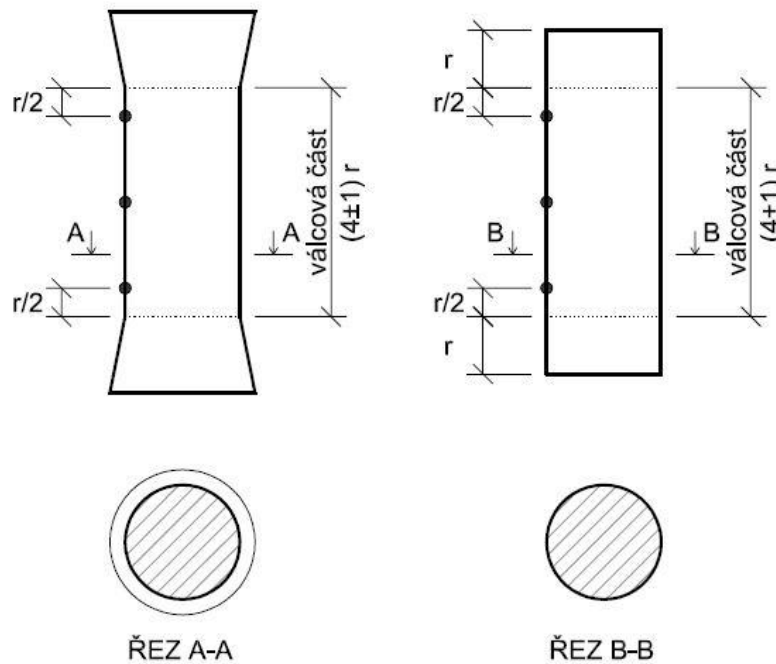
aby se napětí koncentrované v kónických částech co nejvíce redukovalo. To může být provedeno například zabetonováním úchytů do kónické části.[15]

Tab. 2 – Doporučené hodnoty rychlosti zahřívání nebo chladnutí povrchu vzorku [15].

Průměr vzorku [mm]	Rychlost zahřívání/chladnutí [K/min]
150	0,25
100	0,50
80	1,00
60	2,00

Je třeba zajistit konstantní nárůst teploty až do dosažení teploty, při které se bude měřit pevnost v tahu. Maximální hodnoty nárůstu povrchové teploty jsou uvedeny v Tab. 2. Povrchové teploty by měly být měřeny minimálně ve třech bodech – viz Obr. 11.[15]

• Body měření povrchové teploty



Obr. 11 – Příklady tvaru vzorků včetně vhodných pozic pro měření teploty [15].

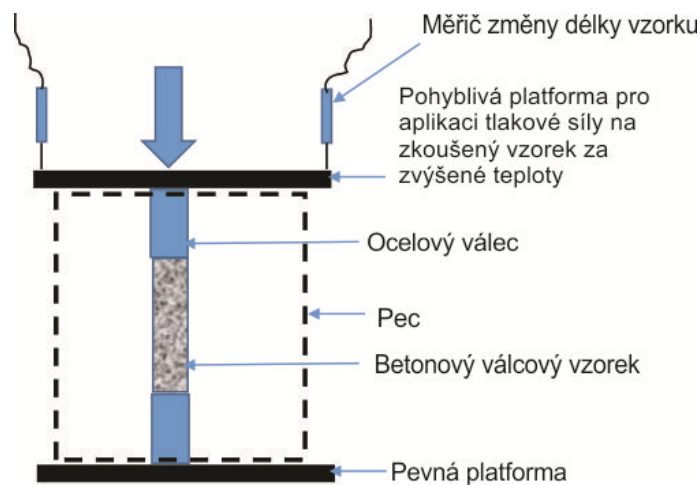
Zkušební teplota vzorku by měla být udržena po dobu 55–65 minut. Poté se testovaný vzorek zatíží tahovým napětím 0,05 MPa/s až do porušení vzorku. Při zatížení by neměl testovací stroj bránit rotaci vzorku. Měření pevnosti v tahu není platné, jestliže porušení vzorku nastane ve vrstvě o tloušťce největšího rozměru použitého kameniva od horního nebo spodního povrchu válcové části vzorku.[15]

Vzorky testované na reziduální pevnost v tahu by měly být ochlazovány uvnitř zařízení, které nepřekročí doporučenou rychlost ochlazování (viz Tab. 2). To vyloučí praskání betonu

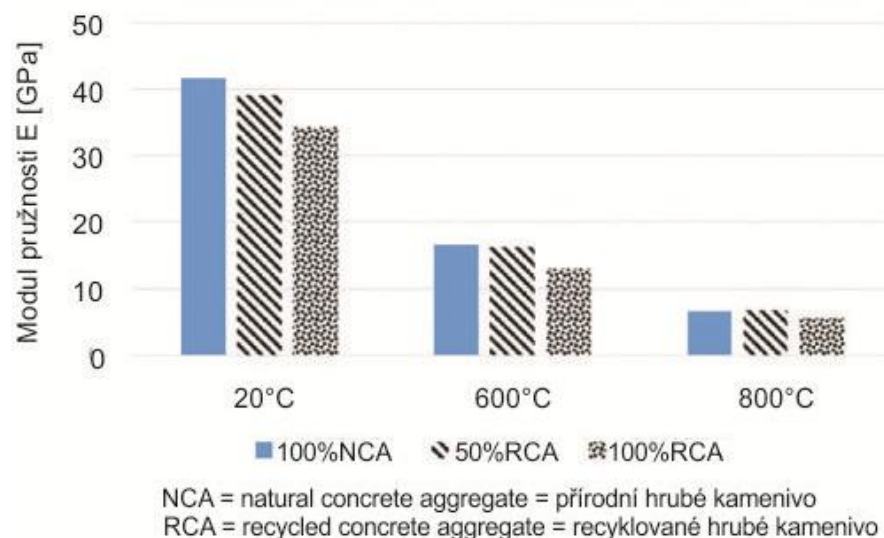
vlivem teplotního napětí nebo rychlým nabýváním vlhkosti. Reziduální pevnost v tahu by se měla měřit při teplotě vzorku 20–30 °C.[15]

## 2.5 Měření modulu pružnosti

Shaikh z australské Curtin University [19] provedl experiment, ve kterém měřil modul pružnosti betonové směsi s recyklovaným kamenivem při 600 °C a 800 °C. Postup byl následující. V prostoru lisu, kde probíhá zatěžování, byl umístěn betonový válcový vzorek, o výšce 200 mm a průměru 100 mm, mezi dva ocelové válce. Všechny tyto válce se umístily do malé pece, která měla nahoře otvor, kudy procházel horní ocelový válec. Tímto otvorem také procházely termočlánky, které měřily teplotu vzorku. Poté, co byly termočlánky umístěny, se horní otvor ucpal kamennou vatou, aby neunikalo teplo. Na horní pohyblivou platformu lisu, která aplikuje zatížení, byly připevněny měřiče změny délky vzorku. Když dosáhl vzorek požadované teploty, bylo spuštěno zatěžování. Maximální zatěžovací síla činila 40 % pevnosti v tlaku betonové směsi při běžné teplotě. Z naměřených hodnot byl dopočten výsledný modul pružnosti.[19]



Obr. 12 – Schéma pro měření modulu pružnosti při zvýšené teplotě. Přeloženo z [19].



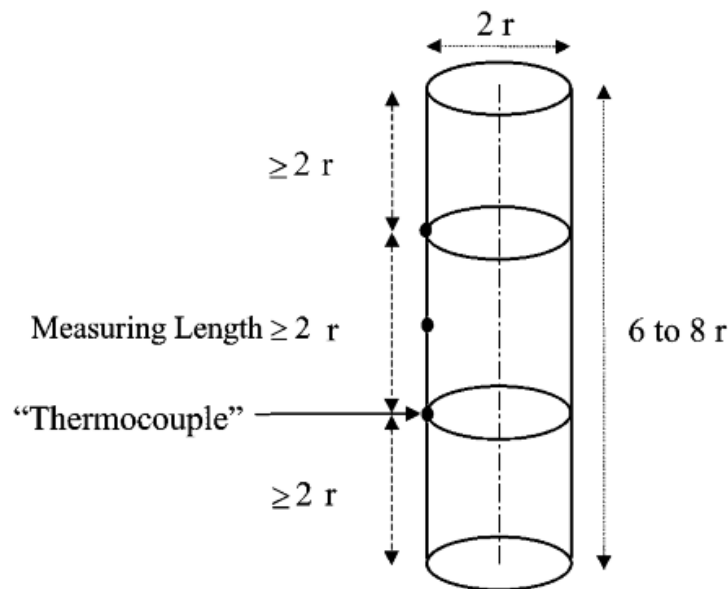
Obr. 13 – Výsledné hodnoty modulu pružnosti dle experimentu Shaikh. Přeloženo z [19].

## Měření modulu pružnosti - doporučení RILEM

Testované vzorky by měly mít válcový tvar s poměrem délky a průměru mezi hodnotami 3 a 4. Minimální průměr vzorku by měl být 4x větší, než největší rozměr kameniva pro jádrové vývrty a 5x větší pro vzorky betonované na místě. Mezi doporučené průměry patří 150 mm, 100 mm, 80 mm a 60 mm.[16]

Forma vzorku by neměla mít vliv na deformaci vzorku a na kontakt mezi vzorkem a zařízením měřícím změnu délky vzorku. Limit pro přípravu laboratorně vytvořených vzorků, které jsou skladovány uzavřené, by neměl přesáhnout 4 hodiny.[16]

Délka vzorku se měří ve směru centrální osy mezi dvěma řezovými rovinami. Na každé z nich by se měly nacházet alespoň dva měřící body. Řezové roviny by se měly nacházet ve vzdálenosti minimálně jeden průměr vzorku od krajního povrchu vzorku (viz Obr. 14) a měly by být kolmé k centrální ose. Vzdálenost mezi řezovými rovinami by měla být větší než jeden průměr vzorku.[16]

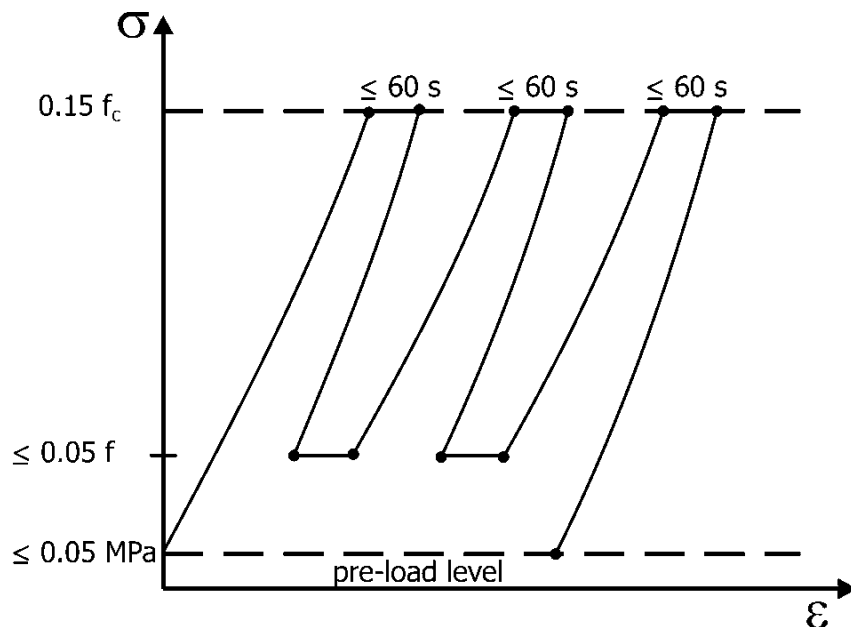


Obr. 14 – Schéma zkoušeného vzorku s vyznačenými místy měření teploty a protažení [16].

Referenční délka vzorku by měla být měřena při teplotě  $18\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností alespoň 0,5 %. Změna délky vzorku se měří ve směru centrální osy.[16]

Teplota vzorku by se měla měřit ve třech bodech na povrchu vzorku. Jeden bod umístěný ve středu vzorku a jeden bod na obou řezových rovinách (viz Obr. 14). Průměrnou teplotou vzorku je myšlen aritmetický průměr změřených hodnot na povrchu vzorku.[16]

Zkoušený vzorek by měl být vycentrován do testovacího stroje s maximální odchylkou 1 % průměru vzorku. Dále se vzorek zatíží malým tlakovým napětím – maximálně 0,05 MPa ve směru centrální osy. V další fázi by se měl vzorek střídavě zatěžovat a odtěžovat (viz Obr. 15). Nejdříve nastane zatížení tlakovou silou o hodnotě 15 % referenční pevnosti po dobu maximálně 60 s. Poté se vzorek odtíží na hodnotu  $\leq 5$  % referenční pevnosti opět po dobu maximálně 60 s. Celý tento cyklus zatížení a odtížení nastane celkem třikrát. Při posledním odtížení klesne zatížení tlakovým napětím na hodnotu maximálně 0,05 MPa. Rychlost zatěžování a odtěžování by měla být 0,4–0,6 MPa/s. Toto měření probíhá za běžné teploty, a pokud změna délky přesáhne 20 % střední hodnoty, pak je třeba zkontrolovat měřicí zařízení, vycentrování vzorku, rovnost povrchů vzorku atd. Tyto úpravy se provádějí znovu a znovu, dokud se po zatěžovacím cyklu změna délky udrží pod hodnotou 20 % střední hodnoty. Pokud toto trvá déle než hodinu, vzorek by měl být vyrazen.[16]



Obr. 15 – Schéma zatěžovacího cyklu za běžné teploty pro ověření změny délky vzorku [16].

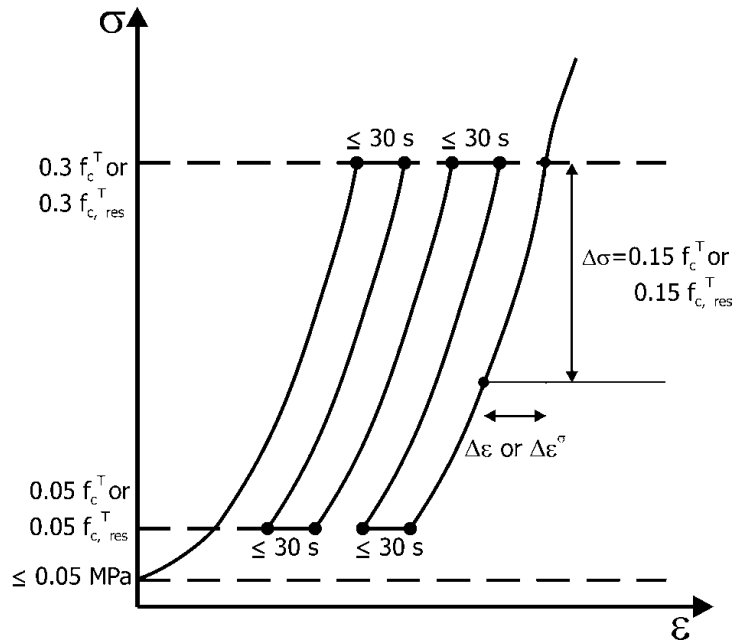
Pro zkoušení vzorku za zvýšené teploty je třeba tento vzorek zahřát na danou teplotu limitovanou rychlostí zahřívání (viz Tab. 2 v kapitole 2.4). Zkoušená teplota by měla být udržena po dobu 55–65 minut. Poté se vzorek může zkoušet za zvýšené teploty nebo může být ochlazen na pokojovou teplotu a výslednou hodnotou bude reziduální modul pružnosti.[16]

Před zatěžovacím cyklem je vzorek zatížen tlakovou silou o hodnotě 0,05 MPa. Zatěžovací cyklus je zahájen zvyšováním tlakového napětí na hodnotu 30 % tlakové pevnosti vzorku při dané teplotě. Tato hodnota by měla být udržena po dobu maximálně 30 s a poté se odtíží na hodnotu 5 % tlakové pevnosti vzorku při dané teplotě (rychlosti zatěžování a odtěžování by měly být v rozmezí 0,4–0,6 MPa/s). Toto se ještě jednou opakuje a při posledním zvýšení tlakového napětí se měří rozdíl napětí při dosažení 15% a 30% tlakové pevnosti betonu.

Dále se při těchto hodnotách měří rozdíl přetvoření vzorku. Z těchto dvou hodnot lze vyjádřit modul pružnosti pomocí Hookova zákona:

$$E_{\theta} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Vždy by měly být zkoušeny alespoň dva totožné vzorky pro každou unikátní kombinaci zkušebních a materiálových parametrů. Výsledky z těchto měření se aritmeticky zprůměrují. Pokud se některý výsledek jednoho vzorku liší od průměru o více než 20 %, pak by neměl být tento vzorek uvažován do výsledných hodnot.[16]



Obr. 16 – Schéma zatěžovacího cyklu při zkoušení reziduálního modulu pružnosti nebo modulu pružnosti při zvýšené teplotě [16].



### 3 Zkušební zařízení

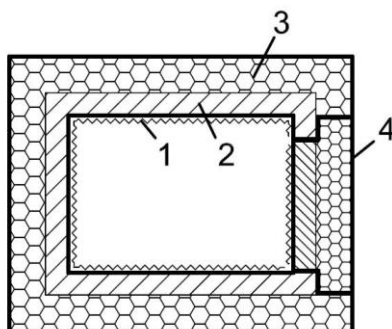
V současné době neexistuje na trhu takové zařízení, které by bylo určeno pro zkoušení mechanických vlastností betonových vzorků při vysokých teplotách. Pro různé experimenty byla tedy použita různá zařízení. Každé zařízení musí obsahovat tyto tři systémy:

- Systém pro ohřívání a ochlazování vzorku
- Systém pro zatížení vzorku
- Systém pro měření a záznam naměřených hodnot.[17]

#### 3.1 Systém pro ohřívání a ochlazování vzorku

Systém pro ohřívání by měl obsahovat předehřívací pec, ve které se více vzorků najednou ohřeje na požadovanou teplotu. Vzhledem k doporučením RILEM (viz kapitola 2.2) je ideální pec, do které se vejde 3–6 vzorků naráz. Díky tomu se eliminují rozdíly ve výsledcích experimentu, které mohou nastat vlivem rozdílného ohřívání vzorků. Vhodná nejvyšší teplota v peci je přibližně 1000 °C. Při této teplotě už se některé složky betonu taví a tak není třeba vzorek při vyšší teplotě zkoušet. Předehřívací pec musí být vybavena zařízením pro měření a regulaci teploty v peci, aby bylo možné nastavit rychlost ohřívání.

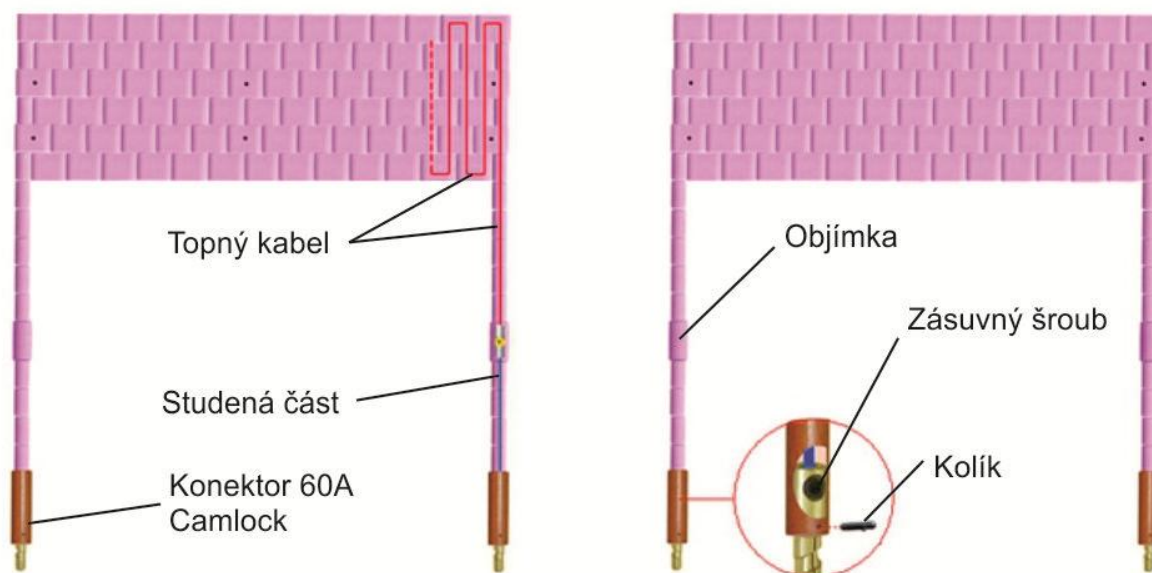
Pro účely zkoušení betonových vzorků bude dostačující elektrická odporová pec. Zdrojem tepla v této peci je odporový drát vinutý u vnitřních povrchů pece. Pro rovnoměrnější rozložení teploty v peci je vhodné, aby byl drát umístěn ze všech stran pece, tedy i na vnitřní straně dvířek. Vnitřní povrch pece tvoří žáruvzdorný materiál. Dále je pec tepelně izolována, pro minimalizaci tepelných ztrát.[20]



1 - El. odporový drát ; 2 - žáruvzdorná vložka ; 3 - tepelná izolace ; 4 - dvířka

Obr. 17 – Schematický svislý řez el. odporovou pecí. Překresleno podle [21]

Vzorek lze také zahřívát pomocí keramických deček (viz Obr. 18). Keramické dečky jsou flexibilní a dobře se tedy aplikují na válcový i krychlový tvar vzorku. Každá keramická dečka má dva připojovací kabely, jeden na kladný a druhý na záporný pól. Kabely jsou napojeny pomocí konektoru 60A Camlock na zařízení regulující teplotu topného kabelu uvnitř dečky podle nastavené rychlosti zahřívání. Na každém kabelu je zřetelná objímka, která odděluje ohřívanou část dečky od studené. Celek dečky se skládá z jednotlivých článků, kterými je protažen topný drát. Články jsou různých typů, které zajišťují variabilitu a možnost vyrobit téměř jakýkoliv tvar dečky. Zkoušenému vzorku je teplo předáváno vedením, na rozdíl od vzorku, který je umístěn v peci, kde je mu teplo předáváno převážně prouděním a radiací. Vzhledem k tomu, že jsou keramické dečky umístěny na vnějším povrchu vzorku, je vhodné vzorek i s keramickou dečkou zabalit do tepelné izolace odolné vůči vysokým teplotám. Tím se usměrňuje teplo směrem do vzorku.[22]



Obr. 18 – Schéma keramické dečky. Přeloženo z [22].

### 3.2 Systém pro zatížení vzorku

Systém zatížení vzorku pro měření reziduálních vlastností betonu může být totožný se systémem, kterým se měří vlastnosti betonu za běžné teploty. To je možné z důvodu nízké teploty vzorku. Nejsou tedy žádné specifické požadavky na toto zařízení plynoucí ze zvýšené teploty.

Naproti tomu zařízení, kterým se bude zatěžovat vzorek o teplotě například 600 °C, musí této teplotě alespoň krátkodobě odolat. Hydraulické lisy obsahují různé oleje, jejichž teplota vznícení se pohybuje okolo 380 °C [23]. Není tedy vhodné zkoušet více vzorků v krátkém intervalu, aby nedošlo k nadměrnému ohřátí oleje. Navíc vzniká další teplo při samotném stlačování vzorku. Mezi zkoušením každého vzorku je vhodné počkat, než lis vychladne.

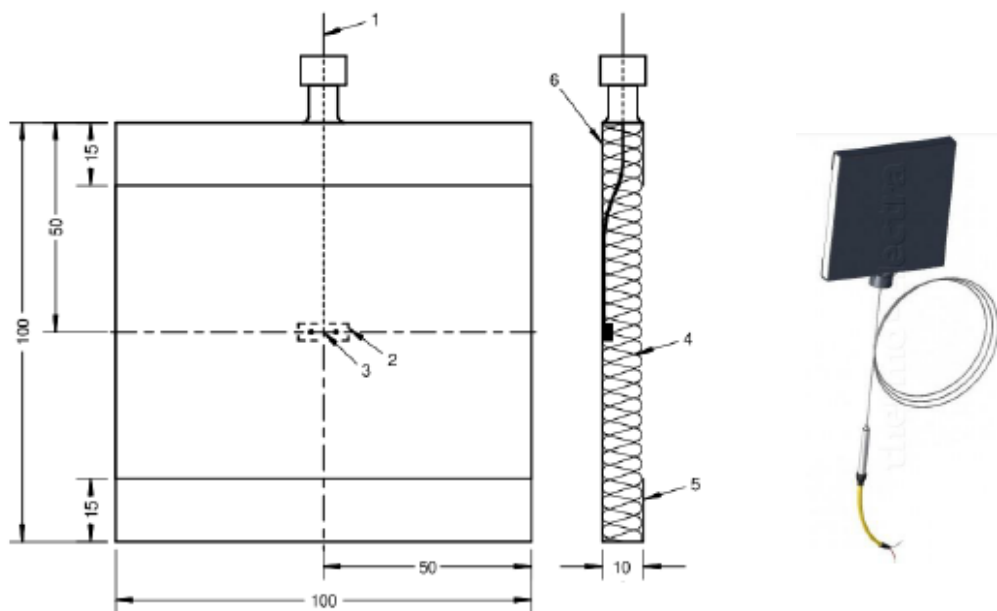
Tlačné desky lisu se nesmí při zatěžování trvale deformovat a musí být rovinné s dostatečnou plochou pro zatížení vzorku. Pokud je nutno zmenšit vzdálenost mezi tlačnými deskami, lze mezi ně vložit až čtyři pomocné desky o minimální tloušťce desky 23 mm.[24]

### 3.3 System pro měření a záznam naměřených hodnot

Pro zjištění chování betonu při vysokých teplotách je potřeba měřit tyto veličiny:

- Teplotu v peci
- Teplotu na povrchu nebo uvnitř vzorku
- Zatížení vzorku nebo jeho napětí
- Deformaci vzorku.[17]

Měření teploty v peci lze provést pomocí plášťových termočlánků nebo pomocí deskového snímače (tzv. „plate“). Deskový snímač, díky jeho speciálně vyvinuté konstrukci, umožňuje měřit jednotlivé složky tepelného toku (konvekci a radiaci) a také adiabatickou teplotu okolního prostředí. Nicméně použití deskového snímače teploty je vhodné pouze ve velkých pecích. Pro předehřivací pec pro pár vzorků je to kvůli jeho rozměrům nevhodné. Naopak plášťové termočlánky lze díky svým malým rozměrům použít pro měření teploty v peci. Plášťové termočlánky se vyrábí v různých tloušťkách. Čím tlustší, tím se ohřívá pomaleji, ale také vykazuje mnohem menší výkyvy teplot. V České republice se nejčastěji používají termočlánky typu J, K, S, B.[25]



Obr. 19 – Konstrukce a pohled na deskový snímač teploty [26].

1 - plášťový termoelektrický článek typu K, 2 - bodově přivařený nebo přišroubovaný ocelový pásek, 3 - měřicí spoj termočlánku, 4 - minerální izolační materiál, 5 - pásek slitiny niklu, 6 - strana přijímající tepelný tok, rozměry kótovány v milimetrech.

Měřit teplotu uvnitř vzorku lze pomocí zabudování termočlánku do vzorku. To ale vyžaduje vyvrtat do vzorku otvor, kudy termočlánek povede. Pro následné měření pevnosti vzorku je toto ale nepřípustné. Proto se při těchto zkouškách měří povrchová teplota vzorku. Jakmile dosáhne povrchová teplota vzorku požadované hodnoty, udržuje se konstantní teplota ještě po stanovenou dobu (např. 60 minut dle doporučení RILEM). Povrchovou teplotu lze měřit pomocí klasických termočlánků (např. typu K), které budou připevněny k povrchu zkoušeného vzorku. Vzhledem k tomu, že jsou vzorky vystaveny vysoké teplotě, je nutné zvolit připevnění termočlánku tak, aby vysoké teplotě odolalo. Vhodné je stabilizovat polohu termočlánku pomocí minerální vaty, která se ke vzorku připevní drátem.[27]

Termočlánky fungují na základě termoelektrického jevu, při kterém se zaznamenává napětí vzniklé rozdílem teplot na konci termočlánku, který je složen ze dvou vodičů různého materiálu. Je tedy nutné mít zařízení, které tyto napětí dokáže přepočítat na teplotu a zároveň je dokáže zaznamenat teplotu v různých časových intervalech. Takovým zařízením může být například data logger připojený k počítači (viz Obr. 20). Ten dokáže v reálném čase ukazovat teplotu několika termočlánků najednou a podle toho lze například regulovat rychlost ohřívání.[28]



Obr. 20 – Data loggery pro (zleva) 64, 8 a 1 kanál [29].

Zatížení vzorku nejčastěji měří samotný lis při zatěžování. Ten většinou měří sílu, kterou je vzorek zatěžován. Poté lze napětí vyjádřit následovně:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

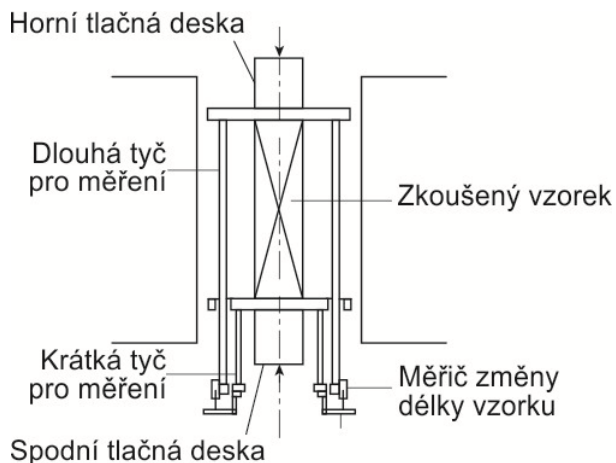
Kde:  $\sigma$  = napětí v MPa

$F$  = zatěžovací síla v N

$A$  = zatěžovaná plocha v  $\text{mm}^2$

Napětí lze měřit i přímo pomocí tenzometrů. Tenzometry musí být pevně spojeny s povrchem zkoušeného vzorku, aby se při zatížení deformovaly společně se vzorkem. Principem fungování je změna elektrického odporu v závislosti na deformaci. Na přesnost měření má značný vliv kvalita připevnění tenzometru ke vzorku. Je nutno dodržovat postup výrobce. Z důvodu nízké tepelné odolnosti tenzometrů lze tento postup použít pouze u zkoušení reziduálních vlastností betonu. Pro vyšší teploty se napětí určí pomocí vzorce výše.[27]

Deformaci lze měřit přímo pomocí snímače deformací nebo nepřímo pomocí měření změny rozměrů vzorku. Bohužel snímače deformací většinou neodolají vysoké teplotě – jsou tedy vhodné pouze při měření reziduálních vlastností. Pro měření vlastností při vysokých teplotách je vhodnější použít nepřímé měření deformací. Systém pro měření nepřímých deformací může fungovat například tak, že bude měřit změnu výšky vzorku pomocí dvou tyčí připevněných na horní a spodní povrch vzorku (viz Obr. 21).[17]



Obr. 21 – Příklad schématu zařízení pro nepřímé měření deformací. Přeloženo z [17].

Moderní lisy umí zaznamenávat jak zatěžovací sílu, která je na vzorek aplikována, tak posun tlačných desek lisu – čili přímo deformaci vzorku. Po získání těchto dat z lisu je třeba vyloučit hodnoty, které byly naměřeny před dolehnutím tlačných desek na povrch vzorku. U těchto hodnot bude patrný nárůst deformace, ale naměřená síla bude téměř nulová a konstantní.

## 4 Experiment 1 – pevnost v tlaku za zvýšené teploty

Tento experiment byl zaměřen na zkoušení pevnosti v tlaku různých betonových směsí při zvýšené teplotě. Zkoušelo se celkem 45 vzorků válcového tvaru o průměru 100 mm a výšce 200 mm. Tento rozměr souhlasí s ČSN EN 12390-1 [12]. Vzorky byly tvořeny třemi betonovými směsmi – prostý beton, provzdušněný beton a vláknobeton s polypropylenovými vlákny (viz Tab. 3). Veškeré vzorky byly vyrobeny z portlandského cementu, vody a křemičitého kameniva. Zpracovatelnost čerstvé směsi zajistil plastifikátor, který také snižuje množství potřebné vody pro výrobu. První směs neobsahovala žádné další složky. Druhá směs obsahovala navíc provzdušňovací přísadu. Třetí směs neobsahovala provzdušňovací přísadu, ale byla vyztužena PP vlákny.

Tab. 3 – Složení zkoušených vzorků.

Složky betonu	Přítomnost složky		
	Vzorky „C“ (prostý beton)	Vzorky „P“ (provzdušněný beton)	Vzorky „V“ (PP vlákna)
Portlandský cement	✓	✓	✓
Voda	✓	✓	✓
Kamenivo 0-4 mm	✓	✓	✓
Kamenivo 4-8 mm	✓	✓	✓
Kamenivo 8-16 mm	✓	✓	✓
Plastifikátor	✓	✓	✓
Provzdušňovací přísada	✗	✓	✗
Polypropylenová vlákna	✗	✗	✓

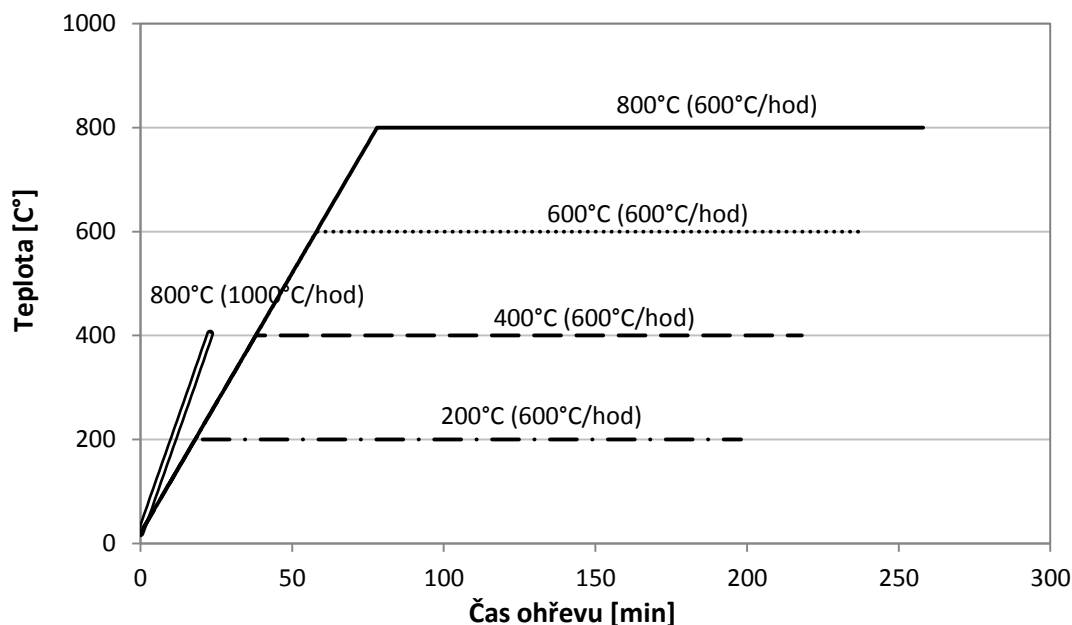
Při zkoušení prostého betonu za zvýšené teploty je nejvíce obávaným jevem odštěpování betonu. To je způsobeno nárůstem pórových tlaků v betonu vlivem odpařování volné a částečně i vázané vody v betonu.

Snížit pórové tlaky v betonu lze přidáním PP vláken do betonové směsi. PP vlákna vyhoří přibližně při teplotě 170 °C. Díky tomu se zvýší pórovitost betonu a to má zásadní vliv na snížení pórových tlaků v betonu. Na druhou stranu vyšší pórovitost způsobuje mírný pokles pevnosti v tlaku.[7]

Alternativou vláknobetonu může být použití provzdušněného betonu. Ten lze získat provzdušňovací přísadou, která má za následek vyšší pórovitost betonu, lepší zpracovatelnost čerstvé směsi, vyšší odolnost vůči mrazu. Vyšší pórovitost má stejně jako u betonu s PP vlákny své výhody i nevýhody – menší nárůst pórových tlaků, ale mírné snížení tlakové pevnosti.[29, 30]

Vzorky byly zkoušeny na tlakovou pevnost při teplotách 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C. Dále byl také zkoušen referenční vzorek při běžné teplotě – 20 °C. Vzorky měly být ohřívány rychlostí 1000 K/hod. První vzorek, který byl ohříván na teplotu 800 °C, odštěpil vlivem

prudkého ohřátí. Proto byla snížena rychlost ohřevu na 600 K/hod. Po dosažení požadované teploty vzorku byla teplota udržována ještě po dobu 180 minut, aby bylo dosaženo co nejrovnoměrnější teploty vzorku. Čas potřebný pro ohřátí vzorku na 200 °C činil celkem 198 minut, pro 400 °C byl 218 minut, pro 600 °C byl 238 minut a pro maximální teplotu 800 °C bylo potřeba 258 minut (viz Obr. 22).



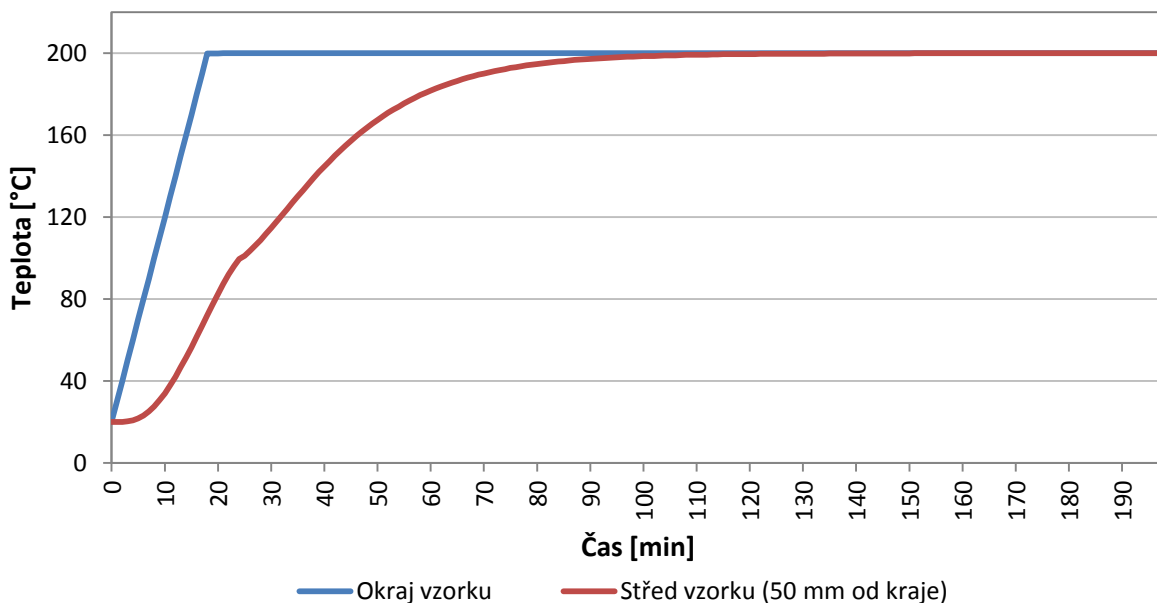
Obr. 22 – Čas potřebný pro ohřátí a prohřátí vzorku.

Pro ověření doby ohřevu byl vytvořen výpočet v programu SAFIR 2011, který byl vyvinut na L'Université de Liège v Belgii. Tento program je zaměřen na nelineární výpočty metodou konečných prvků pro prvky vystavené požáru. V tomto softwaru lze provádět výpočty jak celých konstrukcí ve 3D složených z prutových i deskových prvků, tak i 2D nebo 3D detaily částí konstrukce.[32]

V programu SAFIR 2011 byl ve 2D vymodelován kruhový průřez o průměru 100 mm. Materiálové charakteristiky odpovídají betonu s křemičitým kamenivem dle ČSN EN 1992-12 [3]. Vlhkost byla uvažována 2% a byla zvolena dolní mez součinitele tepelné vodivosti, aby byl výpočet konzervativnější.

Na dalších stranách jsou uvedeny grafy (Obr. 23 – Obr. 26), které znázorňují vypočtený průběh teplot ve vzorku. V každém grafu je patrný moment, kdy dochází k odpařování vody ze vzorku. V tento moment je část energie spotřebována na změnu skupenství vody z kapalného na plynné a dochází tak k pomalejšímu ohřevu vzorku.

### Průběh ohřevu vzorku na 200 °C

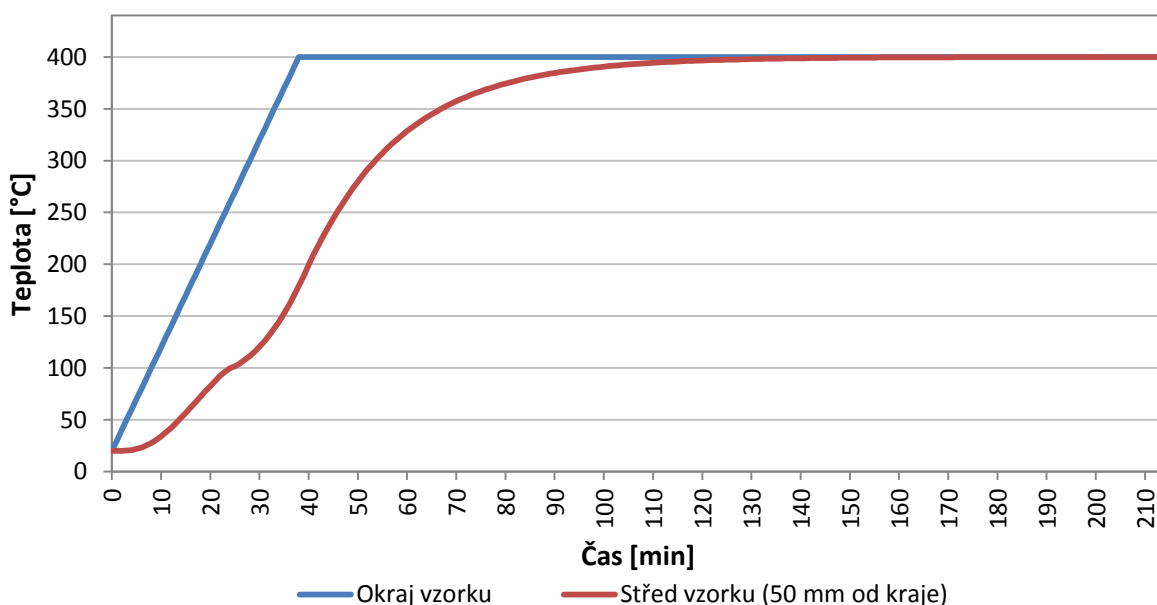


Obr. 23 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 200 °C.

Při ohřevu vzorku na 200 °C se střed vzorku ohřeje na potřebnou teplotu přibližně po 120 minutách, kdy podle výpočtu dosáhne teplota středu 199,6 °C. Rezerva zde tvoří necelých 80 minut, které kompenzují skutečné vlivy okolního prostředí.

Pro ohřátí středu vzorku na 400 °C je třeba přibližně 160 minut, kdy teplota dosáhne 399,6 °C. Rezerva činí téměř 60 minut.

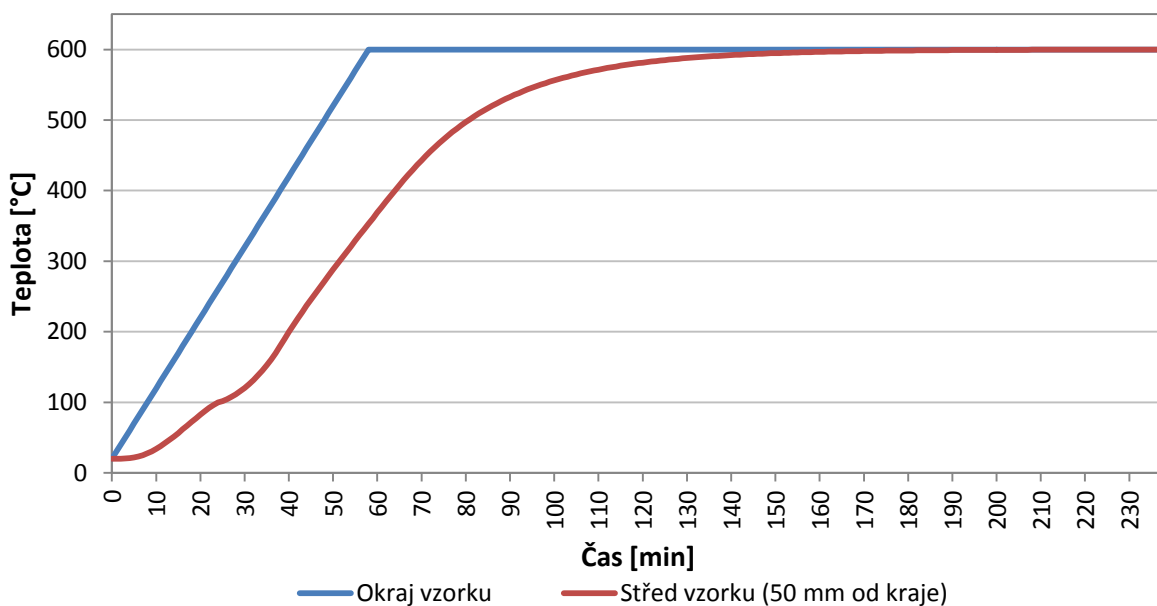
### Průběh ohřevu vzorku na 400 °C



Obr. 24 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 400 °C.



### Průběh ohřevu vzorku na 600 °C

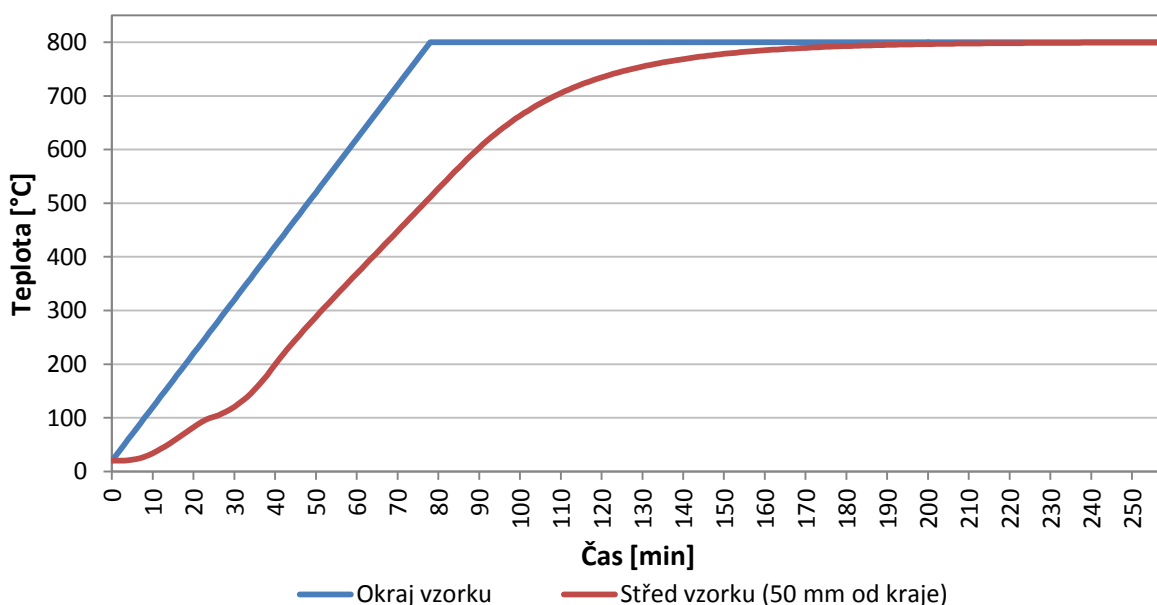


Obr. 25 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 600 °C.

Pro ohřátí středu vzorku na 600 °C je třeba přibližně 200 minut, kdy teplota dosáhne 599,5 °C. Rezerva činí téměř už jen 40 minut.

Pro ohřátí středu vzorku na 800 °C je potřeba v podstatě veškerý čas. Na konci simulace dosáhne střed vzorku teploty 799,6 °C. Na první pohled se to zdá být málo, ale je třeba podotknout, že teplota větší než 795 °C se ve středu vzorku vyskytuje více než 60 minut.

### Průběh ohřevu vzorku na 800 °C



Obr. 26 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 800 °C.

Z těchto výsledků je patrné, že zvolená doba ohřevu by měla být dostačující. Ovšem je třeba podotknout, že tyto výsledky nereprezentují skutečnost. V tomto výpočtu je uvažováno, že se veškerá tepelná energie absorbuje do vzorku. To ovšem není pravda, část této energie uniká do okolního prostředí. Je tedy vhodné mít rezervu, což podle grafů vypadá, že bylo splněno.

## 4.1 Příprava vzorků

Vzorky byly vybetonovány přibližně 9 měsíců před plánovaným zkoušením. Betonové směsi (dle Tab. 3) byly vylity do ocelového bednění a po 24 hodinách bylo bednění odstraněno. Poté byly vzorky uchovány v laboratoři s přibližně stálou teplotou a relativní vlhkostí (20 °C a 50 %), kde přirozeně vysychaly.

Veškeré vzorky byly popsány permanentním popisovačem písmenem C, V nebo P a pořadovým číslem. Písmenem C byly popsány vzorky z prostého betonu, písmenem V vzorky vláknobetonu vyztuženým PP vlákny a písmeno P bylo napsáno na vzorky z provzdušněného betonu.

Před samotným zkoušením proběhlo měření a vážení vzorků. U každého vzorku byla změřena jeho výška a průměr pomocí digitálního posuvného měřítka s přesností na desetiny milimetru. Dále byly vzorky zváženy na digitální váze s přesností na 0,05 gramu.



Obr. 27 – Vážení vzorku



Obr. 28 – Skupina vzorků

## 4.2 Průběh experimentu

Před začátkem ohřevu bylo potřeba připravit vzorek. Vzorek bylo třeba nejprve obalit dvěma keramickými dečkami co nejtěsněji, aby bylo zajištěno co největší vedení tepla do vzorku. Dále byl vzorek i s keramickými dečkami pevně obalen skelnou vatou (vysoce odolnou vůči teplotě) o tloušťce 30 mm. Skelná vata byla stabilizována pomocí drátu a lepicí pásky (viz Obr. 29). Na skelnou vatu byl permanentním popisovačem přepsán kód vzorku. Při ohřívání vzorku na vysokou teplotu by už nápis na jeho povrchu nebyl čitelný z důvodu vypálení lihu při dosažení vysoké teploty.



Obr. 29 – Vzorek zabalený do keramické dečky (vlevo) a vzorky připravené ke zkoušce (vpravo).

Vzorek byl ohříván pomocí keramických deček napojených na stroj Mannings HTC (viz Obr. 30) o výkonu 70 kW, který zajišťuje energii pro ohřátí topného kabelu v keramických dečkách. Do tohoto stroje byly zapojeny termočlánky typu K, které byly zavedeny do dutiny v keramické dečce. Pomocí tohoto termočlánku stroj Mannings HTC reguluje rychlost ohřívání, která byla nastavena na hodnotu 1000 K/min.



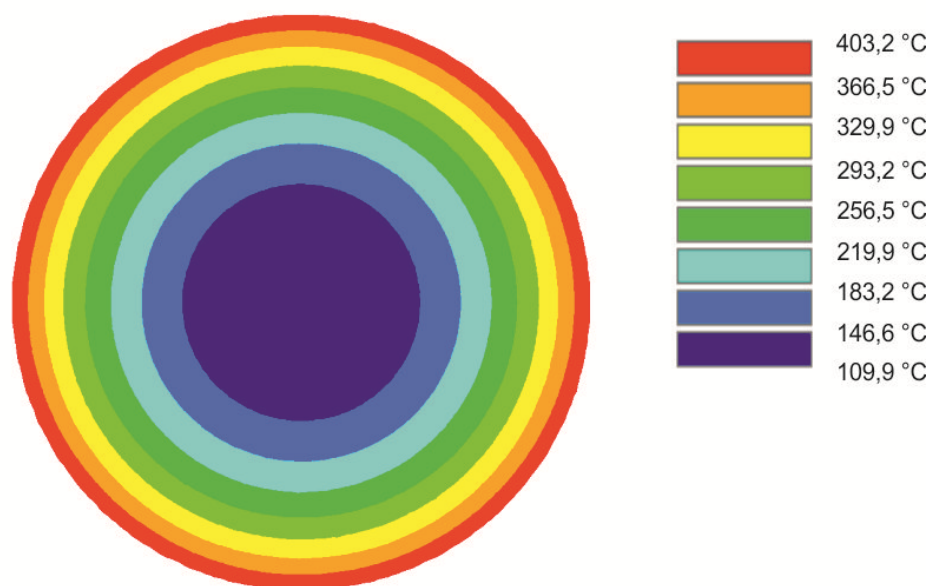
Obr. 30 – Ohřívací zařízení Mannings HTC a detail displeje ukazujícího teploty zapojených termočlánků.

První vzorek byl ohříván na teplotu 800 °C. Bohužel ale vzorek náhle explodoval při povrchové teplotě přibližně 400 °C. Ve vzorku v tu dobu musel být extrémně vysoký pórový tlak a teplotní gradient, který byl způsoben vysokou rychlostí ohřevu. Stav vzorku je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 31 – Stav vzorku po odštěpení [33].

Dle výpočtu v programu SAFIR 2011 je vidět, že v moment odštěpení byla povrchová teplota přibližně 400 °C, kdežto teplota ve středu vzorku pouze lehce přes 100 °C (viz Obr. 32). To znamená, že vzorek explodoval v momentě, kdy se začala uvnitř vzorku vypařovat volná a částečně i fyzikálně vázaná voda. To způsobilo prudký nárůst pórových tlaků, kterým prostý beton neodolal.



Obr. 32 – Vypočtené teplotní pole ve vzorku v momentě odštěpení (software SAFIR 2011).

Při zkouškách všech dalších vzorků byla snížena rychlost ohřevu na 600 K/min, aby nedošlo k odštěpení u dalších vzorků. Při této rychlosti ohřevu už k žádnému odštěpení nedošlo.

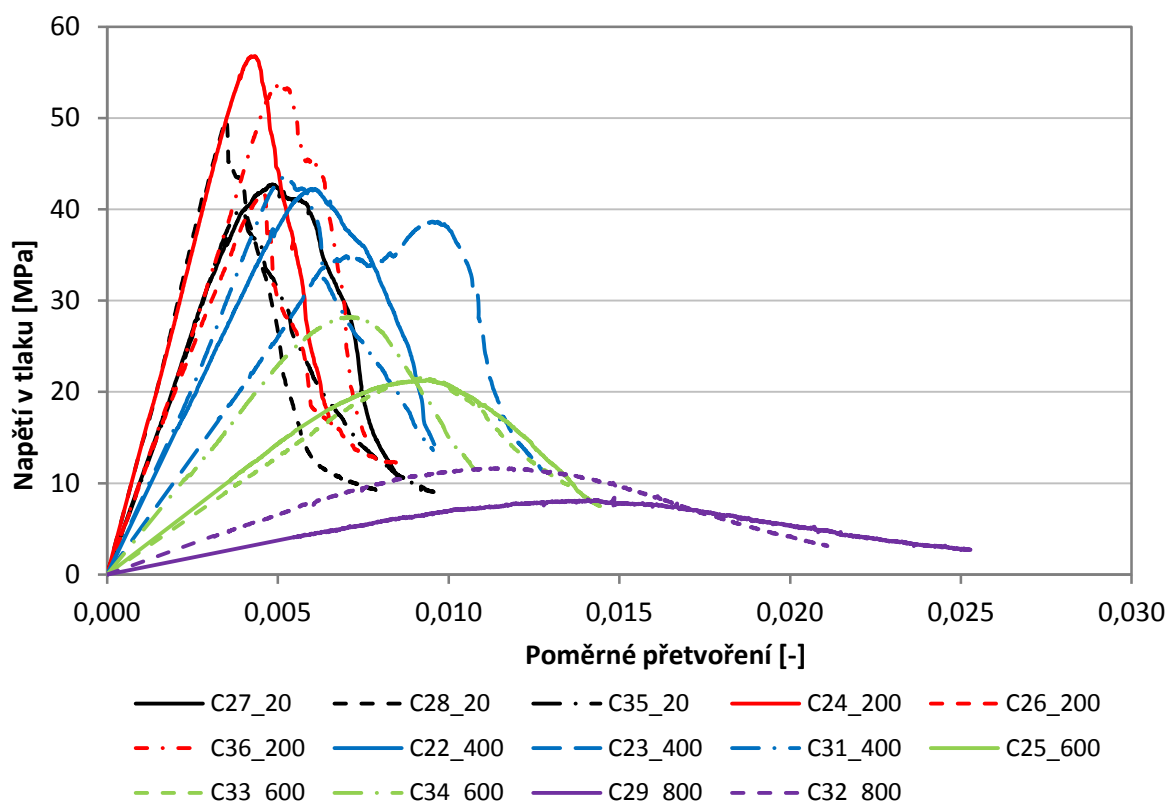
Po ukončení ohřívání byla odstraněna tepelná izolace a keramické dečky. Dále se vzorek opět zabalil do skelné vaty o tloušťce 30 mm, aby po čas zkoušení neztrácel rychle teplo. Tato tepelná izolace byla aplikována pouze po obvodě pláště válcového vzorku, aby nepřekážela při zatěžování vzorku. Vzorek v tepelné izolaci byl umístěn do počítačem ovládaného lisu Inova 200 F (viz Obr. 33), který aplikoval zatížení. Díky vyrytým kruhovým soustředným drážkám na spodní čelisti lisu bylo snadné vycentrovat vzorek. Vzorek byl zatěžován při konstantní deformaci 0,02 mm/s. Po selhání vzorku bylo zatěžování ručně ukončeno. Po celou dobu tohoto procesu byla kontrolována povrchová teplota vzorku digitálním laserovým teploměrem. Vzhledem k tomu, že celý proces, od odstranění keramických deček po selhání vzorku, netrval více než 5 minut, klesla povrchová teplota vzorku jen mírně. Jádru vzorku se ochladilo pravděpodobně pouze o pár stupňů za tuto dobu.



*Obr. 33 – Lis Inova 200 F (vlevo) a vzorek umístěný v lisu (vpravo).*

### 4.3 Výsledky experimentu

Získaná data z měření vzorků z prostého betonu byla zaznamenána v pracovním diagramu (viz Obr. 34). Z výsledků vzorků zatěžovaných při 20 °C a 200 °C je vidět, že s rostoucím přetvořením napětí přímo úměrně roste až do maximální tlakové pevnosti a poté opět rychle a téměř lineárně klesá. Dále je nutno zmínit znatelný nárůst pevnosti v tlaku vzorků zkoušených při teplotě 200 °C oproti vzorkům zkoušeným za běžné teploty. A to téměř o 20 %. To je dáno tím, že při teplotách do 300 °C dochází k dodatečné hydrataci dosud nehydratovaných cementových jader vlivem vypařování volné a částečně i fyzikálně vázané vody [34].

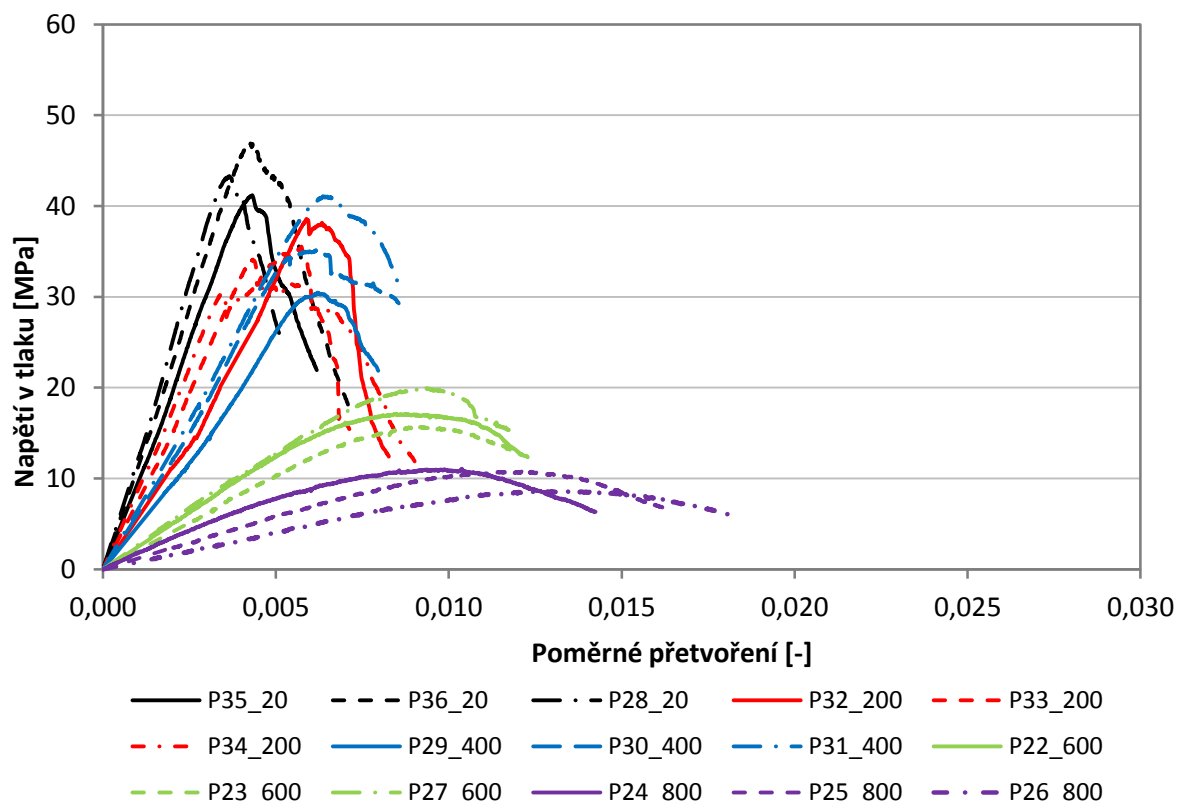


Obr. 34 – Naměřené hodnoty vzorků z prostého betonu. Přeloženo z [33].

Pracovní diagram vzorků ohříváných na 400 °C vykazuje nižší modul pružnosti (je více protáhlý) a pevnost v tlaku dosahuje mírně nižších hodnot než za běžné teploty.

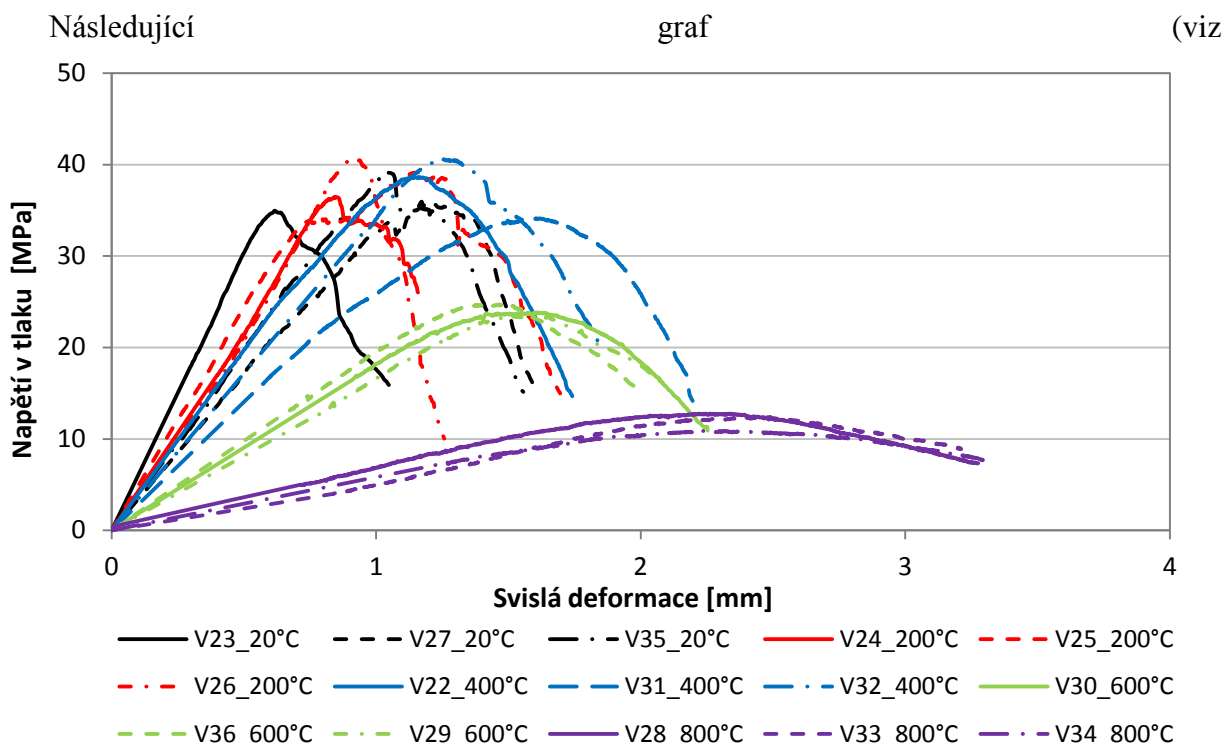
Při teplotách vyšších než 400 °C začínají vznikat v betonu mikrotrhliny, které mají přímý vliv na snižování pevnosti betonu v tlaku [34]. Tento vliv s dalším růstem teploty roste. V rozmezí od 580 °C do 900 °C dochází k dekarbonataci betonu a rozkladu vápenných hydrátů [34]. Tyto jevy lze pozorovat na výsledcích vzorků při 600 °C a 800 °C. Modul pružnosti betonu se dále snižuje a roste jeho duktilita, díky které je menší pravděpodobnost kolapsu konstrukce. Pevnost betonu v tlaku při 800 °C je dle výsledků přibližně pětina než za běžné teploty.

Na Obr. 35 můžeme vidět výsledné pracovní diagramy zkoušených vzorků z provzdušněného betonu. Lze si všimnout, že už za běžné teploty dosahuje tlaková pevnost nepatrně nižších hodnot než u prostého betonu. To je dáno vyšší pórovitostí provzdušněného betonu.



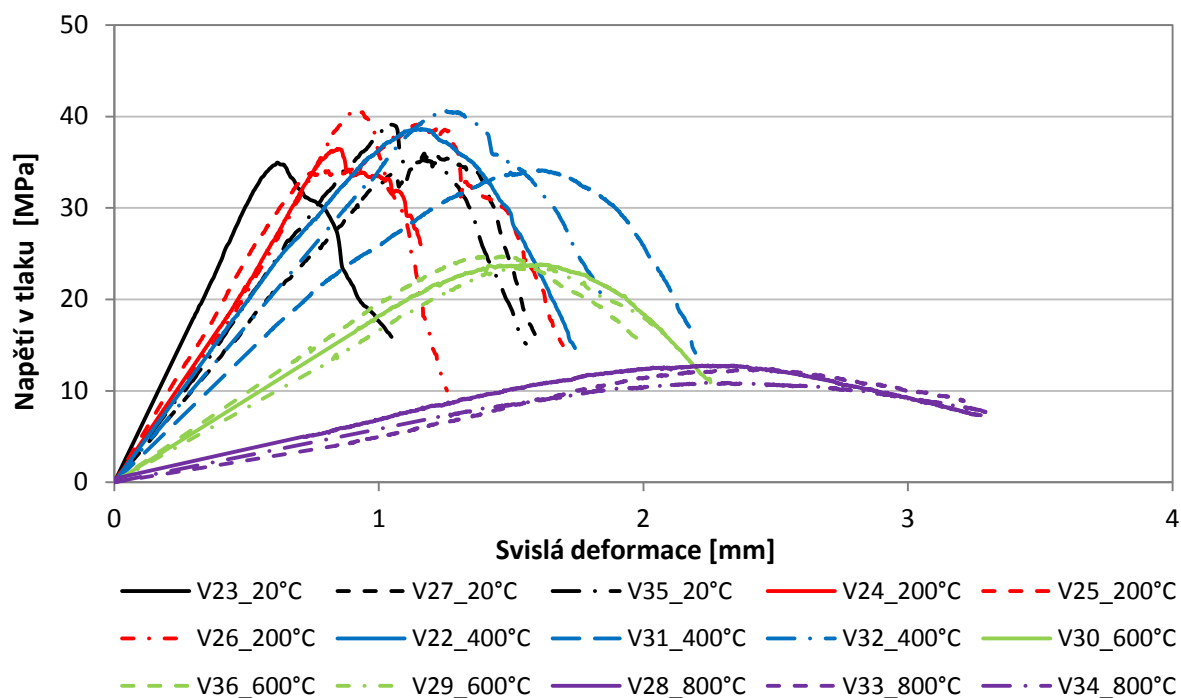
Obr. 35 – Naměřené hodnoty vzorků z provzdušněného betonu. Přeloženo z [33].

Dále je nutno podotknout, že při ohřevu vzorků z provzdušněného betonu na 200 °C nedošlo k mírnému nárůstu pevnosti, jak tomu bylo u prostého betonu. Zajímavé je, že tlaková pevnost vzorků při 200 °C a 400 °C zůstala totožná. Taktéž je vidět, že téměř stejný zůstal i modul pružnosti. Při vyšších teplotách už pouze klesala pevnost v tlaku a rostla duktilita. Duktilita dosáhla nižších hodnot než u prostého betonu.



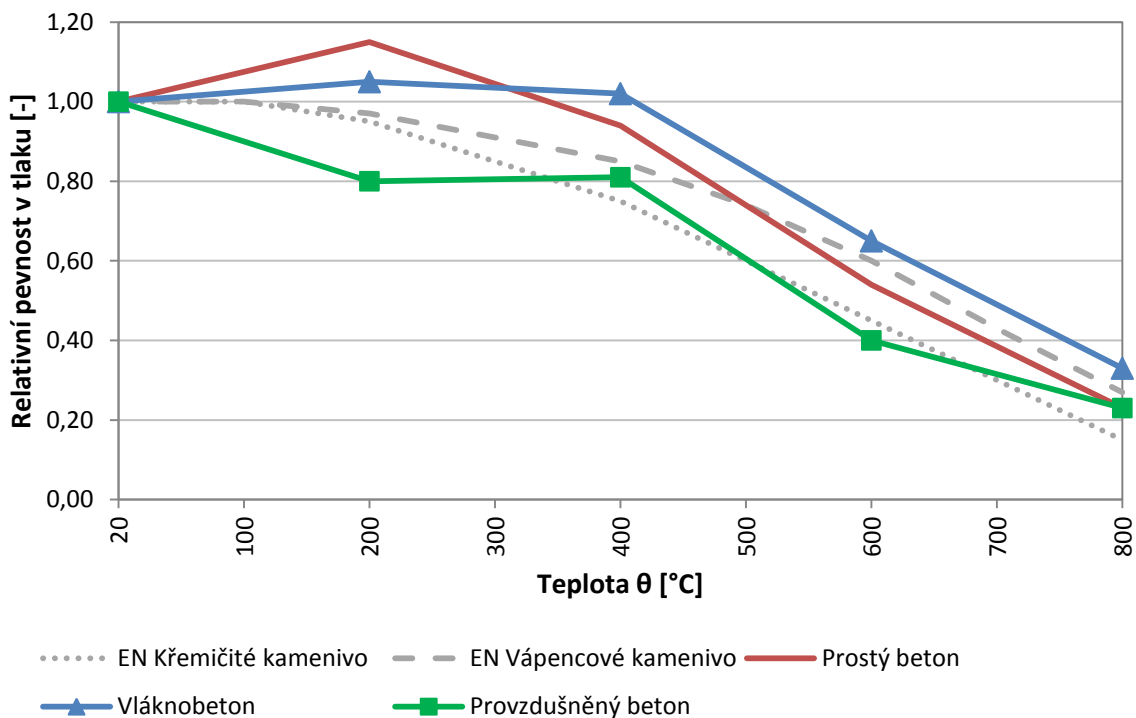
Obr. 36 na další straně) znázorňuje výsledky vzorků z betonu vyztuženého PP vlákny. Už u vzorků měřených za běžné teploty došlo k poklesu pevnosti v tlaku oproti prostému betonu. Chování vzorků z vláknobetonu při 200 °C a při 400 °C je velmi zajímavé. Při těchto teplotách vykazuje vláknobeton přibližně stejnou nebo dokonce i vyšší pevnost v tlaku, než za běžné teploty. To se děje díky PP vláknům, která snižují možnost vzniku trhlin a vzhledem k tomu, že jejich teplota tavení je přibližně 150 °C a teplota vznícení přibližně 400 °C, tak po jejich vyhoření vzniknou póry, které umožňují lepší průchod vodních par a snižují tak pórový tlak ve vzorku [34]. S dalším růstem teploty se vláknobetonové vzorky chovají obdobně jako provzdušněný beton. Jediným rozdílem je, že při teplotě 600 °C zůstává modul pružnosti stejný, jako při 400 °C, nebo jen nepatrně klesne.





Obr. 36 – Naměřené hodnoty vzorků z vláknobetonu. Přeloženo z [35].

Na Obr. 37 můžeme vidět porovnání všech třech zkoušených druhů vzorků a jejich porovnání s Eurokódem 2 [3]. Na první pohled je vidět, že do teploty 300 °C vede v tlakové pevnosti prostý beton, kterému takovéto teploty díky dodatečným chemickým procesům svědčí.



Obr. 37 – Porovnání naměřených hodnot s Eurokódem. Hodnoty převzaty z [3, 33, 35].

Dále je vidět, že prostý beton v tomto experimentu vykazuje vyšší tlakovou pevnost v celém rozsahu experimentu než hodnoty betonu s křemičitým kamenivem (které bylo použito pro zkušební vzorky) uvedené v Eurokódu 2 [3].

V tomto experimentu prokázal celkově nejlepší výsledky vláknobeton. Ten sice při teplotě do 400 °C neprokázal takový nárůst tlakové pevnosti jako prostý beton, ale PP vlákna (ať už před vyhořením nebo až po vyhoření) redukovala pórové tlaky a vznik trhlin ve vzorku, což má za následek vyšší pevnost v tlaku při vyšších teplotách i přes zvýšenou pórovitost betonu.

Z porovnání na předchozí straně je patrné, že provzdušněný beton odolával vlivům teploty nejhůře. Jeho příliš vysoká pórovitost se projevila na tlakové pevnosti už od počátku. Výhodou oproti prostému betonu je vyšší odolnost proti odštěpení. Tu ovšem nelze v tomto porovnání znázornit.

## 4.4 Závěr experimentu

V tomto experimentu se ukázalo, že relativně nízká teplota (do 300 °C) prostému betonu dokonce prospívá ve smyslu tlakového napětí. To proto, že při těchto teplotách v betonu dochází k dodatečné hydrataci dosud nehydratovaných cementových jader vlivem vypařování volné a částečně i fyzikálně vázané vody [34]. Od teploty cca 400 °C a výše klesá tlaková pevnost prostého betonu přibližně lineárně se zvyšující se teplotou.

Výsledky zkoušek vláknobetonu vyztuženého PP vláknou ukázaly, že při teplotě do 400 °C prakticky nedochází k redukci tlakové pevnosti. Při těchto teplotách dochází k vyhoření všech PP vláken v betonu, díky čemuž vzniknou póry, které umožňují snižování pórových tlaků. Vláknobeton je také méně náchylný na vznik trhlin. Tyto faktory včetně výše zmíněné dodatečné hydratace mohou omezit (nebo i zvrátit) snižování pevnosti v tlaku. A z tohoto experimentu je patrné, že se jim to daří až do teploty 400 °C. Poté už převládá vliv vysoké teploty a tlaková pevnost s rostoucí teplotou přibližně lineárně klesá.

Provzdušněný beton v tomto experimentu prokázal nejhorší pevnost v tlaku při zvýšené teplotě. Je to dáno jeho vysokou pórovitostí. Je nutno upozornit, že poměrná pevnost v tlaku zkoušeného provzdušněného betonu byla při teplotách 200 °C a 600 °C dokonce nižší, než jaké hodnoty uvádí Eurokód 2 [3] (viz Obr. 37 na předchozí straně).

Při experimentu se ukázalo, že rychlost ohřevu může být zcela zásadní pro zkoušení betonu za vysoké teploty. Původně bylo v plánu ohřívat vzorky rychlostí 1000 °C/hod, což přibližně odpovídá rychlosti normové teplotní křivky ISO 834. Ale vzorek z prostého betonu to nevydržel a prokázal masivní odštěpení. Poté byla snížena rychlost ohřevu na 600 °C/hod. Při této rychlosti ohřevu už k žádnému odštěpení nedošlo.

V některých výzkumech je použito dražší vybavení (elektrické pece). Nebo dokonce je v rámci výzkumu zhotoveno unikátní zařízení, které kombinuje vlastnosti pece a zkušebního a měřicího zařízení v jednom. Ale tento experiment dokazuje, že i při použití relativně levného vybavení (keramické dečky) lze tyto zkoušky provést a získat tak kvalitní (věrohodné) výsledky.

## 5 Experiment 2 – reziduální pevnost v tlaku

Tento experiment byl zvolen z důvodu porovnání pevnosti v tlaku betonu za zvýšené teploty a reziduální pevnosti v tlaku. Tento experiment nenavazuje na experiment 1, uvedený v této práci, jak by se mohlo na první pohled zdát, ale navazuje na experiment Ing. Josefa Nováka, Ph.D., který byl proveden přibližně před rokem.[8]

V minulém experimentu byly použity vzorky krychelného tvaru o hraně 150 mm. Tento rozměr vyhovuje ČSN EN 12390-1 [12]. Byly použity celkem 3 směsi betonu (viz Tab. 4). Prostý beton, beton vyztužený ocelovými vlákny a beton vyztužený PP a ocelovými vlákny (dále uváděno jako hybridně vyztužený beton). Každá směs byla zkoušena při teplotách 200 °C, 400 °C a 600 °C. A dále ještě za běžné teploty pro porovnání výsledků.[8]

Tab. 4 – Složení zkoušených vzorků. Hodnoty převzaty z [8].

Složky betonu	Přítomnost složky		
	Vzorek 1 (prostý beton)	Vzorek 2 (Ocelová vlákna)	Vzorek 3 (PP+ocelová vlákna)
Portlandský cement	✓	✓	✓
Voda	✓	✓	✓
Kamenivo 0-4 mm	✓	✓	✓
Kamenivo 4-8 mm	✓	✓	✓
Kamenivo 8-16 mm	✓	✓	✓
Plastifikátor	✓	✓	✓
Ocelová vlákna	✗	✓	✓
Polypropylenová vlákna	✗	✗	✓

Přidáním ocelových vláken do betonu je možné dosáhnout lepších reziduálních mechanických vlastností za zvýšené teploty. Díky tomu, že teplota tavení oceli je přibližně 1500 °C [36], tak ocelová vlákna v betonu zůstanou při vysoké teplotě ve stejném množství jako za běžné teploty. Ocelová vlákna v betonu zvyšují duktilitu a v případě odštěpení drží beton pospolu. Další výhodou je, že ocelová vlákna mají vyšší tepelnou vodivost než cement a díky tomu je vzorek rovnoměrněji prohříván. To má za následek snížení teplotního gradientu ve vzorku a tím pádem dochází ke zmírnění vzniku trhlin a snížení možnosti odštěpení. Nicméně ocelová vlákna nemají zdaleka takový účinek zabránění odštěpení jako PP vlákna.[34]

Použitím kombinace ocelových a PP vláken lze využít výhod obou druhů výtzuže. Ocelová vlákna zvýší mechanické vlastnosti za zvýšené teploty a PP se postarají o větší odolnost vůči odštěpení betonu.[8]

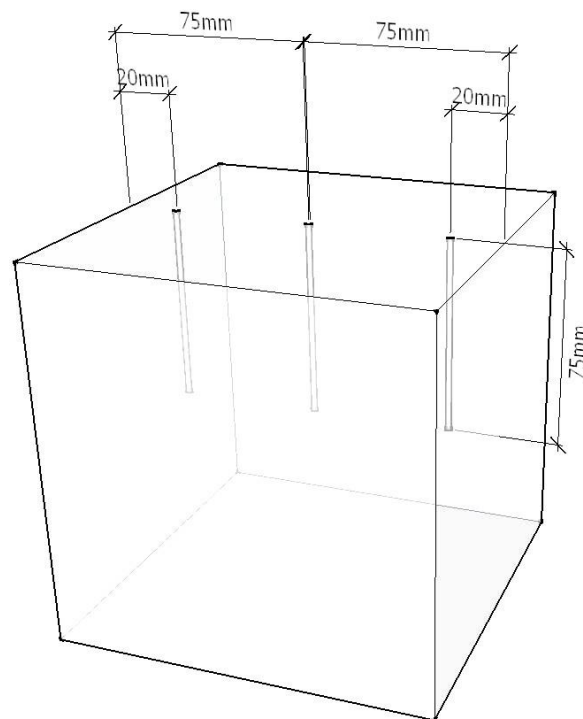
Jak již bylo zmíněno, v předešlé části experimentu bylo provedeno zkoušení betonových vzorků na tlakovou pevnost za zvýšené teploty. Nyní se experiment zabýval zkoušením stejných vzorků na reziduální pevnost v tlaku. Byly použity vzorky stejných směsí, které byly vybetonovány už v předchozí části experimentu a nebyly použity. Jediné, co se na vzorcích liší,

je jejich stáří. Stáří předešlých vzorků bylo přibližně jeden rok. Stáří nyní použitých vzorků je přibližně dva roky. Díky tomu by se výsledky obou experimentů měly lišit pouze vlivem toho, zda byly zkoušeny za tepla, nebo až po vychladnutí.

## 5.1 Ohřev vzorků

V tomto experimentu bylo použito dvou různých rychlostí ohřevu. Rychlejší ohřev probíhal rychlostí 1000 °C/hod a poté byla udržována konstantní teplota (vždy o 20 °C vyšší než požadovaná teplota) po dobu 260 minut pro ohřev na 600 °C a po dobu 220 minut pro ohřev na 400 °C. Dále byl zvolen pomalejší způsob ohřevu. Tento ohřev byl skokový a jeho průměrná rychlost byla 200 °C/hod.

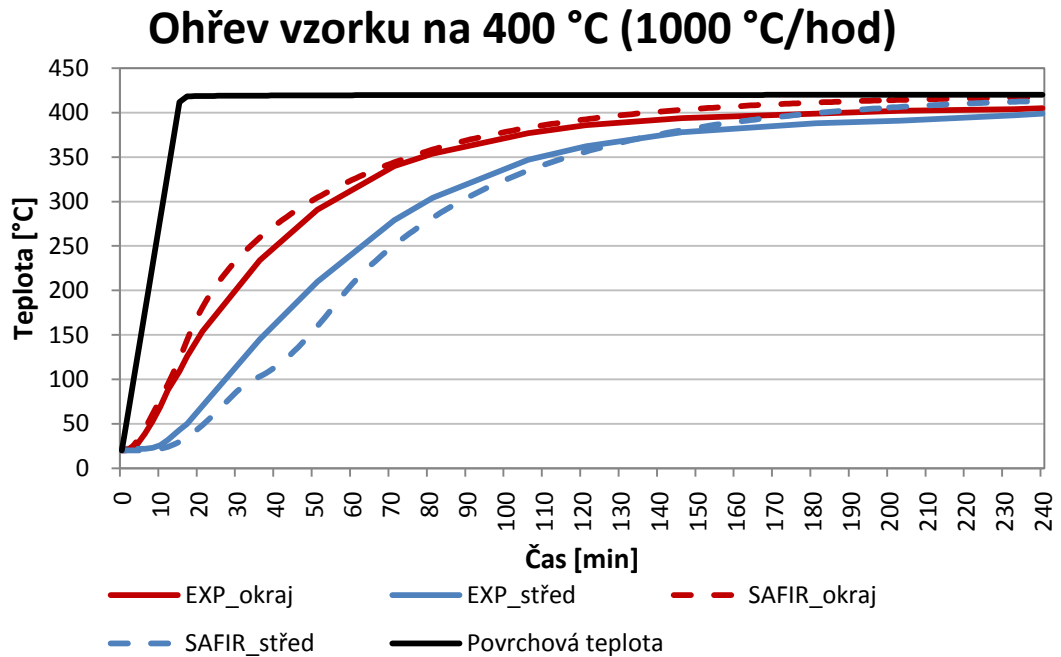
Ještě před samotným zkoušením vzorků byl proveden cvičný ohřev vzorků, kdy do vzorků byly vyvrtány 3 otvory, do kterých byly umístěny termočlánky dle Obr. 38. Dva termočlánky měřily teplotu vzorku 20 mm od kraje vzorku a jeden byl umístěn do středu vzorku. Konce termočlánků byly ve výšce 75 mm - čili v polovině vzorku.



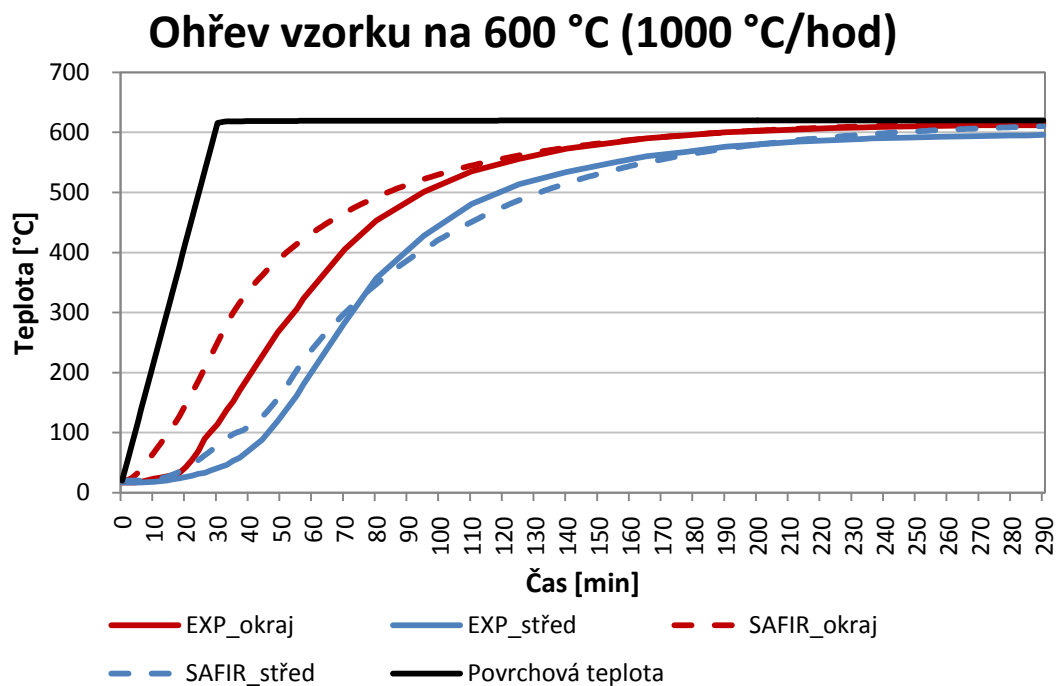
Obr. 38 – Umístění termočlánků uvnitř vzorku při cvičném ohřevu.

Společně s cvičným ohřevem vzorků byl také proveden výpočet ohřevu vzorků v softwaru SAFIR 2011. Výsledná porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot jsou znázorněna na grafech na dalších stranách. Hodnoty grafu uvádějí hodnoty pro povrchovou teplotu, kterou byl vzorek ohříván, dále teploty uvnitř vzorku měřené 20 mm od kraje – tyto hodnoty jsou označeny jako „okraj“ a teploty ve středu vzorku – tyto hodnoty jsou označeny jako „střed“. Cvičný ohřev probíhal na vzorcích z hybridně vyztuženého betonu (ocelová + PP vlákna).

Následující graf znázorňuje skutečné a vypočtené teploty při ohřevu rychlostí 1000 °C/hod na teplotu 400 °C. Z tohoto porovnání je patrné, že na okraji vzorku je vypočtená teplota mírně vyšší oproti skutečné teplotě. Ve středu vzorku je tomu jinak. Výpočetní software nejprve ukazuje nižší teploty a až v posledních 80 minutách je vypočtená teplota opět o trochu vyšší než skutečná. Skutečné teploty na konci cvičného ohřevu byly pro okraj a střed vzorku 405 °C a 399 °C. Vypočtené teploty byly vyšší – konkrétně 417 °C pro okraj a 413 °C pro střed vzorku.

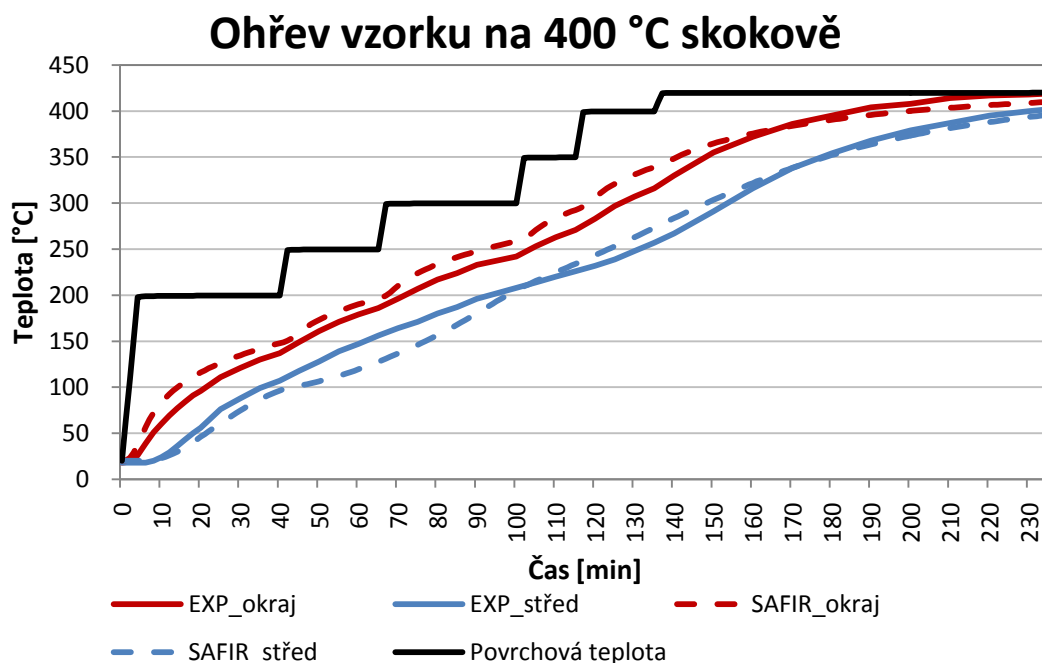


Obr. 39 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při ohřevu na 400 °C.

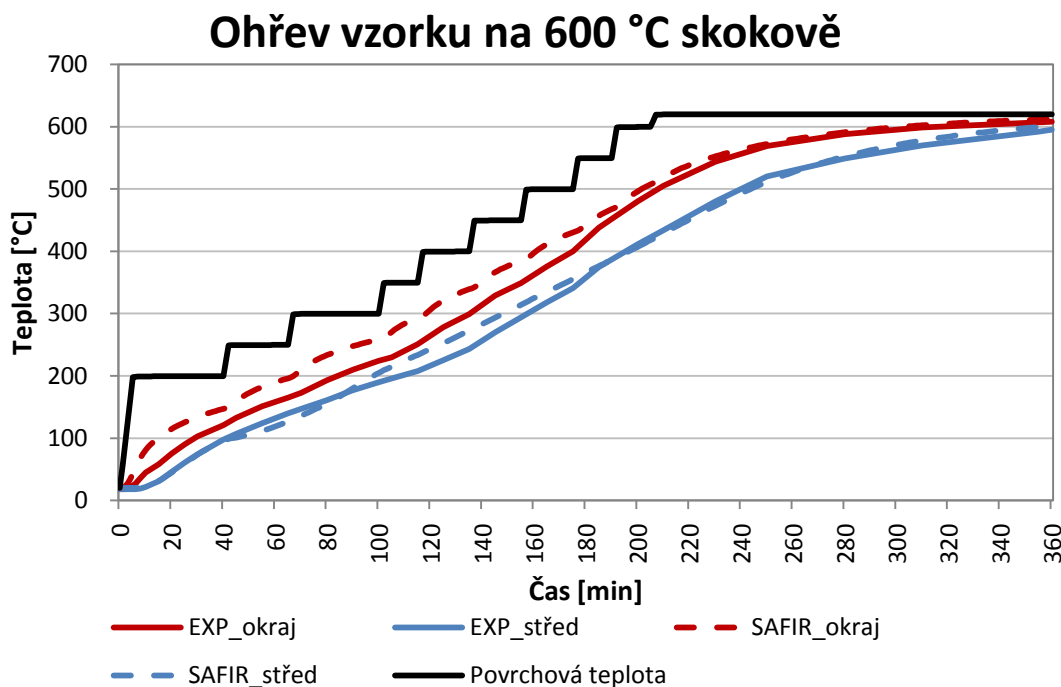


Obr. 40 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při ohřevu na 600 °C.

Je vidět, že výsledky grafů ohřevu rychlostí 1000 °C/hod na teplotu 400 °C a 600 °C jsou obdobné (viz Obr. 39 a Obr. 40). Nicméně u ohřevu na 600 °C je výrazný rozdíl mezi skutečnými a vypočtenými teplotami v počáteční fázi ohřevu – cca do 80 minuty. Konečné teploty jsou si ale blízké. U cvičného ohřevu na 600 °C byla dosažena teplota okraje 612 °C a teplota středu 596 °C. Vypočtené teploty byly 616 °C pro okraj a 610 °C pro střed vzorku.



Obr. 41 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při skokovém ohřevu na 400 °C.



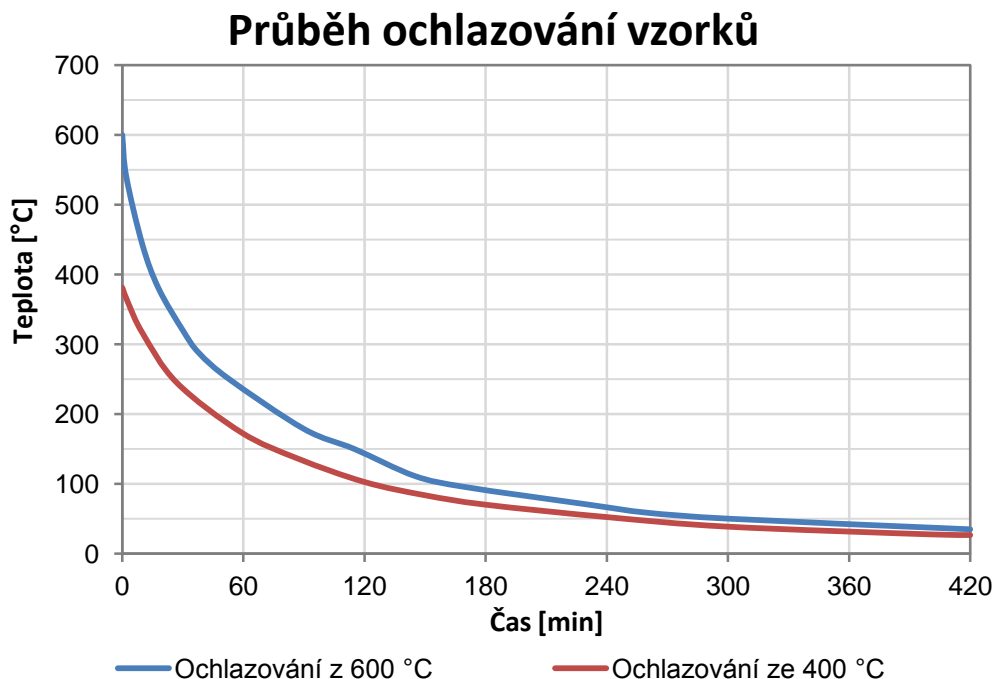
Obr. 42 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při skokovém ohřevu na 600 °C.

Na Obr. 41 a Obr. 42 jsou průběhy skutečných a vypočtených teplot pro skokový ohřev na teplotu 400 °C a 600 °C. Průměrná rychlost tohoto ohřevu je přibližně 200 °C/hod. U těchto grafů je patrné, že vypočtené a skutečné hodnoty se od sebe liší méně, než tomu bylo u ohřevu rychlostí 1000 °C/hod. Při porovnání hodnot na okraji vzorku (20 mm od povrchu vzorku) je vidět, že vypočtená teplota je téměř v celém rozsahu nepatrně vyšší. V posledních přibližně 60 minutách se to změní a skutečná teplota dosahuje vyšších hodnot. To platí pouze pro ohřev na 400 °C. U ohřevu na 600 °C jsou i na konci ohřevu vyšší teploty vypočtené než skutečné.

Při skokovém ohřevu na 400 °C byly skutečné teploty na konci ohřevu 419 °C na okraji a 402 °C ve středu vzorku, kdežto vypočtené hodnoty byly 410 °C na okraji a 396 °C ve středu vzorku. To mohlo být způsobeno nepřesným umístěním termočlánku, který řídil ohřev. Termočlánek tak měřil nižší hodnoty, než byly ve skutečnosti na povrchu vzorku a tak byl vzorek více ohříván.

Při skokovém ohřevu na 600 °C byly naměřeny teploty na konci ohřevu 608 °C na okraji a 595 °C ve středu vzorku. Vypočtené teploty byly mírně vyšší – konkrétně 612 °C na okraji a 601 °C ve středu vzorku.

Jak již bylo zmíněno výše, tato část experimentu byla věnována zkoušení reziduální tlakové pevnosti betonu. Proto byly vzorky po zahřátí umístěny do místnosti s běžnou teplotou (přibližně 16 °C - 20 °C) a samovolně se ochlazovaly po dobu 24 hodin. Pro kontrolu ochlazování bylo také zaznamenáno ochlazování vzorku v čase. To vidíme na Obr. 43. Z tohoto grafu je patrné, že po 5 hodinách samovolného ochlazování teplota středu vzorku klesne pod 50 °C. Je tedy jasné, že i teplota ve středu vzorku se po 24 hodinách ustálí na teplotě, ve které je vzorek umístěn. Vzhledem k tomu, že po 7 hodinách ochlazování je teplota středu vzorku přibližně 30 °C, pak lze říci, že by mohlo stačit i 12 hodin ochlazování.

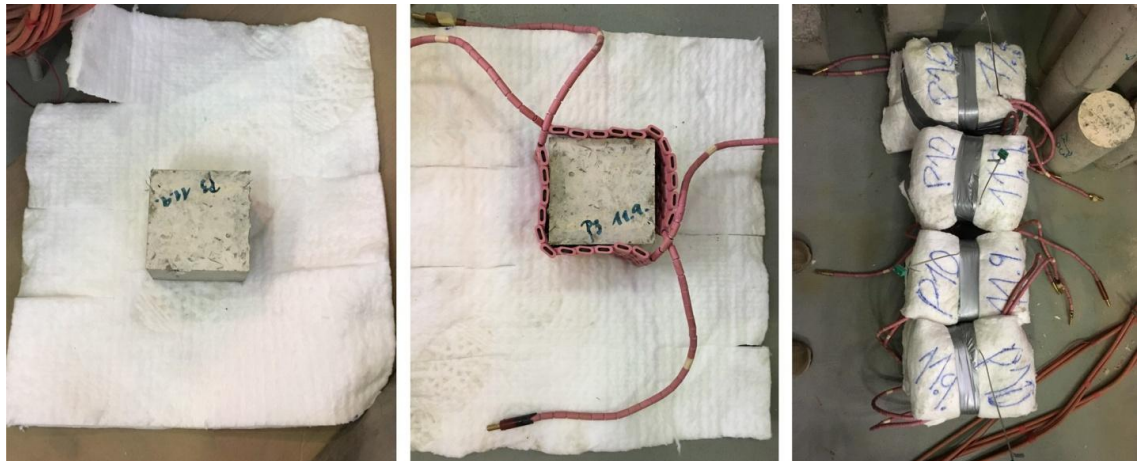


Obr. 43 – Průběh samovolného ochlazování zahřátých vzorků.

## 5.2 Průběh experimentu

Vzhledem k časové náročnosti experimentu byly v průběhu této diplomové práce zkoušeny letos pouze vzorky z hybridního vláknobetonu (ocelová + PP vlákna) při teplotách 20 °C, 400 °C a 600 °C. Všechny letošní zkoušky se věnovaly reziduální pevnosti v tlaku.

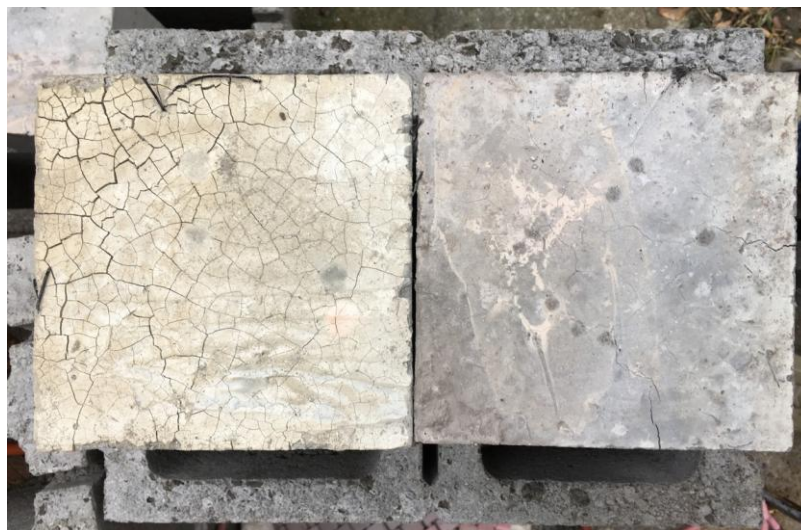
Experiment probíhal obdobně experiment 1 (viz kapitola 4.2). Jak bylo zmíněno výše, byly zkoušeny krychlové vzorky o hraně 150 mm. Ty byly opět zabaleneny do dvou keramických deček (viz Obr. 44) a poté do skelné vaty o tloušťce 25 mm.



Obr. 44 – Postup přípravy vzorků pro ohřev.

Ohřev vzorku probíhal dle schémat popsáných v předchozí kapitole. Dále byly vzorky zkoušeny buď za tepla, anebo po vychladnutí na běžnou teplotu. Tlaková zkouška probíhala stejně jako v experimentu 1 (viz kapitola 4.2).

Jediná komplikace, která nastala, bylo, že při skokovém ohřevu jednoho vzorku na teplotu 600 °C byl vzorek po dokončení ohřevu rozbalen a jeho povrchová teplota byla přibližně 700 °C (viz Obr. 45). Vzhledem k tomu, že vzorek byl nadměrně zahřátý pouze ze dvou stran, tak lze vyvodit závěr, že jedna keramická dečka tento vzorek po celou dobu ohřevu nadměrně zahřívala.

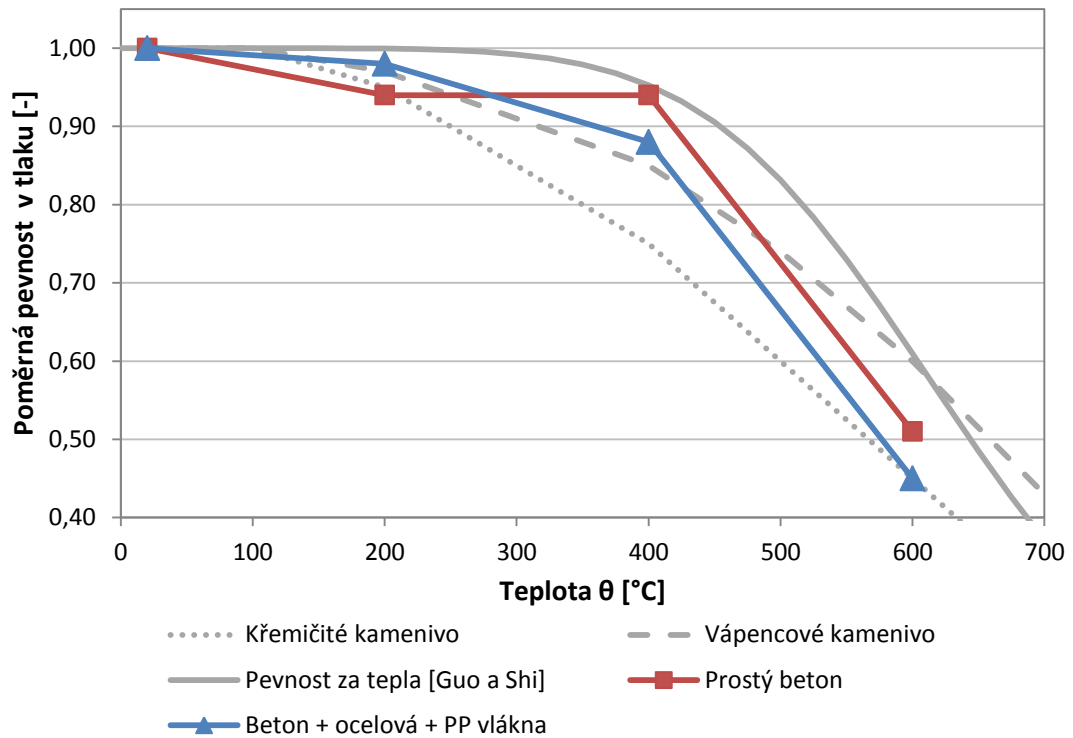


Obr. 45 – Vzorek vlevo dosáhl příliš vysoké teploty. Vzorek vpravo dosáhl požadované teploty.



### 5.3 Výsledky experimentu

Jak bylo zmíněno výše, vzhledem k časové náročnosti experimentu byly zkoušeny pouze vzorky z hybridně vyztuženého betonu při teplotách 20 °C, 400 °C a 600 °C. V minulém roce byl zkoušen veškerý výše zmíněný rozsah vzorků (viz kapitola 5). Letos byly vzorky zkoušeny na reziduální tlakovou pevnost, v minulém roce na tlakovou pevnost za tepla.

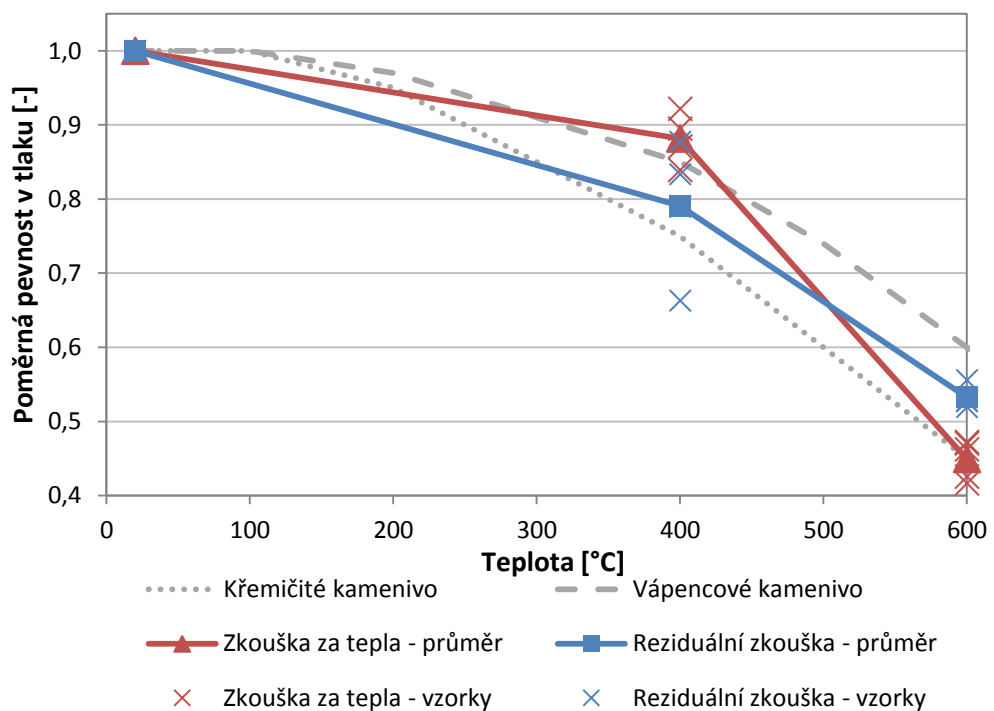


Obr. 46 – Porovnání výsledků prostého betonu a hybridně vyztuženého betonu s Eurokódem 2 a s výzkumem Guo a Shi. Hodnoty převzaty z [3, 8, 17].

Na Obr. 46 jsou znázorněny výsledky prostého betonu a hybridně vyztuženého betonu z minulého roku. Jedná se tedy o výsledky zkoušení tlakové pevnosti za tepla. V experimentu 1 nastalo u prostého betonu po zahřátí na teplotu 200 °C výrazné zvýšení tlakové pevnosti díky dodatečné hydrataci dosud nehydratovaných cementových jader [34]. Tento jev nemusí nastat vždy a tento experiment je toho důkazem. Hodnota poměrné pevnosti prostého betonu po zahřátí na 200 °C vykazovala přibližně stejnou hodnotu, jakou uvádí Eurokód 2 [3]. Zajímavé je, že stejnou hodnotu poměrné pevnosti vykazoval prostý beton i při 400 °C. Nastalo to pravděpodobně z toho důvodu, že nastala dodatečná hydratace dosud nehydratovaných cementových jader až při vyšší teplotě, než při 200 °C. Při teplotě 400 °C se prostý beton tedy dostal přibližně na stejnou hodnotu poměrné pevnosti, jakou uvádí výzkum Guo a Shi [17]. Po ohřátí vzorků z prostého betonu na teplotu 600 °C bylo dosaženo nižší poměrné pevnosti, než ukazuje výzkum Guo a Shi [17], ale vyšší než uvádí Eurokód 2 [3] pro beton s křemičitým kamenivem.

Hybridně vyztužený beton při teplotě do 400 °C dosahoval přibližně stejných hodnot poměrné pevnosti, jaké udává Eurokód 2 [3] pro beton s vápencovým kamenivem. Při teplotě 400 °C i 600 °C byla naměřena přibližně o 5 % nižší poměrná pevnost u hybridně vyztuženého betonu, než u prostého betonu. To může být vlivem vyšší pórovitosti, která vzniká vyhořením PP vláken v betonu. Celkově křivka hybridně vyztuženého betonu má podobný tvar průběhu poměrné pevnosti v závislosti na teplotě, jako ukazují hodnoty ve výzkumu Guo a Shi [17]. Liší se akorát tím, že ukazuje výrazně rychlejší pokles tlakové pevnosti vlivem rostoucí teploty.

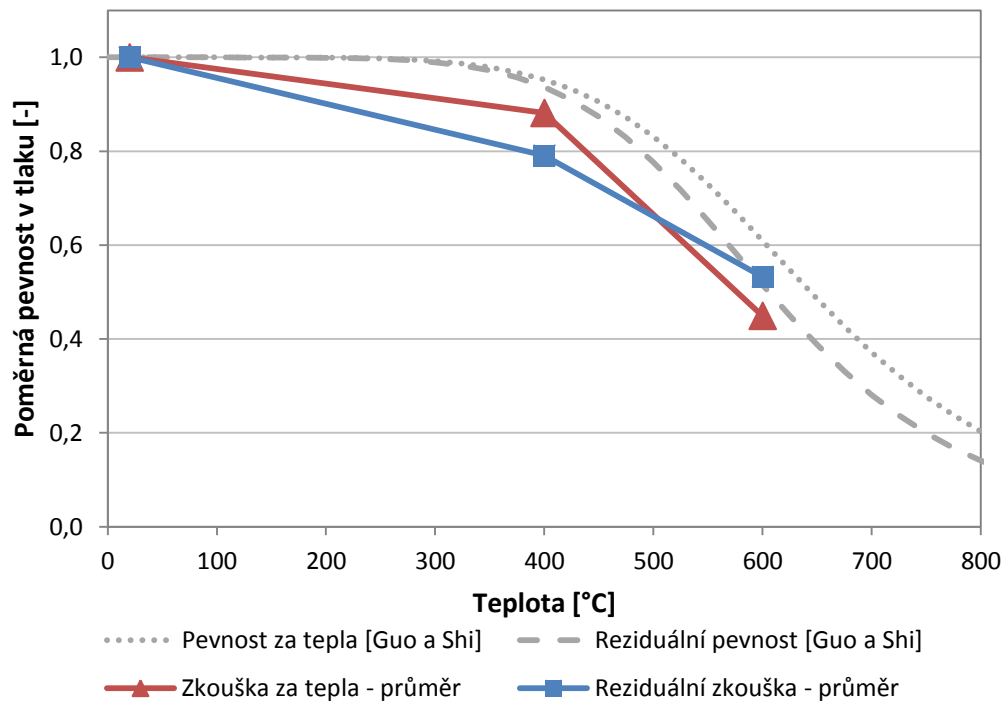
Na následujícím grafu (viz Obr. 47) je uvedeno porovnání výsledků zkoušek za tepla a po ochlazení. Jedná se tedy o letošní naměřené hodnoty. V grafu jsou vyznačeny kromě průměrné hodnoty také všechna ostatní měření. Z výsledků je patrné, že vzorky zkoušené za tepla při teplotě 400 °C vykazují vyšší pevnost, než jakou uvádí Eurokód 2 [3] pro křemičité i vápencové kamenivo. Naopak při teplotě 600 °C se výsledky dostaly na stejnou hodnotu, jaká je uvedena pro křemičité kamenivo v Eurokódu 2 [3]. Výsledky reziduálního zkoušení tlakové pevnosti při teplotě 400 °C ukazují přibližně o 10 % nižší průměrnou pevnost, než jaká byla naměřena při zkoušení za tepla. Nicméně i tato hodnota je mírně vyšší, než pevnost prostého betonu s křemičitým kamenivem dle Eurokódu 2 [3]. Zajímavé je, že při 600 °C byla naměřena vyšší reziduální tlaková pevnost, než pevnost v tlaku při zkoušce za tepla. Také je vidět, že veškeré zkoušené vzorky při této teplotě vykazovaly výrazně menší odchylky od průměrné teploty než při 400 °C.



Obr. 47 – Porovnání výsledků zkoušek za tepla a reziduálních zkoušek s Eurokódem 2. Hodnoty převzaty z [3, 8].

Na Obr. 48 na další straně jsou vyobrazeny tytéž průměrné hodnoty výsledků zkoušek za tepla a po ochlazení. Pro porovnání byly přiloženy výsledné hodnoty z výzkumu Guo a Shi [17],

kde bylo použito mnohem větší množství vzorků. Tento výzkum se mimo jiné věnoval zkoušení pevnosti betonu v tlaku za tepla i po ochlazení. Zkoušeny byly vzorky z prostého betonu [17]. Při porovnání těchto hodnot s provedeným experimentem si lze všimnout, že zkouška za tepla při teplotách 400 °C a 600 °C ukazuje přibližně o 10 % nižší výsledky než výsledky, které publikovali Guo a Shi [17]. Na druhou stranu je patrné, že průběhy zkoušek za tepla mají velmi podobný tvar. To se ovšem nedá říci o reziduální zkoušce provedené v tomto experimentu. Její výsledky vypadají, že reziduální poměrná pevnost v tlaku lineárně klesá s rostoucí teplotou. V experimentu byly naměřeny při teplotě 400 °C výrazně nižší hodnoty než ve výzkumu Guo a Shi [17], naopak při teplotě 600 °C bylo dosaženo stejných výsledků poměrné pevnosti v tlaku.



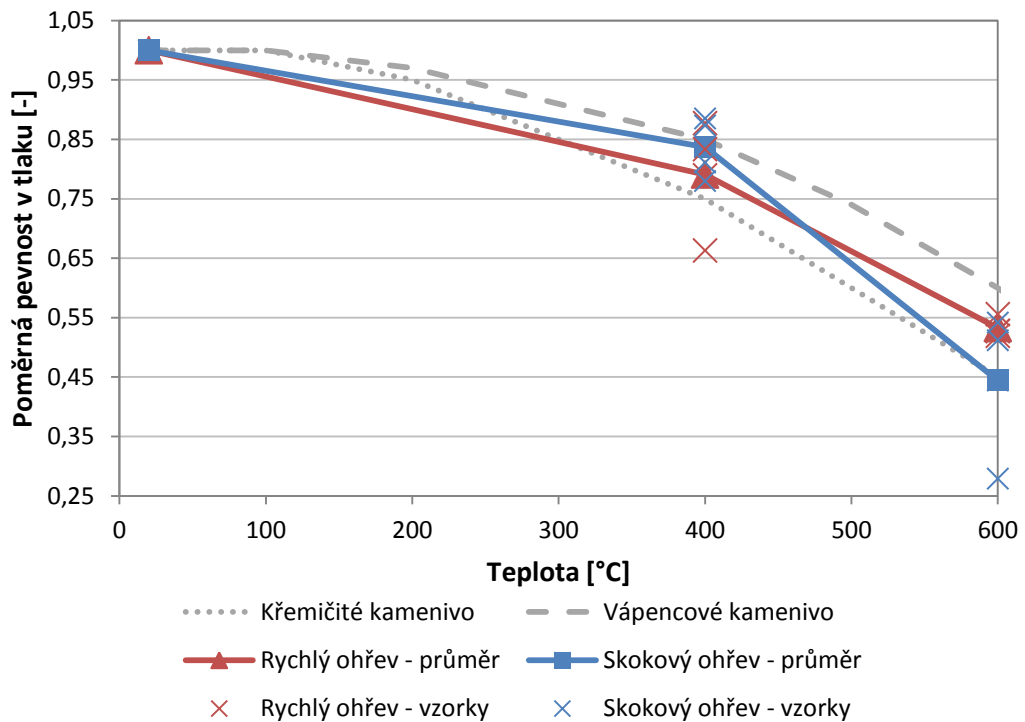
Obr. 48 – Porovnání výsledků zkoušek za tepla a reziduálních zkoušek s výzkumem Guo a Shi. Hodnoty převzaty z [17].

Mezi další výsledky tohoto experimentu patří porovnání vlivu rychlosti ohřevu na reziduální tlakovou pevnost. Jak již bylo zmíněno výše, vzorky se zahřívaly buď rychlostí 1000 °C/hod nebo skokově, kdy byla průměrná rychlost ohřevu 200 °C/hod. Logicky by se dalo uvažovat, že nižší rychlost ohřevu bude k betonovým vzorkům šetrnější. Nicméně výsledky tohoto experimentu nejsou úplně jednoznačné.

Na následujícím grafu (viz Obr. 49) můžeme vidět porovnání poměrných pevností v tlaku v závislosti na rychlosti ohřevu s hodnotami z Eurokódu 2 [3]. Hodnoty rychlého ohřevu byly použity pro minulá srovnání výsledků zkoušek za tepla a reziduálních zkoušek a byly označeny v předchozích grafech jako „Reziduální zkouška“.

Zajímavý průběh ukazuje křivka vzorků, které byly ohřívány skokově. Při teplotě 400 °C dosáhly zkoušené vzorky poměrné pevnosti přibližně o 5% vyšší než vzorky ohříváné rychle (1000 °C/hod). Opak ukazují hodnoty při skokovém ohřevu na teplotu 600 °C, kdy je výsledná

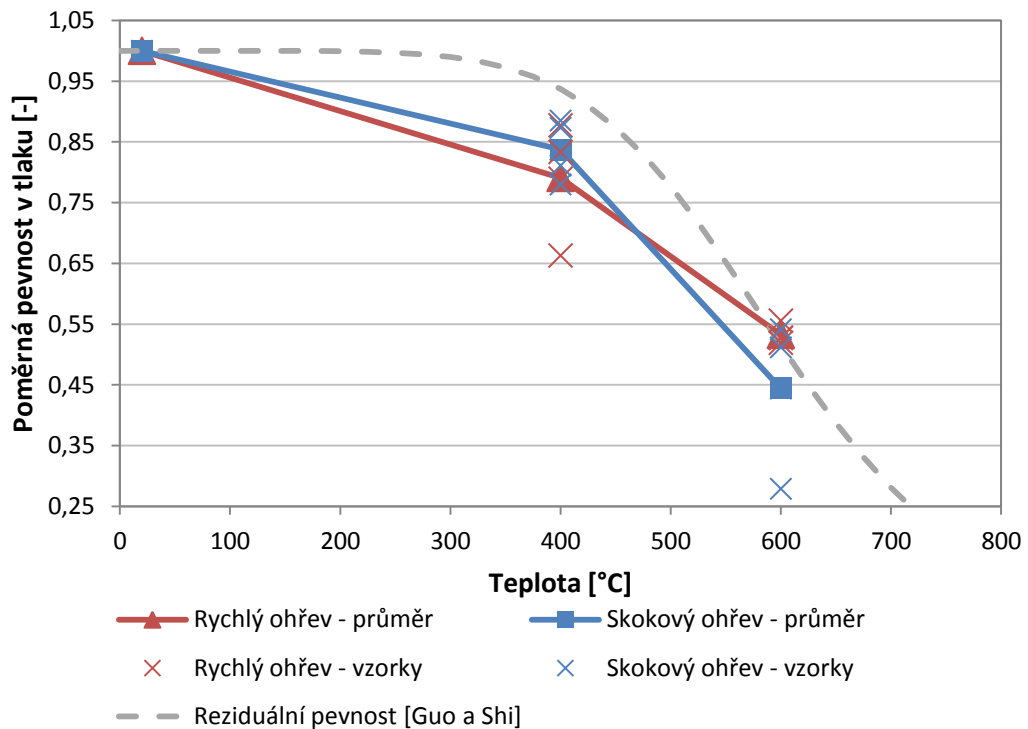
průměrná poměrná pevnost asi o 10 % nižší než poměrná pevnost při rychlém ohřevu. Nicméně v grafu je patrná výrazně odlehlá hodnota, která vykazuje poměrnou pevnost přibližně 28 %. U ostatních vzorků se poměrná pevnost pohybovala kolem 52 %, což je hodnota téměř dvojnásobná. Důvodem, proč u jednoho vzorku byla naměřena tak nízká poměrná pevnost, bylo to, že tento vzorek byl nadměrně ohříván. Jeho povrchová teplota byla po ukončení ohřevu přibližně 700 °C (více viz konec kapitoly 5.2). Pokud by byla tato odlehlá hodnota vyřazena, pak by se průměrná hodnota zvýšila přibližně na 52 % – byla by tedy téměř totožná s hodnotou rychlého ohřevu.



Obr. 49 – Porovnání vlivu rychlosti zahřívání na reziduální pevnost v tlaku. Hodnoty převzaty z [3].

Na Obr. 50 na další straně je znázorněno porovnání vlivu rychlosti zahřívání na reziduální tlakovou pevnost. Pro porovnání jsou uvedeny i hodnoty z výzkumu Guo a Shi [17], kde byla použita rychlost ohřevu vzorků z prostého betonu 600 °C/hod. Na první pohled je patrné, že křivka skokového ohřevu má podobný tvar jako výzkum Guo a Shi [17]. Jen hodnoty jsou přibližně o 10 % nižší. Tento tvar křivky je dán výše zmíněným a na tomto grafu patrným odlehlým výsledkem jednoho vzorku. Pokud by byl tento vzorek vynechán, pak by se průměrná hodnota poměrné pevnosti při skokovém ohřevu na teplotu 600 °C vyhoupla přibližně na hodnotu naměřenou s rychlostí ohřevu 1000 °C/hod.

Křivka rychlého ohřevu ukazuje, že hodnoty poměrné pevnosti při 400 °C jsou výrazně nižší, než jaké publikuje výzkum Guo a Shi [17]. Při teplotě 600 °C už bylo dosaženo totožných výsledků. Tvar křivky rychlého ohřevu se jeví jako téměř lineární.



Obr. 50 – Porovnání vlivu rychlosti zahřívání na reziduální pevnost v tlaku. Hodnoty převzaty z [17].

## 5.4 Závěr experimentu

V tomto experimentu byly použity krychlové vzorky o hraně 150 mm. To znamená, že potřebovaly delší dobu ohřevu, než jakou potřebovaly válcové vzorky o průměru 100 mm v prvním experimentu. Proto i ohřev rychlostí 1000 °C/hod potřeboval více času, než ohřev menších válců o rychlosti 600 °C/hod. Skokový ohřev průměrnou rychlostí 200 °C/hod trval ještě o něco déle. Nicméně u krychlových vzorků bylo dosaženo požadované teploty téměř vždy bez potíží. Jeden vzorek byl dokonce přehřátý a velice tak ovlivnil výsledky.

Nutno zmínit, že i přes vysokou rychlost ohřevu (1000 °C/hod) beton vyztužený ocelovými a polypropylenovými vlákny odolal a nedošlo k jeho odštěpení.

Při porovnání poměrné tlakové pevnosti hybridně vyztuženého a prostého betonu dosahoval v tomto experimentu prostý beton nepatrně nižší hodnotu při teplotě 200 °C, ale přibližně o 5 % vyšší hodnotu poměrné pevnosti při teplotě 400 °C a 600 °C. Zajímavé je, že u vzorků z prostého betonu zahřátých na 200 °C nedošlo ke zvýšení poměrné pevnosti vlivem dodatečné hydratace dosud nehydratovaných cementových jader. Pravděpodobně k dodatečné hydrataci došlo až při ohřevu na 400 °C, neboť hodnota poměrné pevnosti zůstala na stejné úrovni, jako při 200 °C.

Hybridně vyztužený beton vykazoval přibližně stejnou hodnotu poměrné pevnosti při teplotách do 400 °C, jakou udává Eurokód 2 [3] pro vápencové kamenivo. Po zahřátí hybridně vyztuženého betonu na teplotu 600 °C klesla poměrná pevnost na hodnotu, kterou udává Eurokód 2 [3] pro křemičité kamenivo. Hodnoty poměrné pevnosti hybridně vyztuženého betonu při teplotách 400 °C a 600 °C byly přibližně o 5 % nižší než hodnoty prostého betonu. To může být následkem vyšší pórovitosti, která vznikla vyhořením PP vláken v betonu.

Výsledky zkoušky hybridně vyztuženého betonu dosáhly velmi podobného průběhu, jaký ukazují výsledky experimentu Guo a Shi [17], akorát s nižšími hodnotami přibližně o 10 %. Naproti tomu reziduální zkoušky tlakové pevnosti ukazují výrazně lineárnější průběh než zkoušky za tepla. Při porovnání zkoušek těchto dvou metod byly dosaženy nejednoznačné výsledky. Při teplotě 400 °C si lépe vedl beton zkoušený za tepla, při teplotě 600 °C to byl naopak beton zkoušený reziduálně, který dosáhl lepšího výsledku.

Tento experiment se věnoval také porovnání poměrné tlakové pevnosti betonu při různých rychlostech ohřevu. Vzorky byly ohřívány buď rychle (1000 °C/hod) nebo skokově s průměrnou rychlostí 200 °C/hod. Při skokovém ohřevu na teplotu 600 °C bohužel došlo k přehřátí jednoho vzorku (asi na 700 °C), čímž byla výrazně zkreslena průměrná poměrná pevnost. Skokový ohřev se ukázal lepší pro beton při 400 °C, ale při 600 °C byla vlivem přehřátí jednoho vzorku poměrná pevnost nižší než u rychlého ohřevu. Kdyby byla tato odlehlá hodnota zanedbána, bylo by dosaženo přibližně stejné hodnoty poměrné pevnosti, jaká byla naměřena při zkoušení s rychlým ohřevem.

Je škoda, že z časových důvodů nebyly zkoušeny vzorky z hybridně vyztuženého betonu při teplotě 200 °C. Tyto výsledky by ukázaly reziduální chování hybridně vyztuženého betonu při relativně nízké teplotě, kdy by mělo docházet pouze k minimálnímu snížení tlakové pevnosti.

Nedostatkem bylo také zkoušení pouze jedné sady vzorků (3–4 vzorky) při dané teplotě. To velice ovlivnilo výsledné průměrné hodnoty, obzvláště když došlo k nadměrnému ohřevu jednoho vzorku. Veškeré tyto nedostatky, které znehodnocují výsledky experimentu, budou v pokračování experimentu napraveny. Pouze po vyhrazenou dobu pro tuto diplomovou práci nezbýval čas na provedení dalších zkoušek. Přesto věřím, že výše zmíněné výsledky dosud provedené části experimentu budou dosahovat po dokončení experimentu velice podobných hodnot.

## 6 Závěr

Úvodem byla nastíněna problematika měření mechanických vlastností betonu při zvýšených teplotách, kde bylo zmíněno, že v dnešní době neexistuje žádná tuzemská legislativa, která by popisovala zkušební metody a postupy. Nejbližší je tomu ČSN EN 12390-1 [26], která klade různé požadavky na zkušební zařízení a zkoušené vzorky. Ta se ale zabývá pouze zkoušením betonu při běžné teplotě.

Také bylo důležité zmínit mechanické vlastnosti betonu jako takové a popsat, jak se beton chová v případě vystavení vysokým teplotám a proč tomu tak je. Už samotný prostý beton odolává velmi dobře vysokým teplotám. Největší obavou při zahřívání prostého betonu je odštěpení. To nastává z důvodu uvolňování volné i fyzikálně vázané vody v betonu. Při uvolňování této vody nastává prudký nárůst pórových tlaků, které způsobí již zmíněné odštěpení betonu. To je zohledněno v Eurokódu 2 [3], která z tohoto důvodu doporučuje přidání PP vláken do betonové směsi. To má i svou stinnou stránku – zvýšení pórovitosti po vyhoření PP vláken snižuje pevnost betonu.

Dále se teoretická část věnuje metodám zkoušení mechanických vlastností betonu za vysoké teploty. Tato kapitola se zaměřila na popis různých způsobů jak zkoušet danou mechanickou vlastnost za zvýšené teploty nebo reziduálně. Čerpáno bylo především ze zahraničních experimentů a doporučení unie RILEM. V kapitole by měl být dostatek informací pro sestavení vlastního experimentu z hlediska doporučených rozměrů vzorků, jejich stáří a tvaru. Dále zde lze najít, jaký postup je doporučen pro zkoušení pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu a modulu pružnosti betonových vzorků ohřátých na vysokou teplotu. V kapitole také byly vyzdvíženy doporučené rychlosti ohřívání a zatěžování vzorků.

Teoretickou část zakončila kapitola popisující možnosti použití různých zkušebních zařízení a požadavky na ně. Zde je vysvětleno, že každé zkušební zařízení musí sestávat ze třech systémů - systému pro ohřívání a ochlazování vzorku, systému pro zatížení vzorku a systému pro měření a záznam naměřených hodnot. Pro tyto systémy byly vypsány možnosti, jaké zařízení lze zvolit a na jakém principu tato zařízení fungují.

Teoretická část této práce zde končí a měla by obsahovat dostatečné informace o tom, jak by měly být provedeny experimenty zabývající se měřením mechanických vlastností betonu při zvýšené teplotě. Mohlo by to být nazváno příručkou, kde se lze dozvědět, jaké jsou vhodné rozměry zkušebních vzorků, jak a čím je ohřívát a zatěžovat.

Dále práce pokračuje experimentální částí, kde jsou uvedeny dva experimenty. Oba experimenty se odehrávaly v prostoru laboratoří a na dvoře Fakulty stavební ČVUT. Experimenty probíhaly pod odborným vedením Ing. Josefa Nováka, Ph.D., a společně se mnou je prováděli Ing. Jakub Holan a Ing. Petr Müller.

Experiment 1 se zaměřil na zkoušení pevnosti v tlaku betonových vzorků za zvýšené teploty. Vzorky sestávaly ze třech druhů betonu – prostý beton, vláknobeton (PP vlákna) a provzdušněný beton. Vzorky byly válcové o průměru 100 mm a výšce 200 mm a byly ohřívány na teplotu 200 °C, 400 °C, 600 °C nebo 800 °C pomocí keramických deček.

Výsledky prvního experimentu ukázaly jev, kdy při zahřátí prostého betonu na teplotu 200 °C došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku oproti běžné teplotě vlivem dodatečné hydratace dosud nehydratovaných cementových jader. Při dalším zahřívání klesala tlaková pevnost s rostoucí teplotou téměř lineárně. Vláknobeton v tomto experimentu ukázal nejvyšší hodnoty tlakové pevnosti při teplotách od 400 °C a vyšších. Konkrétně hodnoty poměrné pevnosti v tlaku vláknobetonu byly přibližně o 10 % vyšší než hodnoty prostého betonu. Nejhůře v tomto experimentu dopadl provzdušněný beton, jehož průměrné hodnoty poměrné pevnosti v tlaku byly výrazně nižší, než prostý beton i vláknobeton při všech zkoušených teplotách. Jedinou výjimkou byla hodnota při 800 °C, která byla totožná s hodnotou poměrné tlakové pevnosti prostého betonu.

Druhý experiment ukázal, jaký rozdíl je v chování prostého betonu a hybridně vyztuženého betonu (beton vyztužený ocelovými a PP vlákny) při zvýšené teplotě. Tyto výsledky ukázaly, že prostý beton má poměrnou pevnost v tlaku přibližně o 5 % vyšší než hybridně vyztužený beton při teplotě 400 °C a 600 °C. Zajímavé je, že při zahřátí prostého betonu na 200 °C nedošlo ke zvýšení poměrné pevnosti v tlaku oproti běžné teplotě, jako tomu bylo v prvním experimentu. Podtrhuje to tedy fakt, že k tomuto jevu nemusí dojít vždy.

Druhý experiment se měl věnovat porovnání reziduální tlakové pevnosti a tlakové pevnosti zkoušené za tepla a dále porovnání vlivu rychlosti ohřevu na výslednou poměrnou pevnost betonu. Vzhledem k tomu, že experiment nebyl dokončen, kvůli omezenému času na tuto práci, byly výsledky reziduálního zkoušení výrazně ovlivněny malým počtem vzorků. To mělo za následek výrazné zkreslení průměrné pevnosti v tlaku zkoušených vzorků, jakmile byl jeden vzorek nadměrně ohříván. Výsledky tohoto experimentu jsou zatím nejednoznačné a nedůvěryhodné. To se ale po dokončení experimentu napraví.

Celkově experimenty ukázaly, že při měření mechanických vlastností betonu za vysoké teploty mají na výsledky vliv tyto faktory:

- Druh betonu
- Počet zkoušených vzorků
- Teplota ohřevu
- Rychlost ohřevu
- Zda se jedná o zkoušení za tepla nebo reziduální zkoušku

Je zřejmé, že každý druh betonu se chová s rostoucí teplotou různě. Zvýšením počtu zkoušených vzorků lze eliminovat odchylky v měření dané například nadměrným ohřevem nebo nepatrným odštěpením betonu. Dalo by se říci, že zpravidla čím vyšší bude teplota vzorku, tím nižší bude jeho pevnost v tlaku. To samé by mělo platit pro rychlost ohřevu vzorku. Čím vyšší bude rychlost ohřevu, tím více budou betonové vzorky trpět na vznik trhlin a na růst pórových tlaků (toto je pouze předpoklad, který bude ověřen dokončením experimentu). Při zkoušení reziduálních vlastností lze zmírnit nároky na potřebné zařízení a lze se vyhnout manipulaci se zahřátými vzorky.



V experimentech v této práci byla použita metoda zkoušení pevnosti v tlaku betonu za zvýšené teploty, která využívala pro ohřev vzorků keramické dečky. Ty se v těchto experimentech osvědčily a prokázaly, že není potřeba pro ohřev vzorků používat drahé elektrické pece nebo vyvíjet speciální zkušební zařízení, které může kombinovat jak ohřívání, tak i zatěžování vzorků naráz. Myslím si tedy, že tato metoda je méně náročná na vybavení, ale i přes to jsme schopni s jejím využitím získat stejně kvalitní a důvěryhodné výsledky, jako s výrazně dražším zařízením.

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Pevnost betonu v tlaku v závislosti na teplotě a použitém kamenivu. Hodnoty převzaty z [3].	2
Obr. 2 – Tlaková pevnost různých betonových kompozitů v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [8].	3
Obr. 3 – Pevnost betonu v tahu v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [3].	4
Obr. 4 – Tahová pevnost různých betonových kompozitů v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [8].	4
Obr. 5 – Pracovní diagram běžného betonu při různých teplotách. Vlevo lineární model sestupné větve, vpravo nelineární model sestupné větve [10].	5
Obr. 6 – Modul pružnosti betonu v závislosti na teplotě. Hodnoty převzaty z [11].	6
Obr. 7 – Rozměry vzorků dle ČSN EN 12390-1 [12].	7
Obr. 8 – Porovnání pevnosti v tlaku betonu za zvýšené teploty a reziduální pevnosti.[17].	10
Obr. 9 – Schéma zatěžovaných vzorků při zkoušce pevnosti v příčném tahu [18].	11
Obr. 10 – Porovnání výsledků experimentu s EN 1992-1-2. Hodnoty převzaty z [3, 17].	12
Obr. 11 – Příklady tvaru vzorků včetně vhodných pozic pro měření teploty [15].	13
Obr. 12 – Schéma pro měření modulu pružnosti při zvýšené teplotě. Přeloženo z [19].	14
Obr. 13 – Výsledné hodnoty modulu pružnosti dle experimentu Shaikh. Přeloženo z [19].	14
Obr. 14 – Schéma zkoušeného vzorku s vyznačenými místy měření teploty a protažení [16].	15
Obr. 15 – Schéma zatěžovacího cyklu za běžné teploty pro ověření změny délky vzorku [16].	16
Obr. 16 – Schéma zatěžovacího cyklu při zkoušení reziduálního modulu pružnosti nebo modulu pružnosti při zvýšené teplotě [16].	17
Obr. 17 – Schematický svislý řez el. odporovou pecí. Překresleno podle [21].	18
Obr. 18 – Schéma keramické dečky. Přeloženo z [22].	19
Obr. 19 – Konstrukce a pohled na deskový snímač teploty [26].	20
Obr. 20 – Data loggery pro (zleva) 64, 8 a 1 kanál [29].	21
Obr. 21 – Příklad schématu zařízení pro nepřímé měření deformací. Přeloženo z [17].	22
Obr. 22 – Čas potřebný pro ohřátí a prohřátí vzorku.	24
Obr. 23 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 200 °C.	25
Obr. 24 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 400 °C.	25
Obr. 25 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 600 °C.	26
Obr. 26 – Vypočtený průběh teplot na okraji a ve středu vzorku pro ohřev na 800 °C.	26
Obr. 27 – Vážení vzorku.	27

---

Obr. 28 – Skupina vzorků .....	27
Obr. 29 – Vzorek zabalený do keramické dečky (vlevo) a vzorky připravené ke zkoušce (vpravo).....	28
Obr. 30 – Ohřívací zařízení Mannings HTC a detail displeje ukazujícího teploty zapojených termočlánků. ....	28
Obr. 31 – Stav vzorku po odštěpení [33]. ....	29
Obr. 32 – Vypočtené teplotní pole ve vzorku v momentě odštěpení (software SAFIR 2011). ....	29
Obr. 33 – Lis Inova 200 F (vlevo) a vzorek umístěný v lisu (vpravo). ....	30
Obr. 34 – Naměřené hodnoty vzorků z prostého betonu. Přeloženo z [33]. ....	31
Obr. 35 – Naměřené hodnoty vzorků z provzdušněného betonu. Přeloženo z [33]. ....	32
Obr. 36 – Naměřené hodnoty vzorků z vláknobetonu. Přeloženo z [35]. ....	33
Obr. 37 – Porovnání naměřených hodnot s Eurokódem. Hodnoty převzaty z [3, 33, 35]. ....	33
Obr. 38 – Umístění termočlánků uvnitř vzorku při cvičném ohřevu. ....	36
Obr. 39 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při ohřevu na 400 °C. ....	37
Obr. 40 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při ohřevu na 600 °C. ....	37
Obr. 41 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při skokovém ohřevu na 400 °C. ....	38
Obr. 42 – Porovnání skutečného a vypočteného průběhu teplot při skokovém ohřevu na 600 °C. ....	38
Obr. 43 – Průběh samovolného ochlazování zahřátých vzorků. ....	39
Obr. 44 – Postup přípravy vzorků pro ohřev. ....	40
Obr. 45 – Vzorek vlevo dosáhl příliš vysoké teploty. Vzorek vpravo dosáhl požadované teploty. ....	40
Obr. 46 – Porovnání výsledků prostého betonu a hybridně vyztuženého betonu s Eurokódem 2 a s výzkumem Guo a Shi. Hodnoty převzaty z [3, 8, 17]. ....	41
Obr. 47 – Porovnání výsledků zkoušek za tepla a reziduálních zkoušek s Eurokódem 2. Hodnoty převzaty z [3, 8]. ....	42
Obr. 48 – Porovnání výsledků zkoušek za tepla a reziduálních zkoušek s výzkumem Guo a Shi. Hodnoty převzaty z [17]. ....	43
Obr. 49 – Porovnání vlivu rychlosti zahřívání na reziduální pevnost v tlaku. Hodnoty převzaty z [3]. ....	44
Obr. 50 – Porovnání vlivu rychlosti zahřívání na reziduální pevnost v tlaku. Hodnoty převzaty z [17]. ....	45

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Doporučené hodnoty rychlostí zahřívání a chladnutí povrchu vzorku [14]. .....	10
Tab. 2 – Doporučené hodnoty rychlosti zahřívání nebo chladnutí povrchu vzorku [15]. .....	13
Tab. 3 – Složení zkoušených vzorků.....	23
Tab. 4 – Složení zkoušených vzorků. Hodnoty převzaty z [8]. .....	35

---

## Literatura

- [1] ROCHELT, Filip. *Metody měření mechanických vlastností betonu při vysokých teplotách*. 2018
- [2] KODUR, Venkatesh. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *ISRN Civil Engineering* [online]. 2014, **2014**, 1–15. ISSN 2090-5114.  
Dostupné z: doi:10.1155/2014/468510
- [3] ČSN EN 1992-1-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Listopad 2006
- [4] SVOBODA, Luboš a kol. *Stavební hmoty*. 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [5] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN, Jitka VAŠKOVÁ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STAVEBNÍ FAKULTA. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [6] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, 2006. ISBN 978-80-247-1329-8.
- [7] RUDNIK, Ewa a Tomasz DRZYMAŁA. Thermal behavior of polypropylene fiber-reinforced concrete at elevated temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. 2018, **131**(2), 1005–1015. ISSN 1388-6150, 1588-2926.  
Dostupné z: doi:10.1007/s10973-017-6600-1
- [8] NOVAK, Josef a Alena KOHOUTKOVA. Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature. *Fire Safety Journal* [online]. 2018, **95**, 66–76. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2017.10.010
- [9] KHALIQ, Wasim a Venkatesh KODUR. Effect of High Temperature on Tensile Strength of Different Types of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*. 2011, **108**(4), 394–402. ISSN 0889325X.
- [10] ŠTEFAN, Radek. Požární spolehlivost betonových a zděných konstrukcí. In: [online]. B.m. 31. říjen 2017. Dostupné z: [http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/vyuka/133PSBZ/133PSBZ\\_Prednaska\\_A5.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/vyuka/133PSBZ/133PSBZ_Prednaska_A5.pdf)
- [11] LEE, Jaesung, Yunping XI, Kaspar WILLAM a Younghan JUNG. A multiscale model for modulus of elasticity of concrete at high temperatures. *Cement and Concrete Research* [online]. 2009, **39**(9), 754–762. ISSN 00088846.  
Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2009.05.008
- [12] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Únor 2013
- [13] *RILEM* [online]. Dostupné z: <https://www.rilem.net>

- [14] Compressive strength for service and accident conditions. *Materials and Structures* [online]. 1995, **28**(7), 410–414. ISSN 0025-5432, 1871-6873. Dostupné z: doi:10.1007/BF02473077
- [15] Recommendations - Part 4: Tensile strength for service and accident conditions. *Materials and Structures* [online]. 2000, **33**(4), 219–223. ISSN 1359-5997, 1871-6873. Dostupné z: doi:10.1007/BF02479330
- [16] Modulus of elasticity for service and accident conditions. *Materials and Structures* [online]. 2004, **37**(2), 139–144. ISSN 1359-5997, 1871-6873. Dostupné z: doi:10.1007/BF02486610
- [17] GUO, Zhenhai a Xudong SHI. *Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-0-12-386962-3.
- [18] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Červen 2010
- [19] SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed. Mechanical properties of concrete containing recycled coarse aggregate at and after exposure to elevated temperatures. *Structural Concrete* [online]. 2018, **19**(2), 400–410. ISSN 14644177. Dostupné z: doi:10.1002/suco.201700084
- [20] POPELÁŘ, Vojtěch. *Energetické problémy elektrotepelných zařízení* [online]. B.m.: Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2012. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=52491](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52491)
- [21] Resistance Furnace. *The Great Soviet Encyclopedia, 3rd Edition* [online]. 1979. Dostupné z: <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Resistance+Furnace>
- [22] *Myungjin Heat-Treatment, Inc.* [online]. Dostupné z: [http://www.mhti.co.kr/en/contents.htm?code=2\\_1\\_2#horizontalTab2](http://www.mhti.co.kr/en/contents.htm?code=2_1_2#horizontalTab2)
- [23] KISLINGER, Radek. *Požárně technické charakteristiky a technické informace pro potřeby ZPP*. Praha: Ministerstvo vnitra, Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2015. ISBN 978-80-86466-72-9.
- [24] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - požadavky na zkušební lisy*. Únor 2001
- [25] KUČA, Martin. *Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích*. Diplomová práce. Praha: Fakulta Stavební ČVUT v Praze, 2016.
- [26] ČSN EN 1363-1. *Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky*. Leden 2013
- [27] HONNER, Milan, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA a NOVÉ TECHNOLOGIE - VÝZKUMNÉ CENTRUM. *Měření ve fyzikálních technologiích: texty k laboratorním cvičením*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 978-80-7082-971-4.
- [28] HYRŠ, Jan. *Měření teploty termočlánky*. Bakalářská práce. Brno: Fakulta Strojního inženýrství, VUT v Brně, 2012.

- 
- [29] *Meatest - Teplotní Data Logger* [online]. 2018.  
Dostupné z: <https://www.meatest.com/cs/produkty-51101-teplotni-data-logger-detail-206>
- [30] KHALIQ, Wasim a Farhan WAHEED. Mechanical response and spalling sensitivity of air entrained high-strength concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **150**, 747–757. ISSN 09500618.  
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.039
- [31] DU, Lianxiang a Kevin J. FOLLIARD. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2005, **35**(8), 1463–1471. ISSN 00088846.  
Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2004.07.026
- [32] *SAFIR* [online]. B.m.: L'Université de Liège.  
Dostupné z: [https://www.uee.uliege.be/cms/c\\_2383458/en/safir](https://www.uee.uliege.be/cms/c_2383458/en/safir)
- [33] HOLAN, Jakub a kol. *The Compressive Strength of Air-entrained Concrete at High Temperatures*. Rozpracováno.
- [34] MA, Qianmin, Rongxin GUO, Zhiman ZHAO, Zhiwei LIN a Kecheng HE. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **93**, 371–383. ISSN 09500618.  
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131
- [35] MÜLLER, Petr a kol. *Experimental evaluation of compressive strength of plain concrete and FRC with PP fibres subjected to elevated temperature using destructive and nondestructive test*. Rozpracováno.
- [36] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ, Barbora STUNOVÁ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STROJNÍ FAKULTA. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.