



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

---

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ  
DEPARTMENT OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

NUMERICKÁ ANALÝZA TRANSPORTU TEPLA  
V OCELOBETONOVÝCH PRVCÍCH  
NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IN STEEL-CONCRETE COMPOSITE  
STRUCTURAL MEMBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

STUDIJNÍ PROGRAM STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ  
STUDY PROGRAM CIVIL ENGINEERING

STUDIJNÍ OBOR INTEGRÁLNÍ BEZPEČNOST STAVEB  
BRANCHES OF STUDY INTEGRAL SAFETY OF CONSTRUCTIONS

AUTOR PRÁCE Bc. JAKUB GREŠAR  
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. RADEK ŠTEFAN, Ph.D.  
SUPERVISOR

---

PRAHA, 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: Grenar	Jméno: Jakub	Osobní číslo: 438958
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Numerická analýza transportu tepla v ocelobetonových prvcích
Název diplomové práce anglicky: Numerical Analysis of Heat Transfer in Steel Concrete Composite Structural Members
Pokyny pro vypracování: Rešerše literatury. Studium provedených experimentů. Výběr a popis matematických modelů transportu tepla. Numerická analýza zkoušených prvků. Porovnání výsledků s experimenty. Diskuze. Závěr.
Seznam doporučené literatury: [1] PURKISS, J. A. Fire safety engineering design of structures. 2nd ed. Boston: Elsevier. 2007. [2] BUCHANAN, Andrew Hamilton a Anthony ABU. Structural design for fire safety. Second edition. United Kingdom: John Wiley & Sons Inc. 2017. [3] WALD, F a kol. Software ke stanovení požární odolnosti nosných konstrukcí. Praha: ČVUT v Praze, 2011. [4] ŠTEFAN, R. Transport Processes in Concrete at High Temperatures. Mathematical Modelling and Engineering Application with Focus on Concrete Spalling. Disertační práce. Praha: ČVUT v Praze. 2015. [5] KUČA, M. Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích. Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze. 2016.
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 10.10.2017 <span style="float: right;">Termín odevzdání diplomové práce: 7. 1. 2018</span>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>

### 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 nutné 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“.

10.10.2017 Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
-------------------------------------	-------------------------

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně 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 .....

.....

Podpis autora práce

Poděkování:

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za odborné vedení, poskytnuté rady, věnovaný čas, trpělivost a vlídné slovo. Dále pak své rodině za přívětivé zázemí a shovívavost při práci.

## Abstrakt

Práce se zabývá teplotní analýzou betonových a ocelobetonových prvků s rozptýlenou výztuží, konkrétně betonových a ocelobetonových desek a sloupů. První kapitola se věnuje teoretickému základu, jako je definice požáru, chování betonu za zvýšených teplot či metody teplotní analýzy v současné době. V další kapitole je shrnut experimentální program uskutečněný v požární zkušebně v letech 2016 a 2017. Třetí kapitola má za úkol představit konkrétní počítačové softwary pracující s matematickým modelováním průběhu tepla. Byly použity softwary založené na metodě konečných prvků s aplikací na teplotní analýzu. Výsledky jsou zobrazeny ve čtvrté kapitole, a to do grafů ukazující jednotlivé průběhy tepla v průřezu prvků. V závěrečné kapitole je shrnutí diplomové práce.

### Klíčová slova

Teplotní analýza; beton; ocel; sloup; deska; rozptýlená výztuž; MKP; teplotní profil; TempAnalysis; Atena; matematický model

## Abstract

The thesis deals with temperature analysis of concrete and steel-concrete elements with diffused reinforcement, namely concrete and steel-concrete slabs and columns. The first chapter deals with a theoretical basis, such as definition of fire, concrete behavior at elevated temperatures, or thermal analysis methods at present. The next chapter summarizes the experimental program carried out in the Fire Lab in 2016 and 2017. The third chapter is aimed at introducing specific computers software working with mathematical modeling of heat transfer. Software based on finite element was applied using temperature analysis. The results are shown in the fourth chapter, in graphs showing the individual heat flows in the cross section of the elements. The final chapter is a summary of the diploma thesis.

### Keywords

Thermal analysis; concrete; steel; column; slab; dispersed reinforcement; FEM; temperature profile; TempAnalysis; Atena; mathematical model

# Obsah

<b>Zadání</b>	.....	<b>ii</b>
<b>Prohlášení</b>	.....	<b>iii</b>
<b>Poděkování</b>	.....	<b>iv</b>
<b>Abstrakt</b>	.....	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	.....	<b>V</b>
<b>Obsah</b>	.....	<b>VI</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	.....	<b>VIII</b>
<b>Úvod</b>	.....	<b>9</b>
<b>1 Teoretický základ</b>	.....	<b>11</b>
1.1 Požár	.....	11
1.1.1 Křivka ISO 834	.....	11
1.1.2 Parametrická teplotní křivka	.....	12
1.2 Beton za vyšších teplot	.....	12
1.3 Tepelné vlastnosti betonu za vyšších teplot	.....	13
1.4 Teplotní analýza	.....	15
1.4.1 Způsoby teplotní analýzy	.....	15
1.4.2 Matematické modelování	.....	17
<b>2 Experimenty</b>	.....	<b>21</b>
2.1 Experimentální program	.....	21
2.1.1 Návrh experimentů	.....	21
2.1.2 Zkušební vzorky	.....	22
2.1.3 Materiálové vlastnosti	.....	24
2.2 Popis experimentu 2016	.....	28
2.3 Vyhodnocení experimentu 2016	.....	28
2.4 Popis experimentu 2017	.....	29
2.5 Vyhodnocení experimentu 2017	.....	31
<b>3 Numerické simulace</b>	.....	<b>32</b>
3.1 TempAnalysis	.....	32
3.1.1 Popis programu	.....	32
3.1.2 Vstupy, postup výpočtu	.....	33
3.2 Atena GiD ver. 13.0.2	.....	36
3.2.1 Popis programu	.....	36
3.2.2 Vstupy, postup výpočtu	.....	36
<b>4 Výsledky a diskuze</b>	.....	<b>38</b>
4.1 Desky	.....	38
4.1.1 Deska betonová	.....	38

---

4.1.2	Deska ocelobetonová .....	44
4.2	Sloupy.....	49
4.2.1	Sloup betonový .....	49
4.2.2	Sloup ocelobetonový.....	53
<b>5</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>58</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>60</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratk

### Latinské symboly

$A$	Plocha	$m^2$
$c$	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$t$	Čas	$min$
$q$	Hustota tepelného toku	$W \cdot m^2$

### Řecké symboly

$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\rho$	Objemová hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$
$\theta$	Teplota	$^{\circ}C$
$\alpha$	Součinitel na přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

### Zkratky

MKP	Metoda konečných prvků
DO	Deska ocelobetonová
DB	Deska betonová
SO	Sloup ocelobetonový
SB	Sloup betonový
PO	Požární odolnost
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	Eurokód



## Úvod

Ocelové a betonové konstrukce, zejména prostý a železový beton, jsou již dnes dostatečně prozkoumány z hlediska chování při zvýšených teplotách. V průběhu let vznikla řada výzkumů a činností zabývajících se touto problematikou [1]. Na základě těchto prací byly stanoveny normy pro navrhování betonových a ocelových konstrukcí za požáru [2]. Také vznikla řada specializovaných počítačových nástrojů pro vykreslení teplotního profilu na základě normové teplotní křivky (ISO 834) či parametrické teplotní křivky v čase, některé jsou například uvedeny v [3]. Tyto programy nám umožňují dalšími postupy efektivněji stanovit požární odolnost stavebních prvků či celkové chování konstrukcí za požáru. Tento problém má také ekonomický dopad, neboť v České republice je potřeba požární odolnost nějakým způsobem prokázat a v současné době to lze především zkouškou v požární zkušebně, a certifikát z této zkoušky lze uplatnit pouze pro ten konkrétní výrobek, který byl zkoušen. Vývojem matematických modelů a jejich aplikování by se v budoucnu mohla prokazovat požární odolnost právě výpočtem. Každý rok vzniká řada nových materiálů či se zlepšují ty současné a pro aplikaci ve stavebnictví musí splnit řadu parametrů, z nichž jedna z nejdůležitějších je právě schopnost konstrukce odolávat účinkům požáru. Je známo, že tuto vlastnost mají betonové konstrukce velice dobrou, ale vznikají i tenkostěnné či zpražené ocelobetonové prvky různých tvarů a rozpětí a zkoušet tyto varianty je jak časově tak finančně náročné. Dále je také nutné připomenout, že je konstrukci je potřeba posoudit i po zasažení ohněm. K tomu je potřeba znát přibližné rozložení teploty v průřezu a čase. Díky tomu můžeme třeba určit strukturální změny a stanovit tak postup při sanaci konstrukce zasažené vysokými teplotami.

V současné době se vědci začali zabývat i jinými typy betonových prvků. Beton s rozptýlenou výztuží, zpravidla tvořenou polymerními a ocelovými vlákny, je jednou z oblastí, kde se dnes provádí výzkum i v oblasti požární bezpečnosti a chování za vysokých teplot jako takových. Je známo, že tento typ betonu napomáhá např. proti odštěpování. Jaké je ovšem jeho chování když vytvoříme klasický ocelobeton, např. ocelová trubka vyplněná tímto betonem. Jaký to má vliv na rozložení teploty? Když srovnáme křivky tohoto betonu samotného a právě ocelobetonu, jaký je v nich rozdíl? Na čem závisí průběh tepla? Na tyto otázky jsem se snažil odpovědět právě touto prací. Součástí je také ověření matematického modelu a teplot získaných pomocí něj, díky tomu bude moci být v budoucnu uplatňován i u prvků jiných rozměrů a složení a bez nákladné požární zkoušky zjistit rozložení teploty.

Tato práce z části navazuje na diplomovou práci [4], která se zabývala experimentálním stanovením chování ocelobetonu s rozptýlenou výztuží za působení zvýšených teplot (dle nominální normové křivky ISO 834, viz dále). Výsledkem této práce byl soubor dat, zpravidla to jsou hodnoty teplot v různé hloubce profilu v čase. Experiment byl proveden na betonových deskách, betonových deskách s ocelovou deskou na povrchu, betonových a ocelobetonových sloupech.

Text je rozdělen do pěti kapitol. V první je popsáno, co je to požár, jak je definován a s kterými modely požáru budu počítat, dále pak chování betonu za vyšších teplot a změnu jeho tepelných vlastností na kterých závisí rozložení teploty a v neposlední řadě také způsoby teplotní analýzy betonových konstrukcí, hlavně z hlediska matematického modelování. V druhé kapitole je několik

částí zabývajících se experimentálním programem na fakultě stavební ČVUT v Praze, popisem zkoušek v letech 2016 a 2017 a jejich krátkým vyhodnocením. Třetí kapitola má za cíl představit softwary určené mimo jiné pro analýzu rozložení teploty v průřezu. Těmi programy jsou TempAnalysis a Atena. Nejprve jsou popsány a dále rozebrány vstupní hodnoty a průběh výpočtů, podle kterých jsem získával výsledky pro betonové a ocelobetonové prvky. Ve čtvrté kapitole jsou zobrazeny grafy s hodnotami experimentálními a vypočtenými a také diskuze o optimalizaci materiálových charakteristik. V závěrečné kapitole jsem shrnul celou práci, k čemu mě vedla, co přinesla a jaký by mohl být další postup při získávání ještě lepších a přesnějších výsledků.

# 1 Teoretický základ

## 1.1 Požár

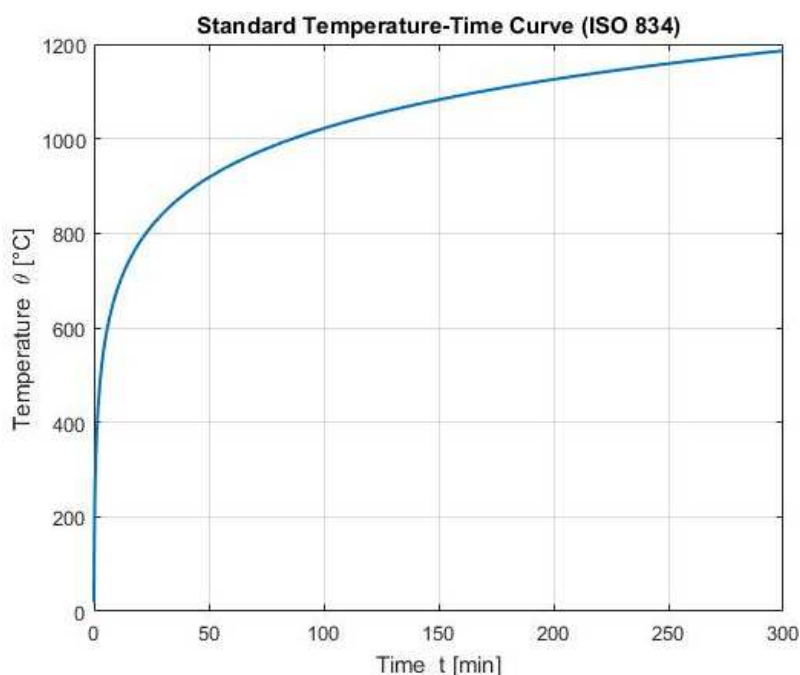
Definice požáru je stanovena ve vyhlášce o požární prevenci, viz [5]. Zkráceně se jedná o každé nežádoucí hoření ohrožující životy (nebo došlo-li k bezprostřednímu ohrožení) osob či zvířat nebo majetek a životní prostředí. Abychom mohli garantovat, že nějaká budova je schopna odolávat účinkům požáru, musíme umět stanovit požární odolnosti těchto konstrukcí. Ta definuje čas, po který si konstrukce zachovává žádoucí vlastnosti (tzv. mezní stavy), jako například únosnost, omezení tepelného toku, mechanickou odolnost (definice v [6]). Ke stanovení těchto vlastností potřebujeme znát několik veličin. Tou nejdůležitější je průběh požáru, nebo také jeho rozvoj, jinými slovy vývoj teploty okolního vzduchu v čase. Nejčastěji se v praxi počítá s tzv. normovou teplotní křivkou, či parametrickou křivkou. Jsou to křivky, které jsou značně konzervativní, ale zjednodušují nám podstatně výpočet. Existuje více takovýchto křivek, ale ty jsou podrobněji popsány v [2]. Také je nutno říci, že existuje množství modelů popisujících požár, například zónový model, CFD modely ad., viz [3] Zde ve zkratce přiblížíme dvě výše zmíněné křivky.

### 1.1.1 Křivka ISO 834

Křivka je popsána rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1)$$

kde,  $\theta_g$  je teplota plynu,  $t$  je čas. Představuje nám vývoj teploty při rozvoji požáru. Křivka je značně konzervativní, neboť nezahrnuje vlivy okolí například otvory, typ paliva, rychlost odhořívání aj. Tuto křivku můžeme znát také pod názvem normová teplotní křivka a patří mezi takzvané nominální teplotní křivky.



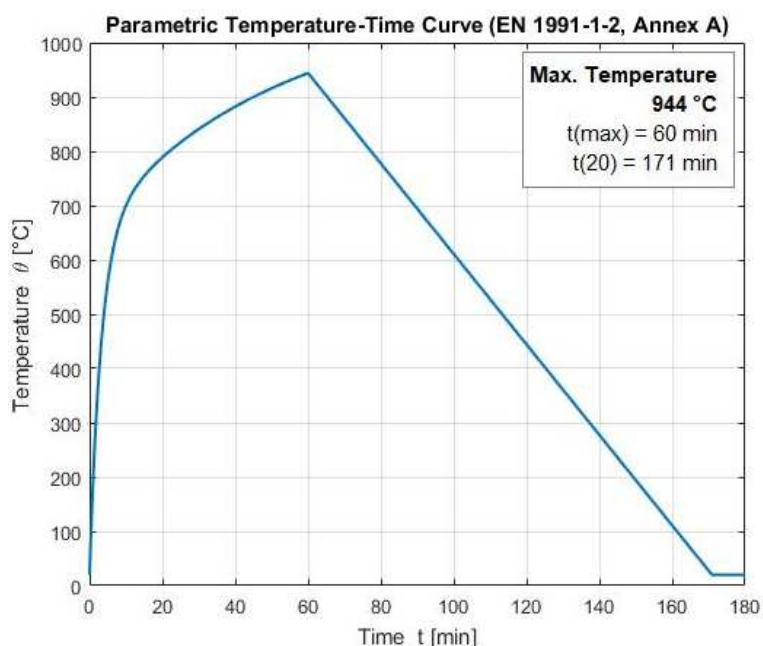
Obr. 1 Normová teplotní křivka ISO 834 [7]

### 1.1.2 Parametrická teplotní křivka

Přesnější průběh požáru nám znázorní parametrická teplotní křivka. Tato křivka zahrnuje i vliv materiálových charakteristik konstrukcí ohraničujících požární úsek, vliv otvorů v obvodových stěnách, typ požárního zatížení, či rychlost rozvoje požáru.

Pro lepší představu uvádím parametrickou křivku vypočtenou programem TempAnalysis [7]:

- Požární zatížení  $g_{t,d} = 200 \text{ MJ}/\text{m}^{-3}$
- Faktor otevřenosti  $O = 0,04 \text{ m}^{1/2}$
- Rychlost rozvoje požáru *Střední*
- Tepelná setrvačnost  $b = 1160 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}}$



Obr. 2 Parametrická teplotní křivka [7]

## 1.2 Beton za vyšších teplot

Obecně je beton stavební materiál s dobrou požární odolností a chováním při požáru. To znamená, že v případě požáru si zachovává žádoucí vlastnosti (článek 1.1) po dlouhou dobu. Dalším pozitivním činitelem je, že beton je nehořlavý a žádným způsobem nepodporuje rozvoj požáru. Tyto dva hlavní faktory dělají z betonu vhodný materiál pro navrhování konstrukcí na účinky požáru. Jeho vlastností se používá například i při zvyšování požární odolnosti ocelových prvků, které jsou naopak velmi citlivé na změny teplot. Často lze také betonové konstrukce zasažené ohněm, sanovat a zrekonstruovat tak, že dále plní svoji funkci.

Při postupném zvyšování teplot dochází ve struktuře betonu ke změnám. Viz např. [8]. Skládá se totiž z několika materiálů: cementu jako pojivo, kameniva jako plnivo a vody, plus některé typy betonu obsahují přísady či příměsi, které upravují jeho vlastnosti. Se zvyšující se teplotou se nám mění materiálové charakteristiky, uvolňuje se fyzikálně a chemicky vázaná voda. Dochází k transportu tepla do hlubších vrstev. Beton je i dosti pórovitý materiál a dochází tak ke vzniku

pórových tlaků, jenž mají za následek odštěpování. To je popsáno např. v [9, 10]. Odštěpování je veliký problém, protože dochází ke zmenšování průřezu a díky tomu také k nižší únosnosti vodorovných a svislých prvků. Citlivé právě na odštěpování jsou nejvíc betony vysokopevnostní, které díky své struktuře obsahují málo pórů a tlak vznikající z odpařování vody nemá kam unikat, srovnání normálního a vysokopevnostního betonu, viz [9].

Jak již bylo napsáno, materiálové vlastnosti betonu (obecně) se při zvyšování teploty mění. Beton je houževnatý materiál, a změna vlastností a nárůst teploty není tak radikální jako např. u oceli. Ale i tak je beton vysokými teplotami negativně ovlivněn a je vždy nutno po požáru zasaženou konstrukci analyzovat a stanovit další postup. Se zvyšující se teplotou dochází k porušení vazby mezi pojivem a plnivem a materiál tak ztrácí svoji pevnost. Tato skutečnost je vyjádřena redukčními součiniteli pevnosti, kdy při navrhování konstrukcí za požáru, je návrhová pevnost materiálu zredukována podle dosažené teploty. U železového betonu je důležitým faktorem dosažená teplota výztuže, kdy se zvyšující se teplotou dochází k redukci pevnosti materiálu a tím i jeho menší únosnosti.

Mezi teplotou, vlhkostí a pórovým tlakem existuje přímá vazba. Největší vliv má teplota, která významně ovlivňuje další dvě veličiny. Bez vysoké teploty by nedocházelo k odpařování volně vázané vody ve struktuře betonu a nezvyšoval by se tlak vznikající díky těmto procesům v pórech.

Na základě těchto faktů bylo vytvořeno několik výpočetních postupů, například: **metoda izotermy 500°C, zjednodušená metoda pro štíhlé sloupy** apod. více viz [11].

### 1.3 Tepelné vlastnosti betonu za vyšších teplot

V této kapitole bych chtěl popsat vlastnosti betonu za zvýšených teplot, které mají zásadní vliv na transport tepla uvnitř materiálu. Mezi tyto vlastnosti patří bezesporu objemová hmotnost, měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost materiálu. Tyto vlastnosti se během zvyšující se teploty mění. Následující grafy jsou převzaté z norem [2, 12]. S normou pro ocelobetonové konstrukce bude dále uvažováno při výpočtu desky a sloupu. Jsou to výsledky na základě četných měření. Odpovídají zhruba pro zahřívání betonu  $2 - 50 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ . Velkým faktorem ovlivňující průběh je složení směsi betonu, tzn. použité kamenivo (vápencové či křemičité), počáteční vlhkost, přísady, příměsi apod.

Norma [2, 12] uvádí tyto materiálové vlastnosti:

#### Objemová hmotnost

Matematická funkce pro klesající hodnotu objemové hmotnosti při zvyšující se teplotě

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \text{ pro } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(1 - 0,02 \cdot \frac{\theta - 115}{85}\right) \text{ pro } 115 < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(0,98 - 0,03 \cdot \frac{\theta - 200}{200}\right) \text{ pro } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

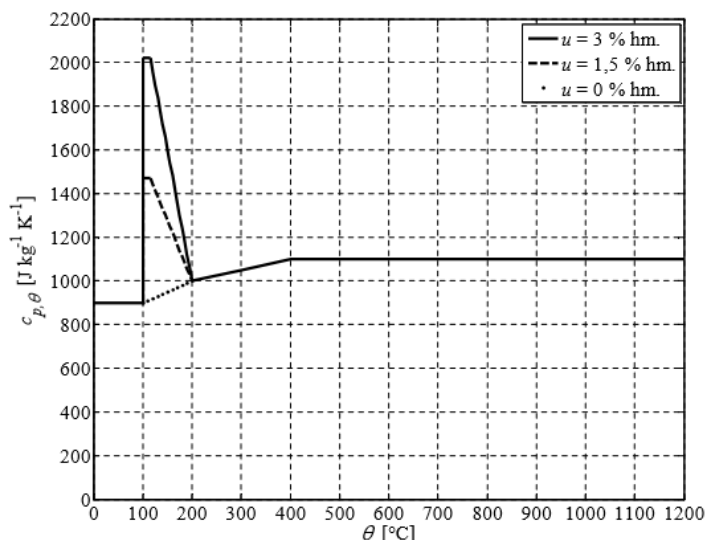
$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left( 0,95 - 0,07 \cdot \frac{\theta - 400}{800} \right) \text{ pro } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

Kde  $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$  je objemová hmotnost betonu při 20 °C,  $\theta$  představuje teplotu okolního vzduchu.

Tuto vlastnost budeme uvažovat stejnou jak z hlediska [2] tak [12].

### Měrná tepelná kapacita dle 1992-1-2

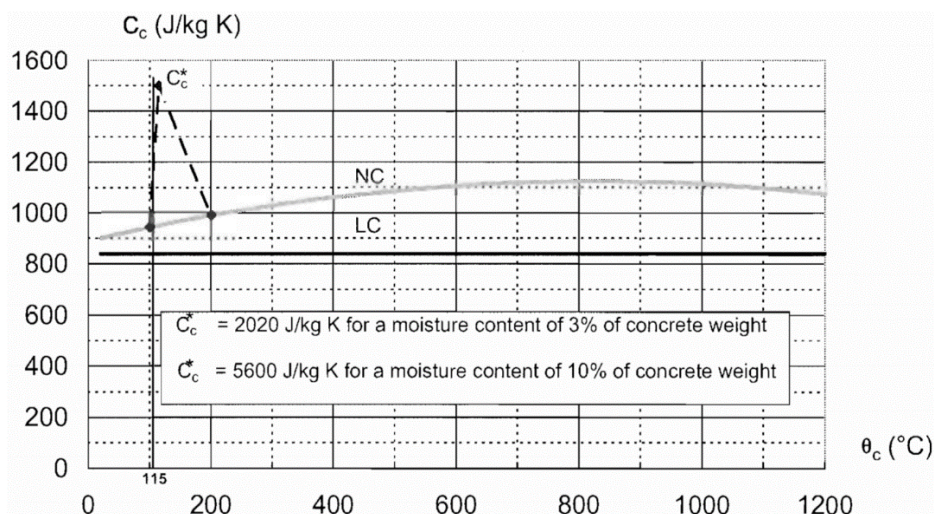
U této vlastnosti velmi závisí na typu použitého kameniva a počáteční vlhkosti. Prudký nárůst hodnoty okolo 100°C je dán vlivem odpařování volně vázané vody.



Obr. 3 Měrná tepelná kapacita dle ČSN 1992-1-2, převzato z [2]

### Měrná tepelná kapacita dle 1994-1-2

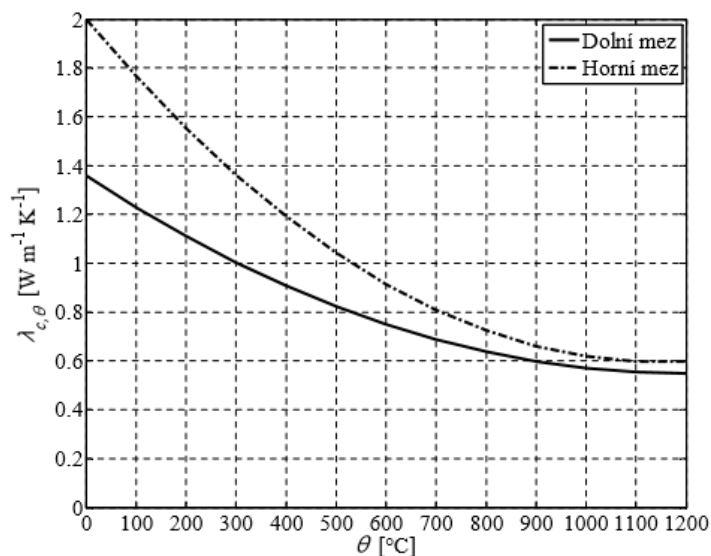
Z důvodu sprážením betonu a oceli (ocel brání odpařování vody z betonu) uvažuje tato norma v kapitole 3.3.2 s možností zvýšit počáteční vlhkost až na 10%. To má za následek i zvýšení měrné tepelné kapacity, tzn. je potřeba více tepla k zahřátí látky o 1°C, viz obr. 4



Obr. 4 Měrná tepelná kapacita, převzato z [12]

## Tepelná vodivost

Nejvíce je ovlivněna kamenivem a výslednou porozitou. Obě normy udávají stejnou horní a dolní mez. Hodnoty znamenají, že se zvyšující se teplotou beton méně vede teplo, což je způsobeno vypařováním vody z póru a jejich vyplnění vzduchem, jenž je špatný tepelný vodič (tohoto principu se používá u izolačních materiálů). Obě normy uvádějí stejnou hodnotu.



Obr. 5 Tepelná vodivost betonu dle ČSN 1992-1-2 [2]

## 1.4 Teplotní analýza

### 1.4.1 Způsoby teplotní analýzy

V současné době existuje několik metod, jak zjistit teplotní profil průřezu nějakého prvku - viz [3] kapitola 3.1.

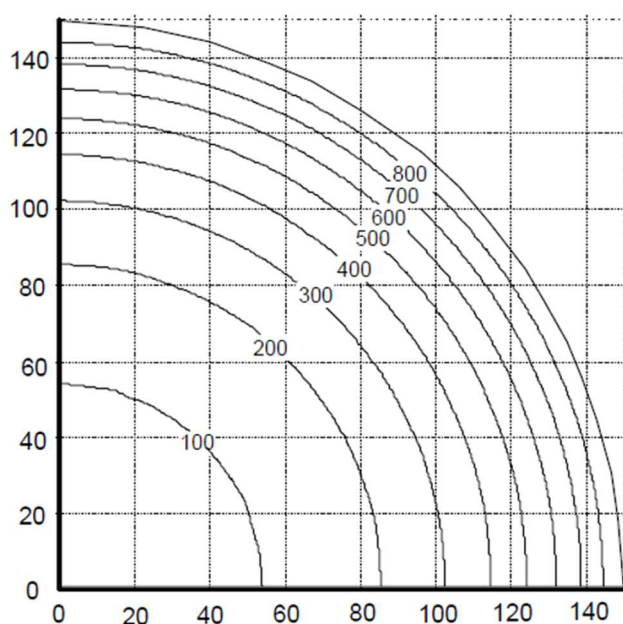
- 1) Zkoušky v laboratořích, zkušebnách či jiných vědeckých zařízeních
- 2) Analýzou s použitím matematického modelování a počítačových softwarů
- 3) Databáze již existujících teplotních profilů

Ad 1) První z nich je zkouška v požární laboratoři nebo v jiném zařízení. Takto lze získat rozložení teploty za reálných podmínek při stanovení nějakého požárního scénáře. Buď se zkouší každý jednotlivý prvek (ku příkladu zděná stěna s pórobetonových tvarovek) nebo detail (například vstup kabelového vedení požárně dělící konstrukcí, nebo třeba sádkartonový obklad ocelových nosníků), anebo existují velkorozměrové zkoušky celých budov, tyto zkoušky nejvíce odpovídají reálnému chování konstrukce při zasažení ohněm. Velká zkouška, které se zúčastnili i zástupci ČVUT v Praze se konala v letadlovém hangáru v Cardingtonu, více viz [13] Ovšem velkou nevýhodou jsou obrovské náklady na realizaci (zvláště u těch velkorozměrových) nějaké zkoušky a také to, že získané údaje lze použít omezeně. V praxi je tedy nutné na každý specifický prvek či detail provést vlastní zkoušku. Proto se používá především pro certifikaci stavebních výrobků a případně pro ověření výpočetních modelů.

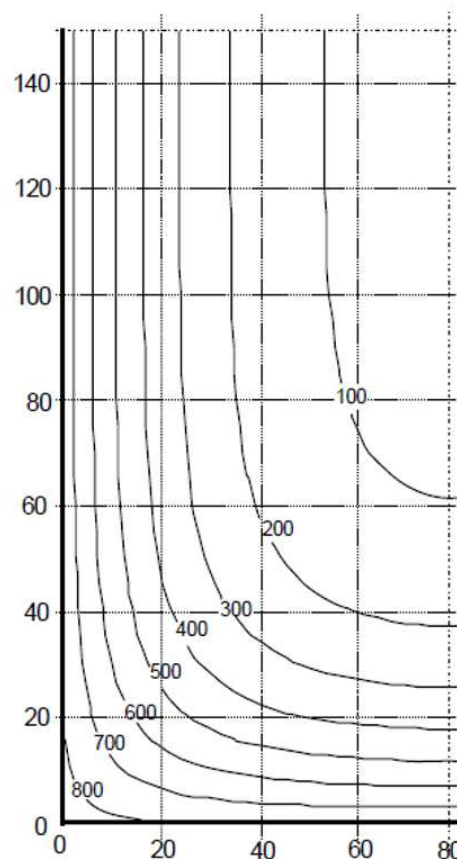
Ad 2) Dalším způsobem je matematické modelování. V dnešní době lze s výhodou využít výpočetní techniku. Jedná se totiž o složité matematické rovnice a analytické řešení je téměř nemožné. Většina těchto modelů se zakládá na metodě konečných prvků, či zjednodušené metodě konečných diferencí. Programů využívající tento způsob analýzy je na trhu velké množství a u většiny z nich lze vypočítat i rozložení teploty prvku v čase. Tyto programy založené na těchto metodách bývají uživatelsky dost nekomfortní, a vzniká tak řada uživatelsky přívětivějších programů, kde lze zjistit rozložení teploty během pár kliknutí, docela dlouhý seznam je uveden v [3].

Ad 3) Třetí nejrychlejší a nejméně náročnou jsou teplotní profily získané z předešlých zkoušek, či spočtených v nějakém analytickém programu. Některé profily jsou například uvedeny v [2], kde existuje jakási databáze údajů využitelných pro zjištění rozložení teploty. Velkou nevýhodou je ovšem fakt, že tyto profily lze použít pouze pro prvky stejných rozměrů a stejných vlastností a pro specifické prvky je tak znovu nutno použít vlastních požárních zkoušek.





(A)



(B)

Obr. 6 Teplotní profily dle ČSN EN 1992-1-2, (A) kruhový sloup s  $\varnothing$  300 mm, (B) železobetonový nosník, převzato z [2]

### 1.4.2 Matematické modelování

Před samotným matematickým modelováním musí být stanoveny některé zákonitosti, zejména fyzikální jevy na základě termodynamiky. Pro teplotní analýzu lze problematiku rozdělit na dvě části, které jsou součástí problému sdílení tepla. První je přestup tepla od vzduchu (požáru) na povrch materiálu, většinou jako kombinace proudění a sálání. Tato dvě kritéria se označují jako okrajové podmínky. Druhou částí je vedení tepla v samotném materiálu [10, 14].

#### Vedení tepla

Pro vedení tepla v materiálu platí Fourierův zákon:

$$q = -\lambda \nabla \theta$$

Kde  $q$  označuje tepelný tok,  $\lambda$  je součinitel vedení tepla a  $\theta$  je teplota.

Jedná se o tepelnou energii z jednoho bodu do druhého a Fourierův zákon nám udává, že hustota tepelného toku je přímo úměrná velikosti teplotního gradientu (neboli rozdílů teplot před a za bodem) a velmi závisí na vlastnosti tepelné vodivosti (při zvyšování teploty se mění), kdy čím více vodivý materiál tím rychleji se teplo šíří skrz něj. Průměrná tepelná vodivost betonu při 20°C jest 1,4 - 2.

Zachování energie a Fourierův zákon nám dává:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla q$$

Kde  $\rho$  je hustota,  $c$  je měrná tepelná kapacita a  $t$  je čas.

Kdy rozdíl tepelného toku je dán množstvím tepla za jednotku času a jsou zde započítány vlivy objemové hmotnosti materiálu a měrné tepelné kapacity (obě se se zvyšující teplotou mění).

### Okrajové podmínky

Tepelný tok  $q$  na povrch materiálu (okrajové podmínky) uvažujeme jako vliv požáru (tepelného namáhání z okolí) na materiál a je, jak bylo uvedeno výše, způsoben prouděním a radiací viz [10], rovnice (2.3). Následující rovnice popisuje právě složky tepelného toku. Pravá část na levé straně rovnice je vliv proudění a pravá část vliv radiace.

$$q_{cd}n = \alpha_c(\theta - \theta_{\infty}) + e\sigma_{SB}(\theta^4 - \theta_{\infty}^4) \quad [10], \text{ čl. 2.3}$$

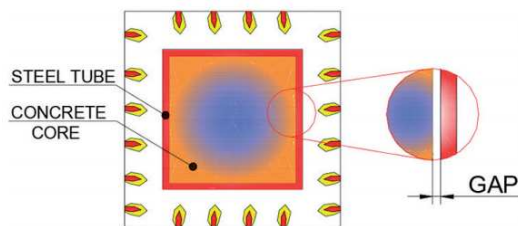
Kde  $\alpha$  je součinitel na přestupu tepla,  $e$  je emisivita,  $\sigma$  je Stefan-Bolzmannova konstanta a  $\theta_{\infty}$  je okolní teplota a  $\theta$  je teplota materiálu.

Zpočátku působení požáru je převládající složka radiace. V normě ČSN EN 1992-1-2 [2] je tento tepelný tok označen jako čistý tepelný tok dopadající na povrch tělesa v jednotkách  $[W \cdot m^{-2}]$ .

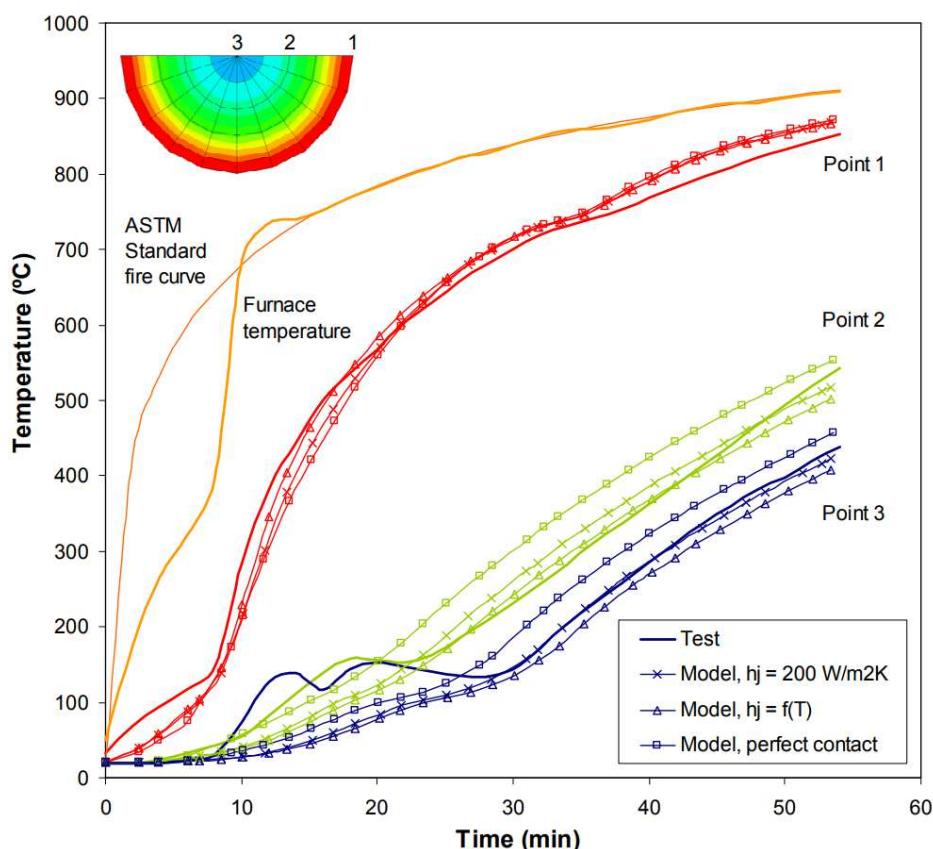
V předchozí rovnici pro čistý tepelný tok, je potřeba stanovit teplotu okolního vzduchu (požáru). Tuto hodnotu uvažujeme podle požárního scénáře, který jsme zvolili. Požárních scénářů je velké množství a v kapitole 1.1 jsem uvedl ty nejjednodušší, a to nominální normovou teplotní křivku a parametrickou křivku, kdy dosazujeme za  $\theta_{\infty}$  hodnotu  $\theta_g$  z kapitoly 1.1.2 či teplotu získanou pro parametrickou teplotní křivku.

Je potřeba zmínit také problém mezery mezi materiály u ocelobetonových konstrukcí [čl. 2.4, 15]. Za normální teploty doléhá beton těsně k oceli. Tyto dva materiály mají různou tepelnou roztažnost. Když se zvýší teplota, ocel se roztahuje rychleji a díky tomu vzniká mezi materiály vzduchová mezera obr. 7. Teoreticky by zde mělo docházet k přenosu tepla prouděním a radiací. Je potřeba zvážit, zdali tato skutečnost má nějaký zásadní vliv na rozložení teploty. V práci [16] je krátký článek, zabývající se tímto jevem. Uvažuje se, že v mezeře působí z jednoho povrchu na druhý tepelný tok. Autorka navrhuje několik variant:

- experimentální průběh teploty
- tepelný tok na hranici je uvažován jako funkce teploty  $h_j$
- tepelný tok na hranici je zjednodušeně znázorněn tepelným tokem  $h_j = 200 W \cdot m^{-2}K^{-1}$
- materiály jsou v těsném spojení, mezera není



Obr. 7 Schéma mezery mezi materiály, převzato z [15]



Obr. 8 Vliv mezery v ocelobetonu, převzato z [16]

Jiný materiál [15], uvažuje různé hodnoty tepelného toku  $100, 200, 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . V obou případech je zřejmé, že uvažování těsného kontaktu je na straně bezpečnosti, a vznik mezery nemá podstatný vliv na rozložení teploty v průřezu ocelobetonového prvku.

### Matematický model

Dále je potřeba stanovit matematický model. Modelů je několik, například v [17].

Nechť  $\Omega$  reprezentuje oblast jedno až tří rozměrovou s okrajovými podmínkami  $\Omega = \Gamma = \Gamma_D \cup \Gamma_E$ , kde  $\Gamma_D$  je dáno teplotou  $\theta_D$  a  $\Gamma_E$  představuje okrajovou podmínku danou tepelným tokem, viz výše.  $T > 0$  tj. celkový čas zahřívání. Funkci pro neznámou teplotu v místě a daném čase  $\theta(x,t)$ , můžeme zapsat, viz [čl. 2.3.4, 10]:

$$\text{pro } t \in (0, T): \quad \rho_c(\theta) c_{p,c}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_c(\theta) \nabla \theta) \quad \text{v množině } \Omega,$$

$$-(\lambda_c(\theta)\nabla\theta) \cdot n = \alpha_c(\theta - \theta_\infty) + e\sigma_{SB}(\theta^4 - \theta_\infty^4) \quad \text{na } \Gamma_E,$$

$$\theta = \theta_D \quad \text{na } \Gamma_D,$$

$$\text{pro } t = 0: \quad \theta = \theta_0 \quad \text{v } \Omega.$$

### Metoda konečných prvků

Díky moderní výpočetní technice můžeme složité problémy řešit pomocí metody konečných prvků, kdy analytické řešení by bylo téměř nemožné nebo aspoň velmi zdouhavé. Metoda konečných prvků nám umožňuje jinak složité matematické rovnice vyřešit způsobem, kdy problém rozložíme na menší a menší aproximační funkce, které definují elementární (konečné) prvky, na které rozložíme původní hmotu. Čím menší prvky jsou, tím více se přiblížíme ke skutečnému řešení. Vedení tepla je záležitost teplotního pole, které můžeme popsat jako nekonečné množství neznámých teplot. Tím že předmět rozložíme na základní elementy, určíme tak konečné množství neznámých teplot, které můžeme spočítat. Každému elementu přiřadíme aproximační, takzvanou bázovou funkci. Prvky jsou pak popsány uzly, které určují jeho místo v rovnici teplotního pole. K vyřešení tedy potřebujeme najít hodnoty v uzlech.

Je tedy potřeba sestavit lokální matici pro každý prvek (element) a poté jejich spojením získáme globální matici pro celé teplotní pole. Do této matice je třeba započítat vliv okrajových a počátečních podmínek. Rozbor metody konečných prvků je v [10] kapitola 2.3.5.

### Materiálové vlastnosti

Pro správný průběh je třeba stanovit materiálové vlastnosti. Na základě experimentů byly stanoveny rovnice pro změny materiálových vlastností (tzn. objemové hmotnosti, měrné teplotní kapacity a teplotní vodivosti). Popis těchto vlastností je uveden v kapitole 1.3 a dále pak v kapitole 3.1. Tyto vlastnosti musíme zahrnout do počátečních a okrajových podmínek, ovšem se zvyšující se teplotou se tyto vlastnosti mění, takže je potřeba je s nimi počítat jako s proměnnými v průběhu celého času zahřívání.

### Software

Při spojení všech výše uvedených věcí je možné naprogramovat software pro určování teplotní analýzy průřezů betonových prvků. V současné době existuje velké množství těchto programů, některé jsou komerční, jiné volně přístupné, seznam programů se uvádí např. v [3], [10].

## 2 Experimenty

### 2.1 Experimentální program

#### 2.1.1 Návrh experimentů

V rámci univerzitního výzkumu chování konstrukčních prvků za zvýšených teplot se uskutečnily dva důležité experimenty. V roce 2016 bylo vyhodnocení zkoušky součástí diplomové práce [4]. U obou pokusů bylo cílem zjistit a popsat rozložení teploty v betonových a ocelobetonových vzorcích. Bylo potřeba zajistit zkušební pec v požární zkušebně PAVUS, a.s. ve Veselí nad Lužnicí, kde se měl pokus odehrát. V průběhu první zkoušky došlo ke znehodnocení vzorků ocelobetonových sloupů a díky tomu bylo potřeba vyzkoušet tyto vzorky znovu. Naštěstí se naskytla příležitost vyzkoušet tyto prvky při jiném výzkumu a byly tak odzkoušeny, s určitými opatřeními (viz níže kapitola 2.4) ve druhém pokusu v roce 2017.

Obecným cílem bylo analyzovat čtyři typy vzorků. Betonová deska a betonová deska s ocelovým krytím tl. 6 mm, dále pak betonový sloup a ocelová trubka vyplněná betonem. Vše se zkoušelo v peci, kde došlo k zahřívání dle teplotní normové křivky ISO 834 po dobu 180 (120) minut. V prvcích byli rozmístěny termočlánky, které snímali po celou dobu zkoušky hodnoty teplot. Rozmístění termočlánků je uvedeno v kapitole 2.1.2.

#### **Použitý beton měl v obou případech tuto recepturu:**

Hutný beton s přírodním kamenivem (maximální zrno 16 mm) s přidavkem polypropylénových a ocelových vláken, třída přibližně C40/50.

*Tab. 1 - Receptura betonu C40/50 viz [20]*

Cement 42,5	490
Voda	154
Kamenivo 0/4 + 4/8 + 8/16	1735
Plastifikátor	4,9
Dramix 80/55 NP	40
Forta Ferro	3

### 2.1.2 Zkušební vzorky

Pro experimentální účely bylo vytvořeno několik typů vzorků. Všechny obsahovali výše zmíněný beton s polymerními a skelnými vlákny.

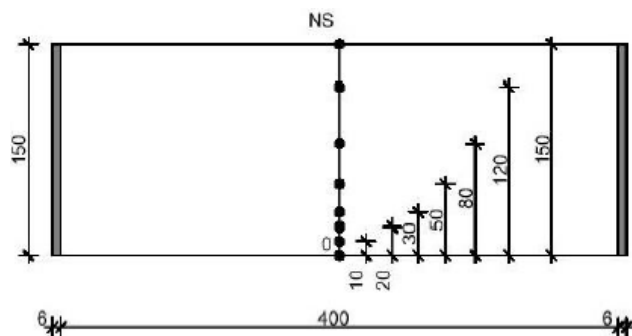
Výčet a specifikace zkušebních vzorků:

#### Deska betonová (DB)

Vytvořeny celkem čtyři vzorky. Rozměry 400 x 400 x 150 mm.



(A)



(B)

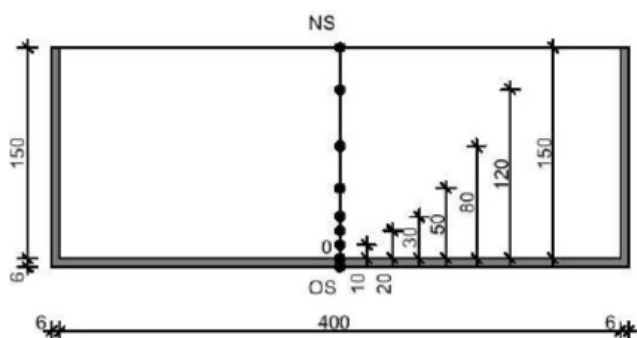
Obr. 9 (A) Forma pro desku betonovou a (B) rozmístění termočlánků v průřezu, viz [4]

#### Deska ocelobetonová (DO)

Vytvořeno celkem 8 vzorků, stejných rozměru jako DB ale s ocelovým dnem tl. 6 mm.



(A)

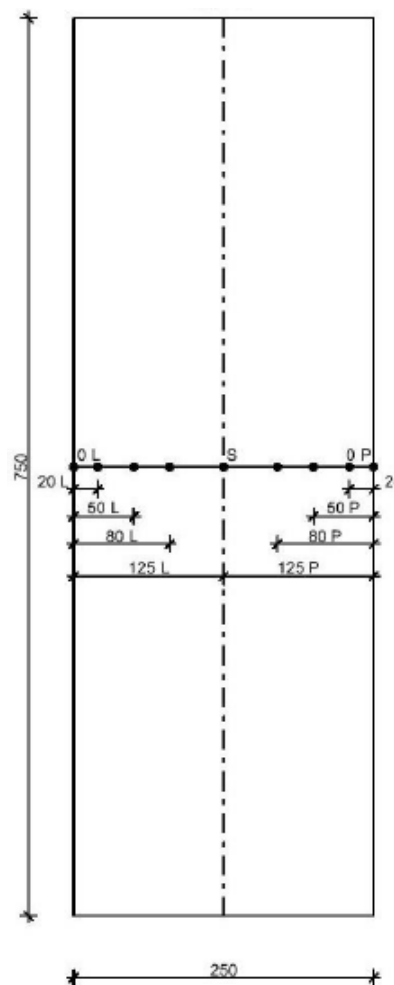


(B)

Obr. 10 (A) Forma pro desku ocelobetonovou, (B) rozmístění termočlánků, viz [4]

**Sloup betonový (SB)**

Vybetonovány 2 vzorky, průměrem 240 mm a výškou 750 mm.



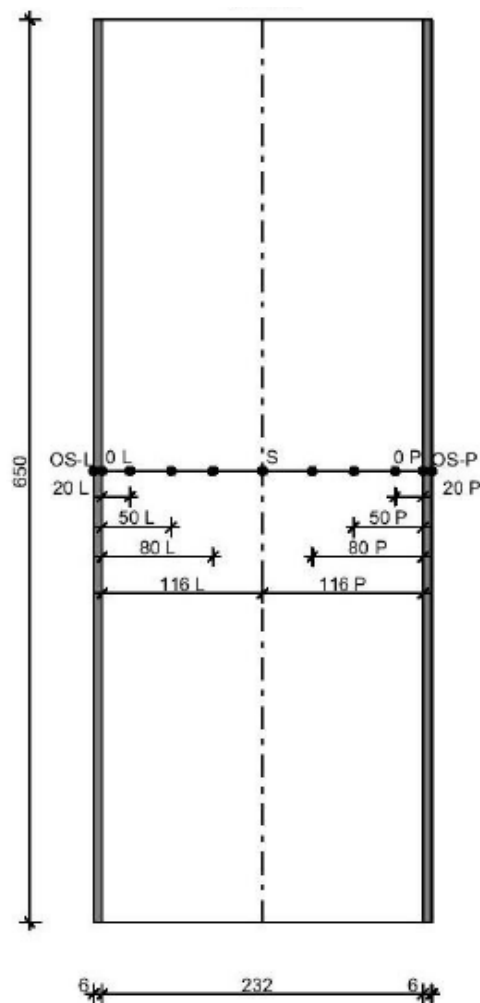
(A)

(B)

Obr. 11 (A) Forma na sloup betonový, (B) umístění termočlánků, převzato z [4]

### Sloup ocelobetonový (SO)

Zhotoveny 2 (rok 2016) a 3 (rok 2017) vzorky, s průměrem 244,5 mm a výškou 700 mm.



(A)

(B)

Obr. 12 (A) Sloup ocelobetonový, (B) rozmístění termočlánků, převzato z [4]

Vzorky byly upevněny na závitových tyčích na stropu zkušební pece. K zahřívání docházelo u desek pouze ze spodní strany a u sloupů z boku, ostatní části zůstaly tepelně odizolované minerální vatou, tak aby došlo jen k tepelnému namáhání z kýženého směru.

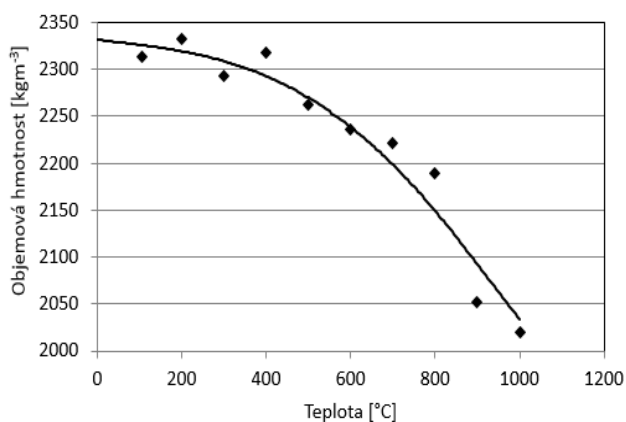
#### 2.1.3 Materiálové vlastnosti

Tato kapitola má uvést materiálové vlastnosti, jak z pohledu normových [2, 12], tak z pohledu údajů získaných při měření na katedře materiálového inženýrství na fakultě stavební ČVUT v Praze [18]. Normové hodnoty byly uvedeny v kapitole 1.3. Jedná se vlastně o vstupní hodnoty do softwarových programů v kapitole 3.1.2 a 3.2.2.

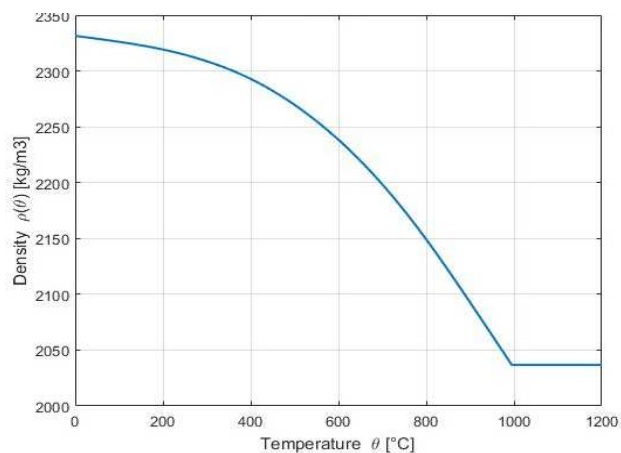


## Objemová hmotnost

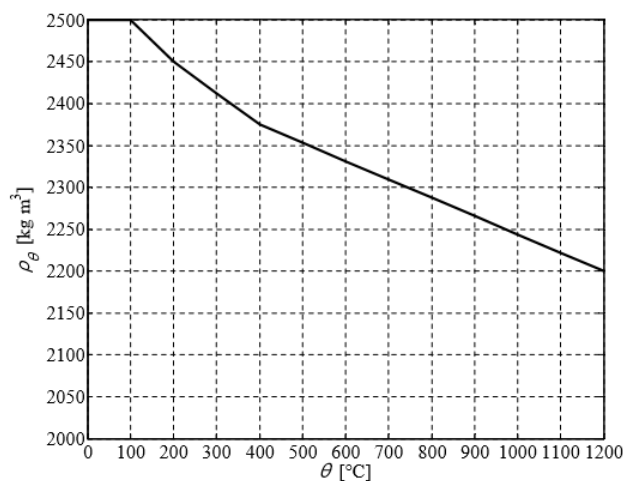
Následující grafy popisují průběh objemové hmotnosti  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] v závislosti na teplotě.



(A)



(B)



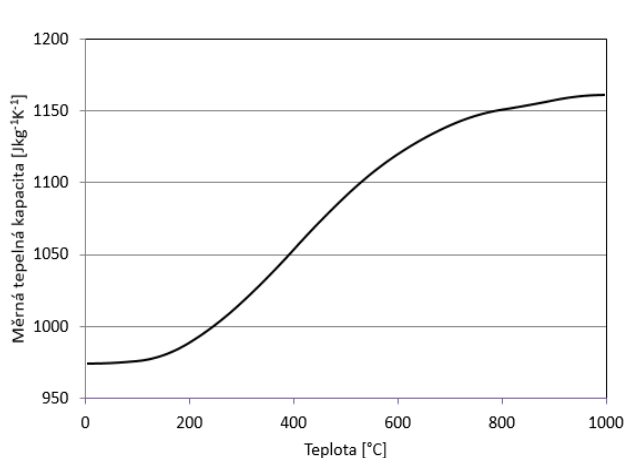
(C)

Obr. 13 Objemová hmotnost  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] v závislosti na teplotě, (A) údaje z měření [18], (B) vstupní hodnoty v TempAnalysis [7], (C) normová hodnota [2, 12] pro beton s  $\rho = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

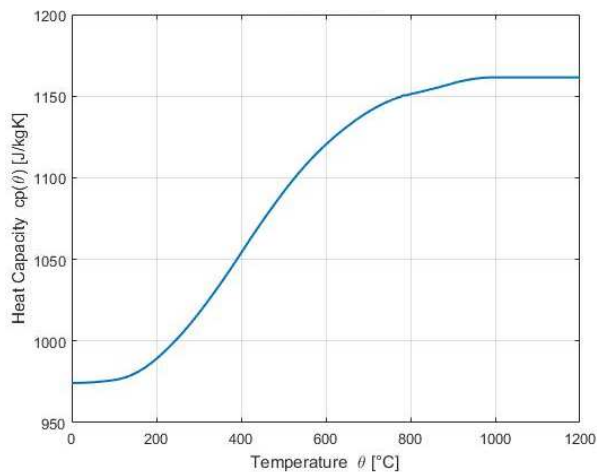
Jak je vidět na průběhu křivky, hmotnost betonu ve všech případech se se zvyšující teplotou klesá. Je to dáno především úbytkem fyzikálně a chemicky vázané vody ze struktury betonu. Naměřené hodnoty jsou do 1000 $^{\circ}\text{C}$  nad tuto hodnotu předpokládáme vlastnost konstantní. U normových křivek známe hodnoty až do 1200 $^{\circ}\text{C}$ .

## Měrná tepelná kapacita

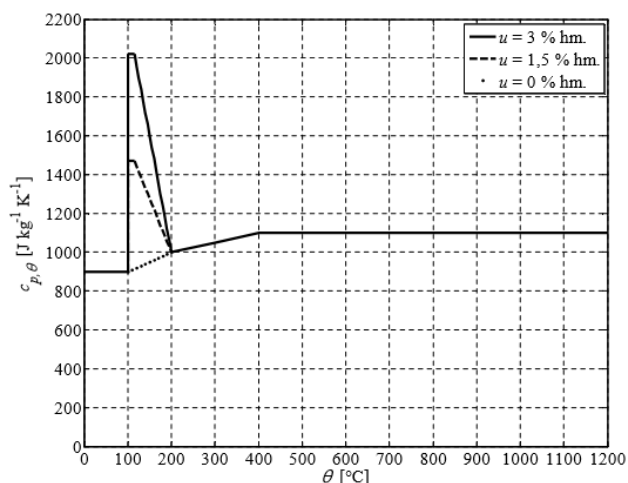
Tato kapitola představuje průběh měrné tepelné kapacity  $c$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ], v závislosti na rostoucí teplotě.



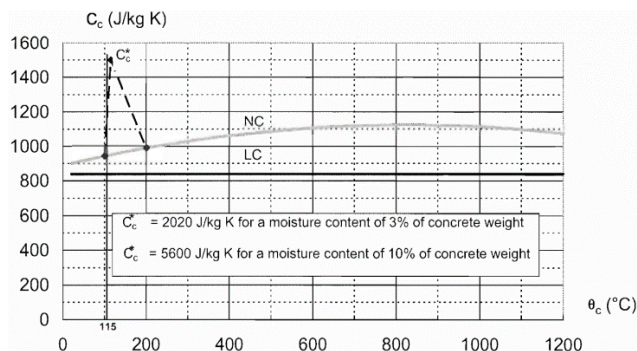
(A)



(B)



(C)



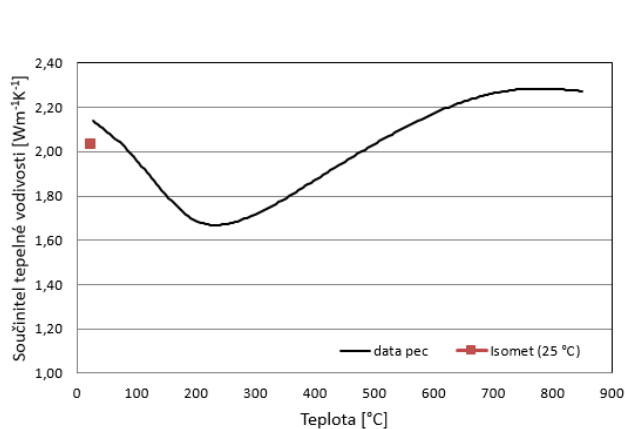
(D)

Obr. 14 Měrná tepelná kapacita  $c$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ] v závislosti na teplotě, (A) naměřená data [18], (B) vstupní data v TempAnalysis [7], (C) podle ČSN EN 1992-1-2 [2], (D) podle ČSN EN 1994-1-2 [12]

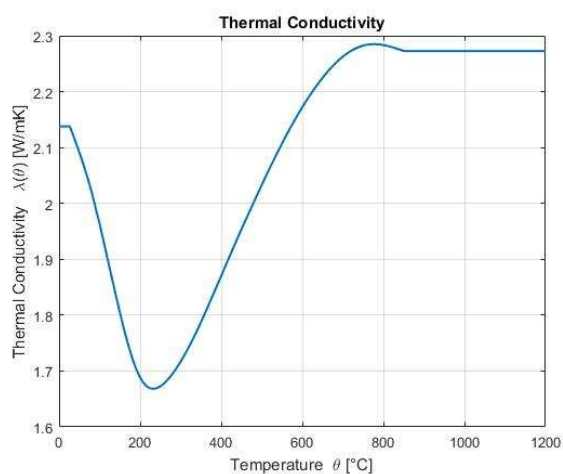
Z průběhu lze vyčíst fakt, že se zvyšující se teplotou měrná tepelná kapacita mírně vzrůstá. To znamená, že beton za vysokých teplot lépe absorbuje množství tepla. U normových hodnot je vidět, že při teplotě cca 100  $^{\circ}C$  dochází k prudkému nárůstu hodnoty  $c$ . Stalo se tak díky odpařující se vodě. Povšimněme si, že jednotlivé hodnoty se liší. Naměřené takřka po celou dobu mají vzrůstající (nelineární) tendenci, stejně tak hodnoty dle [12], u normových hodnot dle [2] jsou hodnoty po 400  $^{\circ}C$  konstantní.

## Tepelná vodivost

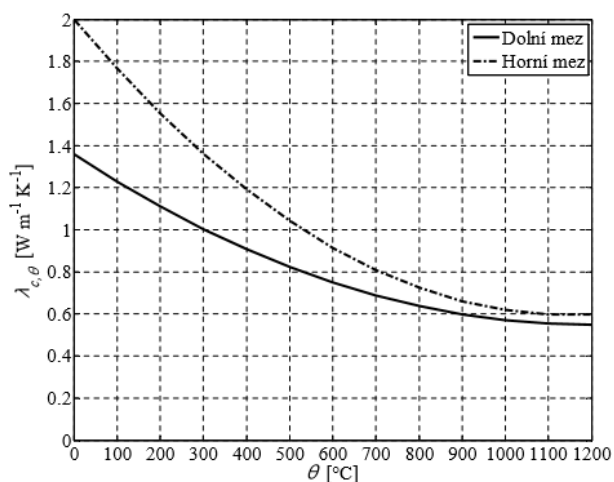
Třetí důležitou vlastností je tepelná vodivost  $\lambda_s [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ .



(A)



(B)



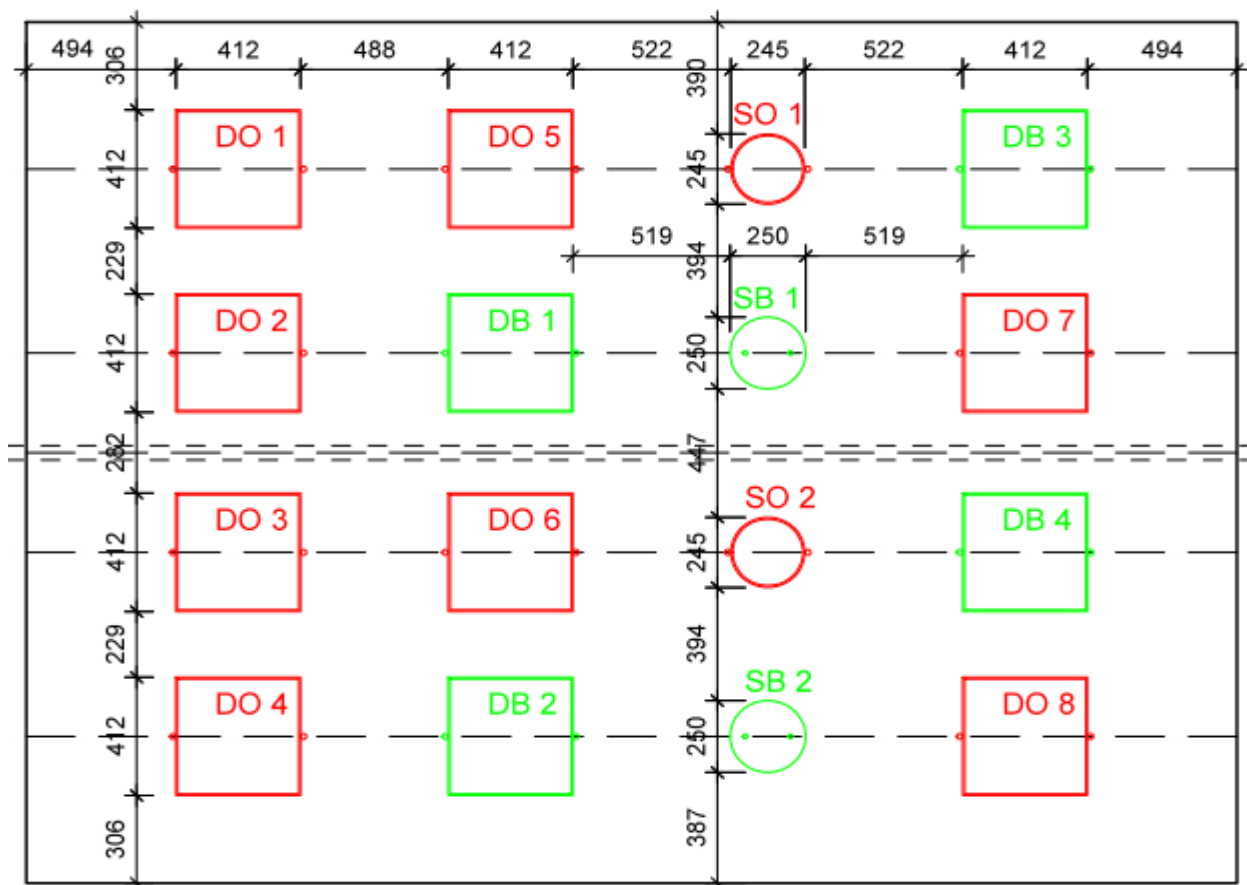
(C)

Obr. 15 Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_s [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  v závislosti na teplotě, (A) data získaná měřením [18], (B) vstupní data TempAnalysis [7], (C) podle ČSN EN [2, 12]

Se zvyšující se teplotou schopnost betonu vést teplo pomalu klesá. Je to způsobeno vytvoření velkého počtu pórů obsahujících vzduch, který je dobrým tepelným izolantem. Zde dochází k největšímu rozporu mezi normovými a naměřenými hodnotami. Je to dáno především odlišným způsobem výpočtu tepelné vodivosti. Způsob jakým byly zjištěny vlastnosti naměřené, najdeme v [23]. Oba průběhy jsou sice nelineární a zpočátku oba klesající. Ovšem u obr. 15 (A, B) dochází k nárůstu, což nekoresponduje s průběhy tepelné vodivosti dle norem.

## 2.2 Popis experimentu 2016

Při této zkoušce se měřily všechny čtyři prvky. Rozmístění vzorků v peci je znázorněno na obrázku 16. Jak bylo napsáno výše, na vzorcích byly přivařeny závitové tyče, které držely prvky na stropu pece. Kabely termočlánků vedly skrz strop do vyhodnocovací stanice. Požár simulovaly hořáky na plyn umístěné na boku pece. Tyto hořáky imitovali scénář požáru dle křivky ISO 834 (čl. 1.1.1)



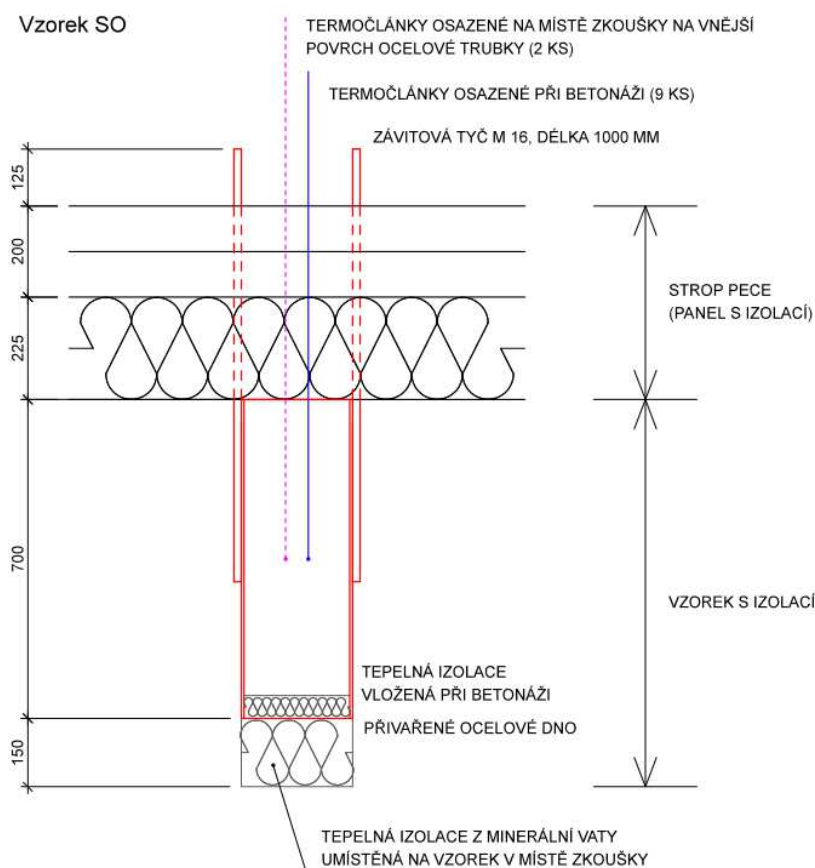
Obr. 16 Rozmístění vzorků v peci, převzato z [4]

## 2.3 Vyhodnocení experimentu 2016

Tento experiment byl podrobněji analyzován v [4]. Z této práce lze vyčíst, že experiment proběhl téměř úspěšně. Došlo totiž k nepředpokládanému problému, který nastal u ocelobetonových sloupů, kdy po cca 23. minutě došlo k vysunutí betonového středu. Jak známo mezi těmito materiály, které mají odlišnou tepelnou roztažnost, vzniká mezera (uvedeno v kapitole 1.4.2), a jelikož nebyly žádným způsobem spřaženy oddělily se od sebe a beton pod vlastní tíhou klesnul. Oheň tedy namáhal prvek nežádoucím způsobem a došlo tak ke znehodnocení naměřených dat. V cca 60. minutě byly termočlánky odstříhnuty, aby nedošlo k poškození měřicí stanice. Bylo tedy nutné změřit sloupy v jiném experimentu.

## 2.4 Popis experimentu 2017

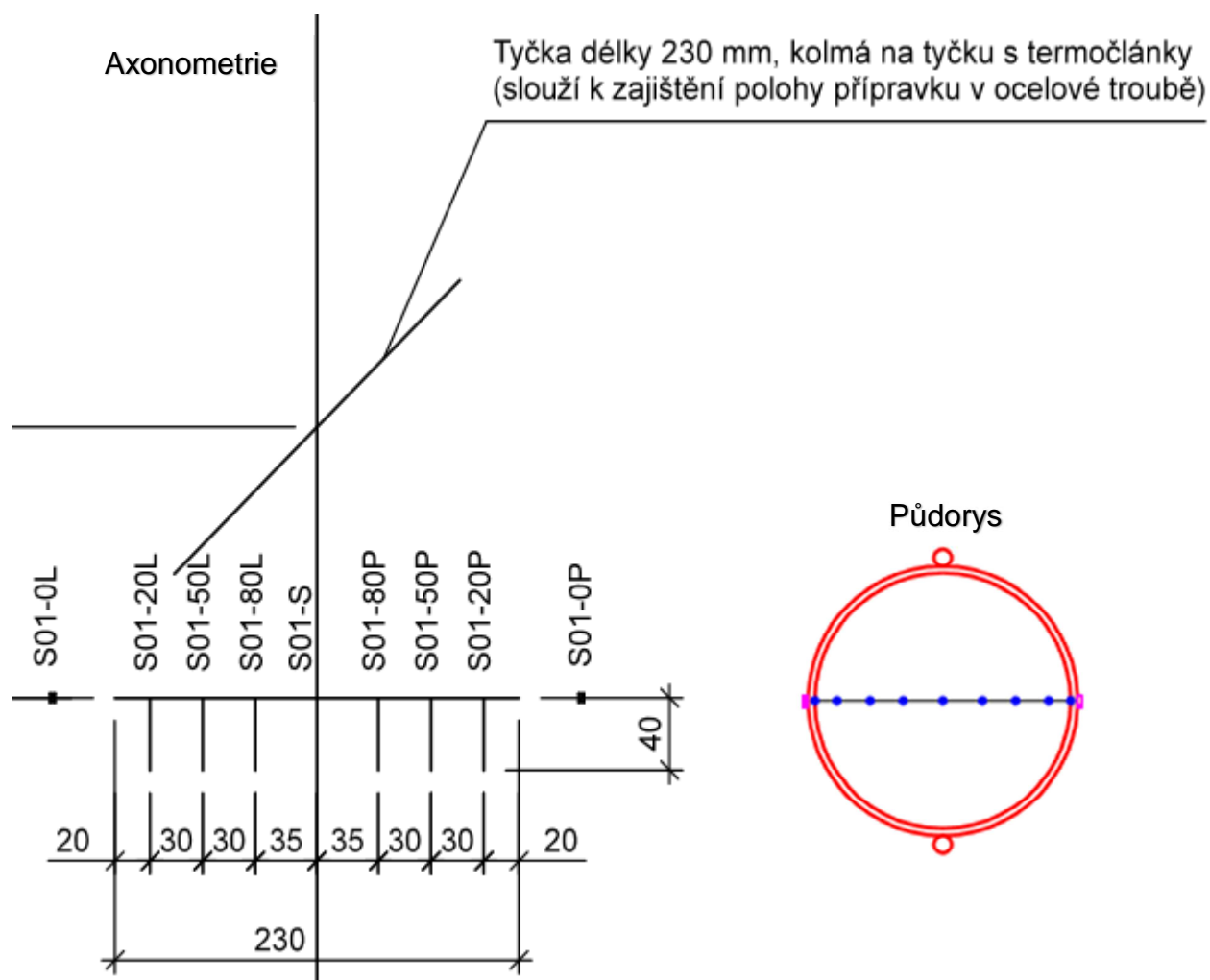
Měření proběhlo v srpnu 2017 ve zkušební peci v akreditované laboratoři PAVUS, a.s. Pro tento účel byly zhotoveny tři vzorky ocelobetonových sloupků (SO) a jeden betonový hranol (HB) sloužící pro jiný výzkum. Aby se zabránilo vysunutí betonového středu, byla na spodek trubky připevněna svarem ocelová deska. Pro lepší izolaci spodní části sloupu, byla oproti předchozímu experimentu vložena na dno sloupu při betonování tepelná izolace z minerální vaty. Schéma je znázorněno na obrázku 17.



Obr. 17 Schéma upevnění sloupku u stropu pece, převzato z [20]

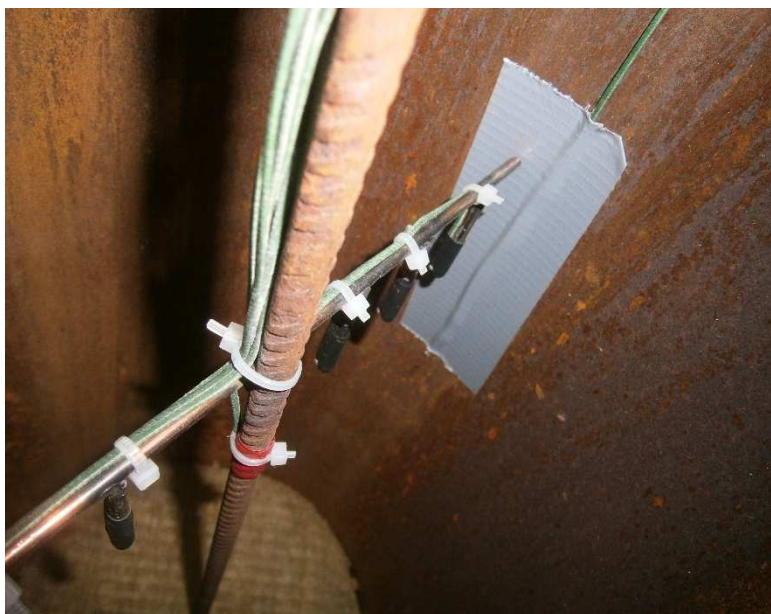


Obr. 18 Izolace dna a umístění termočlánku na povrchu, převzato z [20]

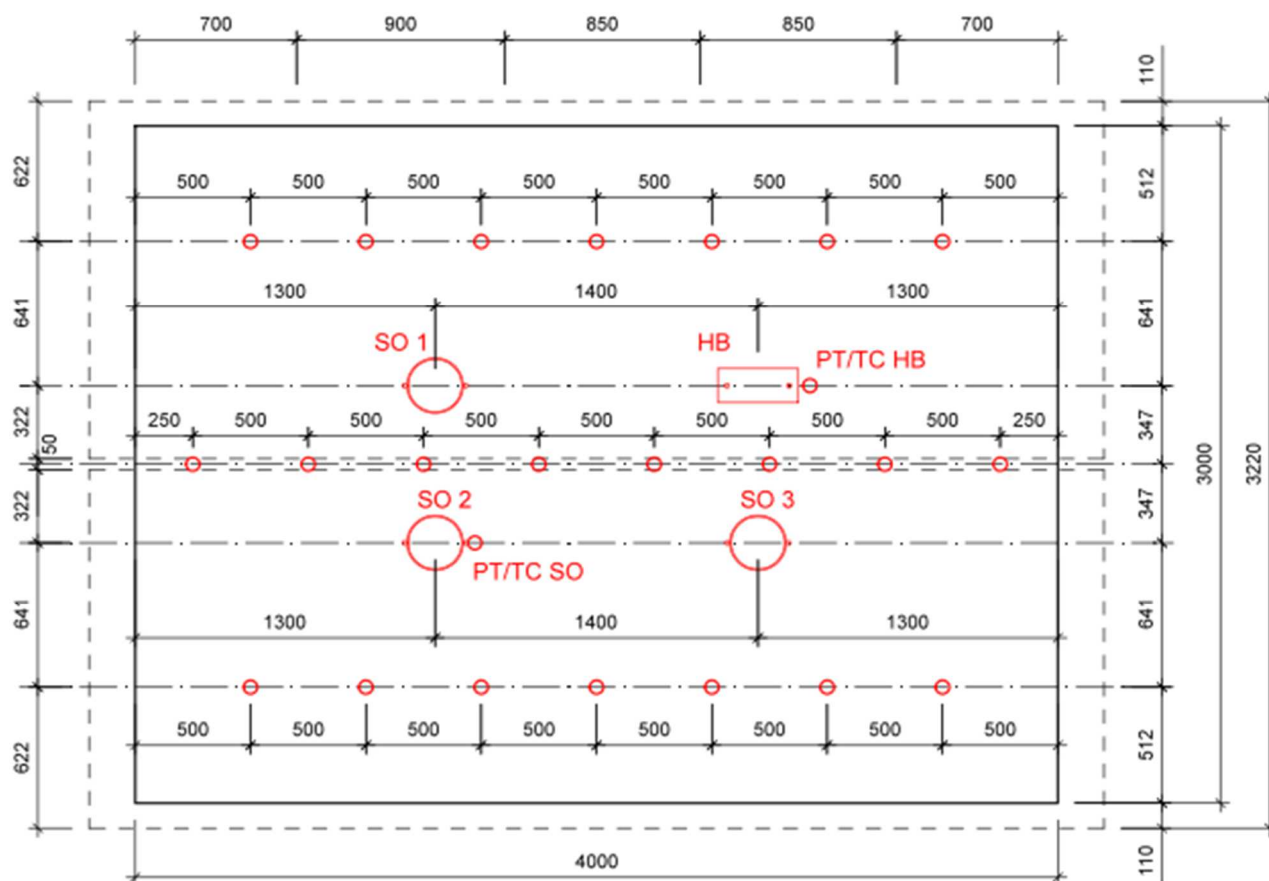


Obr. 19 Umístění termočlánků [20]

Rozložení a vzdálenost mezi jednotlivými termočlánky znázorňuje obrázek 19 a 20.



Obr. 20 Termočlánky, převzato z [20]



Obr. 21 Schéma termočlánků, převzato z [20]

## 2.5 Vyhodnocení experimentu 2017

Časově byl test zkrácen na 120 minut. Měření skončilo úspěšně, během testu nedošlo k chybám. Výsledné křivky najdeme v kapitole 4.2.2.

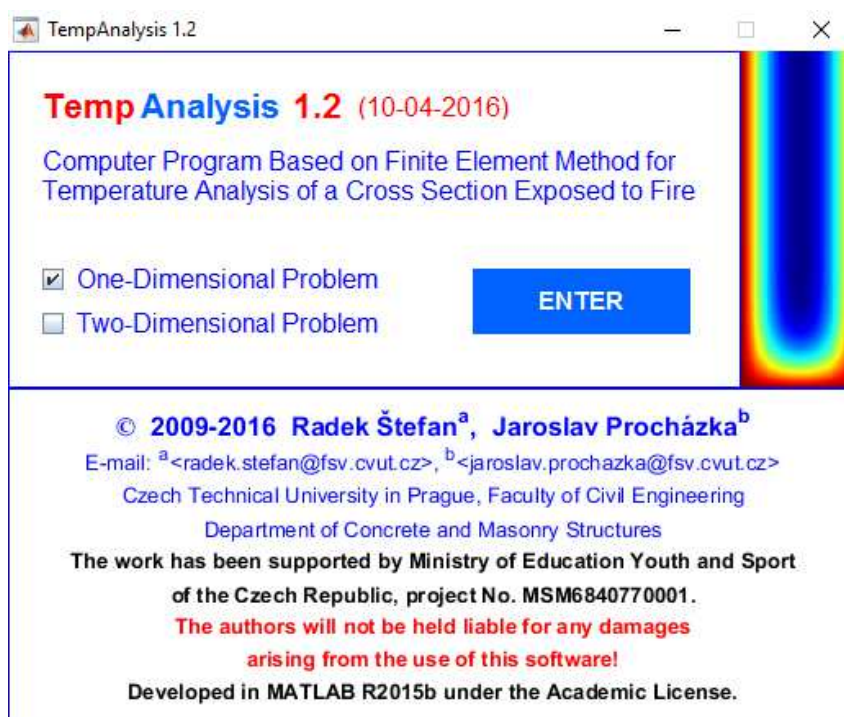
## 3 Numerické simulace

V následujících kapitolách bych rád představil některé programy pro výpočet rozložení teploty v průřezu prvků. Pro analýzu jsem vybral dva programy, univerzitní TempAnalysis a komerční program Atena. Těmito dvěma programy jsem pro srovnání provedl výpočet pro desku. Sloupy jsem již posuzoval pokročilejší verzí TempAnalysis, ve které lze počítat i se zvýšenou počáteční vlhkostí. Následující kapitoly přibližují vstupní hodnoty, krátce představují programy. Výstupy jsou řešeny v kapitolách následujících. Z důvodu toho, že Atena a TempAnalysis dávají téměř shodné výsledky, postupoval jsem u dalších prvků jen s programem TempAnalysis.

### 3.1 TempAnalysis

#### 3.1.1 Popis programu

Tento základní software je vyvíjen na katedře betonových a zděných konstrukcí viz [7]. Naprogramován je v prostředí MATLAB [24] a základem je metoda konečných prvků s aplikací na vedení tepla materiálem, konkrétně betonem, popis programu viz [3], kap. 3.2. Základní verzi softwaru použiji pro výpočet betonových desek. Vzhledem k tomu, že bylo potřeba počítat s větší vlhkostí a sloupy jsou kruhového průřezu, s čímž tato verze neumí počítat, byl vytvořen pokročilejší model [19].



Obr. 22 Úvodní okno softwaru TempAnalysis [7]



### 3.1.2 Vstupy, postup výpočtu

#### Desky dle naměřených vlastností

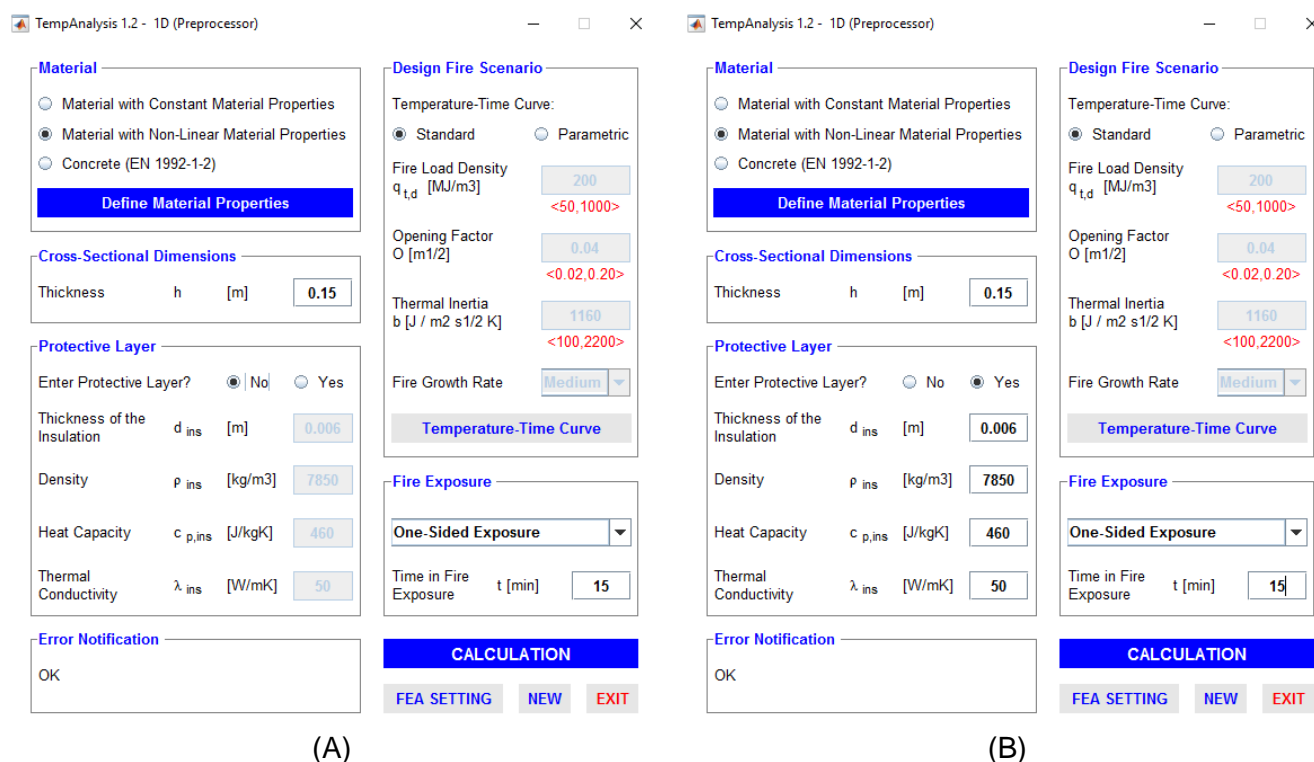
V prvním kroku bylo nutné definovat materiálové vlastnosti. Uvažoval jsem několik variant. Jednak teplotní charakteristiky betonu získané experimentem a pro lepší srovnání i normové vlastnosti pro několik různých verzí betonu.

Zprvce byl beton charakterizován nelineárními vlastnostmi, viz čl. 2.1.3. Hodnoty bylo nutné přepsat z excelových tabulek do tabulky programu, jak je vidět na obr. 23. Zadání vzorků DO o DB se lišilo v definování položky „protective layer“, kdy se vytvořila ocelová deska tl. 6 mm s materiálovými charakteristikami oceli, viz obr. 24. Požární scénář jsem uvažoval jako normovou nominální teplotní křivku ISO 834, průběh teploty viz obrázek 1 v kapitole 1.1.1.

Material with Non-Linear Properties

Density		Heat Capacity		Thermal Conductivity	
$\theta$	$\rho(\theta)$	$\theta$	$c_p(\theta)$	$\theta$	$\lambda(\theta)$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[J/kgK]	[°C]	[W/mK]
Insert Data					
1:	[0; 2331.46]	1:	[2.5; 974.2667]	1:	[26.6381; 2.1378]
2:	[5; 2331.2]	2:	[7.5; 974.2758]	2:	[30.7607; 2.1298]
3:	[10; 2330.95]	3:	[12.5; 974.2938]	3:	[34.8834; 2.1217]
4:	[15; 2330.69]	4:	[17.5; 974.321]	4:	[39.006; 2.1136]
5:	[20; 2330.43]	5:	[22.5; 974.3571]	5:	[43.1287; 2.1053]
6:	[25; 2330.17]	6:	[27.5; 974.4024]	6:	[47.2513; 2.0969]
7:	[30; 2329.91]	7:	[32.5; 974.4566]	7:	[51.3739; 2.0883]
8:	[35; 2329.65]	8:	[37.5; 974.5199]	8:	[55.4966; 2.0795]
9:	[40; 2329.39]	9:	[42.5; 974.5922]	9:	[59.6192; 2.0705]
10:	[45; 2329.13]	10:	[47.5; 974.6736]	10:	[63.7419; 2.0612]
11:	[50; 2328.86]	11:	[52.5; 974.7641]	11:	[67.8645; 2.0516]
12:	[55; 2328.59]				
Delete Data					
OK					

Obr. 23 Hodnoty materiálových charakteristik desek dle teploty [7]



Obr. 24 Zadání vlastností pro výpočet [7] (A) Deska betonová; (B) Deska ocelobetonová

### Desky dle ČSN EN 1992-1-2

Zjistilo se, že materiálové charakteristiky změřené na fakultě [18] úplně neodpovídají normovým pravidlům (čl. 3.1.2) a tak abychom získali relevantní výsledky, provedl jsem parametrickou studii pro více druhů betonu, tzn. různá objemová hmotnost, počáteční vlhkost, tepelná vodivost. Nyní uvedu vlastnosti různých druhů betonu použitých pro výpočet desek. Pro různou modelaci jsem zvolil charakteristiky nejprve dle ČSN EN 1992-1-2 [2]. Provedl jsem analýzu celkem pro 8 variant vstupních hodnot, pro desku betonovou (DB) a ocelobetonovou (DO). Pro začátek jsem zvolil maximální vlhkost 3%, což se ukázalo jako dobrý nápad.

Tab. 2 Materiálové charakteristiky

Označení	Obj. hmotnost [kg · m <sup>-3</sup> ]	Vlhkost [%]	Tepelná vodivost [-]
DB/DO <sub>(2200,3,LL)</sub>	2200	3	Spodní hranice
DB/DO <sub>(2200,3,UL)</sub>	2200	3	Horní hranice
DB/DO <sub>(2300,3,LL)</sub>	2300	3	Spodní hranice
DB/DO <sub>(2300,3,UL)</sub>	2300	3	Horní hranice
DB/DO <sub>(2400,3,LL)</sub>	2400	3	Spodní hranice
DB/DO <sub>(2400,3,UL)</sub>	2400	3	Horní hranice
DB/DO <sub>(2500,3,LL)</sub>	2500	3	Spodní hranice
DB/DO <sub>(2500,3,UL)</sub>	2500	3	Horní hranice

Tyto hodnoty jsem postupně vkládal do okénka *Define material properties* viz obr. 20. Uživatelské okno viz obr 21.

Concrete (EN 1992-1-2)

Density at 20 °C  
 $\rho(20)$  [kg/m<sup>3</sup>] 2300

Moisture Content  
 $u$  [%] <0,3> 3

Thermal Conductivity  
 Lower Limit

OK

Obr. 25 Okno pro zadávání materiálových charakteristik [7]

Teplotní profily byly stanoveny pro 15, 30, 60, 120 a 180 minutu. Maximální dosažená teplota požárního úseku ve 180 minutě dosahovala 1109,74 °C.

U všech profilů byl stanoven průběh teplot od ohřivané strany po neohřivanou. Hodnoty jsem vložil do srovnávacích grafů a vybral ten, který nejlépe odpovídal experimentům. Dále jsem optimalizoval objemovou hmotnost, a provedl analýzu pro prvek s objemovou hmotností 2350 kg · m<sup>-3</sup>, který nejlépe odpovídá počáteční zvažené hodnotě vzorků., má označení DB(2350,3,UL)

### Desky dle ČSN EN 1994-1-2

Jedna z možností je uvažovat materiálové charakteristiky dle výše zmíněné normy [12]. Jedná se především o změny v hodnotách pro měrnou tepelnou kapacitu. Jelikož základní program umožňuje maximální vlhkost 3 %, museli jsme upravit zdrojový kód připouštějící vyšší hodnotu až 10%. Dále bylo do programu doplněny výchozí hodnoty dle normy pro ocel.

Material

Material with Constant Material Properties  
 Material with Non-Linear Material Properties  
 Concrete (EN 1992-1-2)

Define Material Properties

Cross-Sectional Dimensions

Thickness  $h$  [m] 0.15

Protective Layer

Enter Protective Layer?  No  Yes

Thickness of the Insulation  $d_{ins}$  [m] 0.006

Density  $\rho_{ins}$  [kg/m<sup>3</sup>] ocel EN

Heat Capacity  $c_{p,ins}$  [J/kgK] ocel EN

Thermal Conductivity  $\lambda_{ins}$  [W/mK] ocel EN

Error Notification

OK

Design Fire Scenario

Temperature-Time Curve:  
 Standard  Parametric

Fire Load Density  $q_{t,d}$  [MJ/m<sup>3</sup>] 200  
 <50,1000>

Opening Factor  $O$  [m<sup>1/2</sup>] 0.04  
 <0.02,0.20>

Thermal Inertia  $b$  [J / m<sup>2</sup> s<sup>1/2</sup> K] 1160  
 <100,2200>

Fire Growth Rate Medium

Temperature-Time Curve

Fire Exposure

One-Sided Exposure

Time in Fire Exposure  $t$  [min] 30

CALCULATION

FEA SETTING NEW EXIT

Obr. 26 Vstupní tabulka s upravenými hodnotami pro beton a ocel [19]

Pro analýzu s upravenou vlhkostí jsem vybral beton s objemovou hmotností  $2350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , viz výše, provedu s ním parametrickou studii, abych zjistil, která hodnota vlhkosti odpovídá nejlépe. Prvky s takto upravenými vlastnostmi jsem označil  $\text{DO2/DB2}_{\text{vlhkost,tepl.vodivost}}$ . Výsledky výpočtu jsou zobrazeny v kapitole 4.1.

## Sloupy

Výpočet sloupů byl o něco složitější. Jedná se o kruhový průřez namáhaný teplem ze čtyř stran. Současná publikovaná verze programu [7] dokáže spočítat prvky s rovnými stranami. Stejně jako v předchozích případech desek jsem použil hodnoty materiálových charakteristik dle [2], [12] a [18]. Analýza proběhla analogicky jako u desek, jen jsem použil vybrané hodnoty materiálových charakteristik, které nejlépe odpovídaly ve výpočtech desek. Protože sloupy byly složeny ze stejné receptury betonu, nebylo třeba upravovat vstupní hodnoty. V druhé zkoušce byl čas měření 120 minut, jsou tedy stanoveny profily pro 15, 30, 60 a 120 minut. Výsledky uvádí kapitola 4.2.

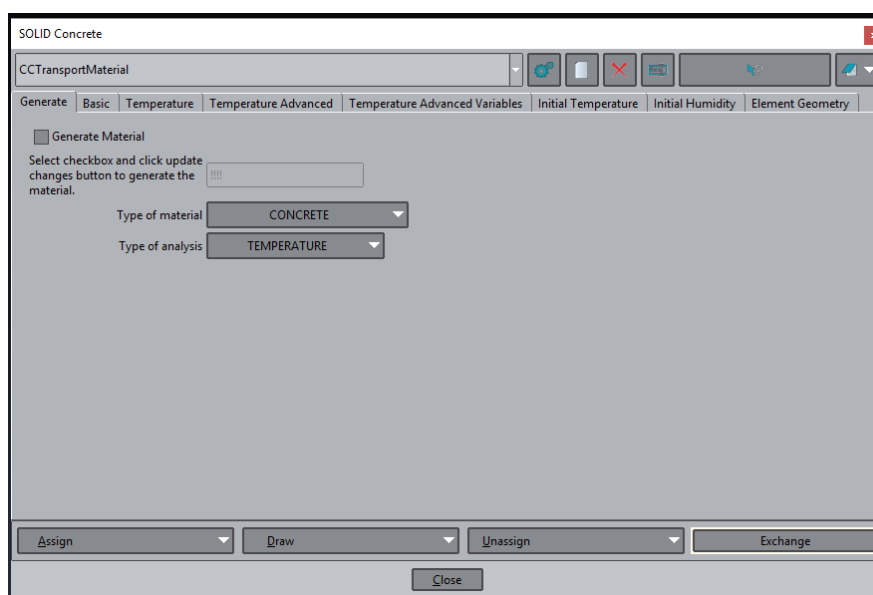
## 3.2 Atena GiD ver. 13.0.2

### 3.2.1 Popis programu

Tento software se skládá ze dvou částí. Pre-processor a post-processor jsou založeny na programu GiD vyvíjeného na Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) v Barceloně. Využívá se k namodelování vstupních hodnot a pro zobrazení výsledků. K samotnému výpočtu je využit procesor Atena od společnosti ČervenkaConsulting s.r.o. se zkušební licenci, která je omezena na 300 elementů. Manuál pro používání viz [21].

### 3.2.2 Vstupy, postup výpočtu

Analýza byla provedena pro betonové desky. Vlastnosti závislé na teplotě byly vloženy při definování materiálu. Vkládal jsem pouze materiálové charakteristiky dle [18]. Viz obr. 23 a 24.



Obr. 27 Úvodní okno pro definování materiálu [23]

K TEMP TEMP NORMAL	2.11	$\frac{J}{sec \cdot C \cdot m}$
K TEMP TEMP LEVEL7	0	$\frac{J}{sec \cdot C \cdot m}$
C TEMP TEMP NORMAL	2271464	$\frac{J}{m^3 \cdot C}$
C TEMP TEMP LEVEL7	0	$\frac{J}{m^3 \cdot C}$
<input checked="" type="checkbox"/> Activate Temperature Advanced		

Obr. 28 Hodnoty vlastností při 25°C

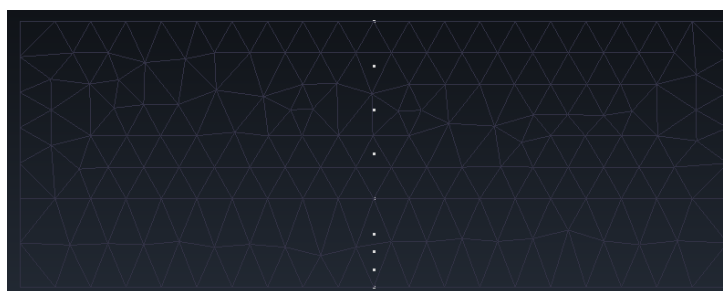
Dalším krokem bylo zatížení na povrch desky. V tomto programu lze navolit zatížení normovou teplotní křivkou ISO 834. Poté bylo potřeba navolit mesh neboli výpočetní síť. Zvolil jsem maximální možný počet 296, kvůli omezení demo licence na 300 elementů.

<input type="checkbox"/> K TEMP H FNC		
<input checked="" type="checkbox"/> K TEMP TEMP FNC		
<input checked="" type="checkbox"/> Activate K TEMP TEMP FNC TEMP		
Function for K TEMP TEMP FNC TEMP	TEMP	K TEMP TEMP
	50	0.98
<input type="checkbox"/> Activate K TEMP TEMP FNC H	100	0.92
	150	0.84
<input type="checkbox"/> Activate K TEMP TEMP FNC T	200	0.79
	250	0.78
<input type="checkbox"/> K TEMP W FNC	300	0.8
	350	0.83
<input type="checkbox"/> K TEMP GRAV FNC	400	0.88
	450	0.91
<input type="checkbox"/> C TEMP H FNC	500	0.95
<input checked="" type="checkbox"/> C TEMP TEMP FNC	550	0.99
<input checked="" type="checkbox"/> Activate C TEMP TEMP FNC TEMP	600	1.02
Function for C TEMP TEMP FNC TEMP	650	1.04
	700	1.06
	750	1.07
	800	1.07
	850	1.06
Assign		

<input checked="" type="checkbox"/> C TEMP TEMP FNC		
<input checked="" type="checkbox"/> Activate C TEMP TEMP FNC TEMP		
Function for C TEMP TEMP FNC TEMP	TEMP	C TEMP TEMP
	52.5	0.999395
	102.5	0.99965
<input type="checkbox"/> Activate C TEMP TEMP FNC H	152.5	1.002794572
	202.5	1.010422171
Assign	252.5	1.021331971
	302.5	1.034552789
	352.5	1.049307023
	402.5	1.064849912
	452.5	1.079287672
	502.5	1.091149662
	552.5	1.099765473
	602.5	1.104570253
	652.5	1.105894391
	702.5	1.103995893
	752.5	1.098534263
	802.5	1.089374659
	852.5	1.078272288

Obr. 29 Hodnoty vlastností v závislosti na teplotě [23]



Obr. 30 Mesh pro DB [23]

Poté jsem spustil výpočet a data zaznamenal do excelovské tabulky, které jsem následně vložil do grafů pro betonovou desku, v kapitole 4.1.

## 4 Výsledky a diskuze

Následující kapitola uvádí výsledky srovnání experimentu s výpočetními modely. Pro velké množství dat neuvádím všechny výpočty, které jsem provedl. Grafy by byly nepřehledné. Nejvíce výpočtů jsem provedl na betonové a ocelobetonové desce, to znamená, že jsem provedl obsáhlou parametrickou studii, ve které jsem srovnával různé hodnoty tepelných vlastností betonu. Vstupní hodnoty jsou uvedeny v kapitole 3.1.2. Poté jsem vybral nejvhodnější křivky (ty, které se nejvíce shodovaly s křivkami ze zkoušek) a provedl analýzu sloupů.

### 4.1 Desky

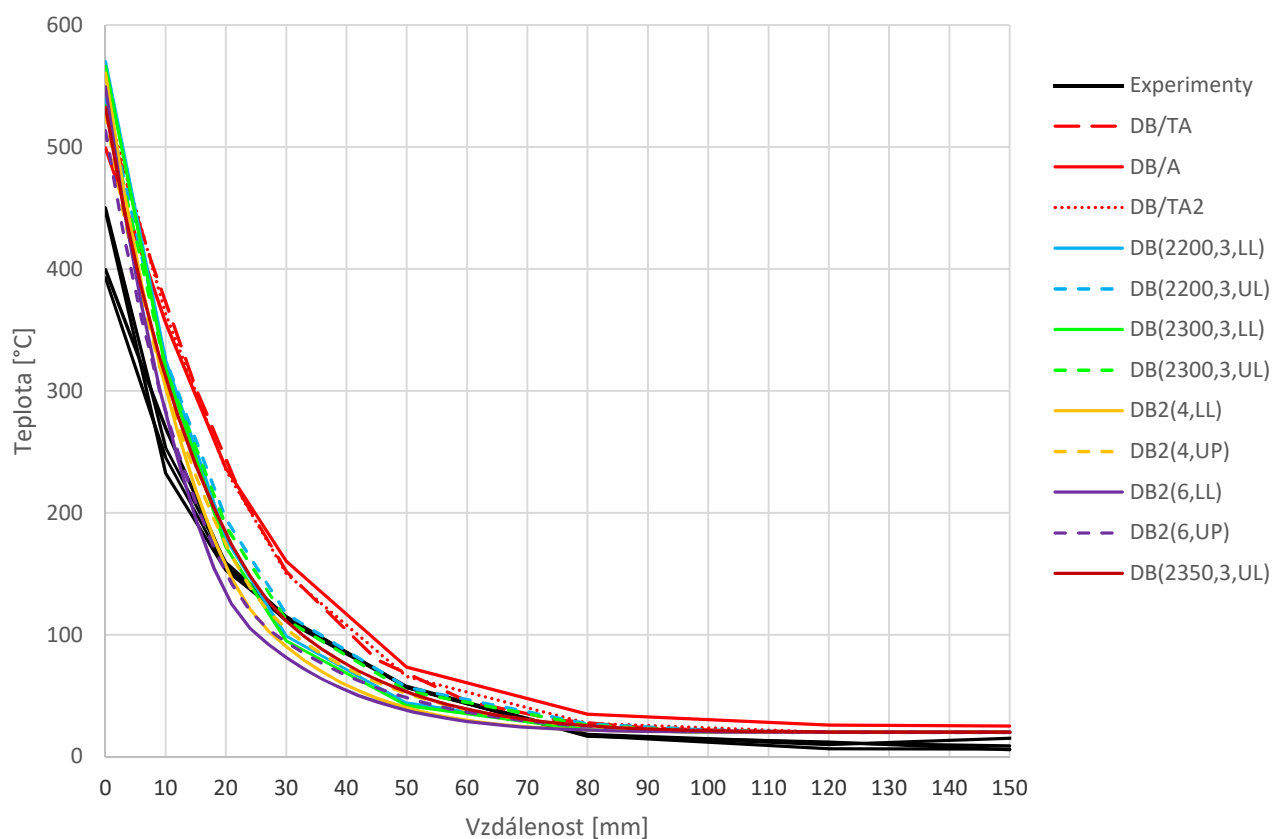
#### 4.1.1 Deska betonová

Stanovení optimálního průběhu a nejvíce odpovídající křivky mělo svoji historii. Nejprve jsem pracoval s materiálovými vlastnostmi uvedenými v [4] a dle dat změřených na katedře materiálového inženýrství ČVUT v Praze [18]. Postupem času se zjistilo, že tyto naměřené hodnoty (zvláště pro tepelnou vodivost) neodpovídají měřením dle normových pravidel, neboť jsou získány dle tzv. zjevné tepelné vodivosti [23]. Zkusil jsem tyto hodnoty poupravit, tím způsobem, že u tepelné vodivosti, která má dle [18] sestupnou a pak vzestupnou tendenci, budu uvažovat jen klesající část a v bodě zlomu bude probíhat křivka konstantně. Výsledky se přiblížily ale i tak měly stále velkou rezervu. Zaměřil jsem se tedy na porovnávání s normovými hodnotami. Nakonec jsme provedli analýzu i pro betony s upravenou počáteční vlhkostí.

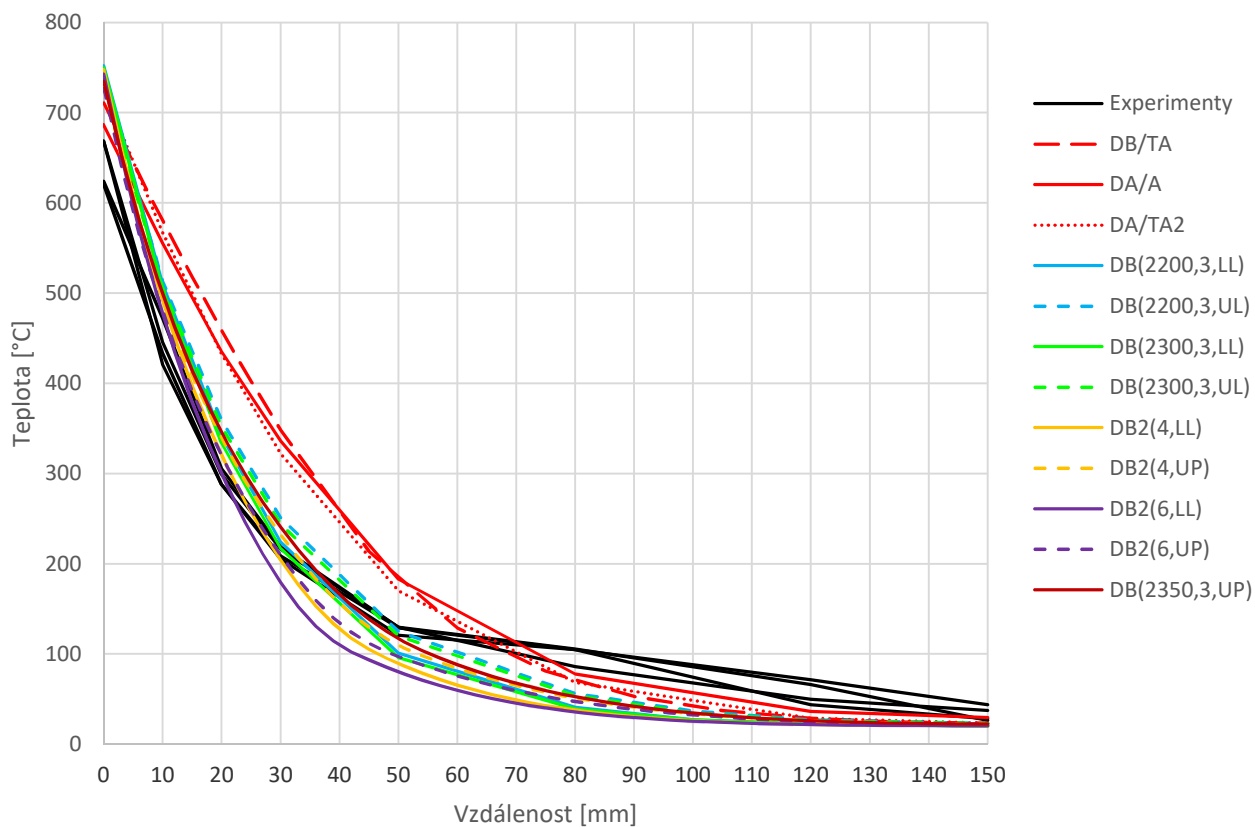
Křivky:

- **Experimenty**, značí data získaná v požární zkušebně
- **DB/TA**, značí teplotní křivky, materiálové charakteristiky dle [18]
- **DB/A**, značí teplotní křivky z programu Atena s materiálovými vlastnostmi dle [18]
- **DB/TA2** pracuje s materiálovými vlastnostmi dle [18], ale upravuje hodnotu tepelné vodivosti, u níž neuvažují stoupající část křivky, ale konstantní, viz obr. 12 (B)
- Prvky s označením **DB** viz kapitolu 3.1.2
- Prvky s označením **DB2** viz kapitolu 3.1.2
-

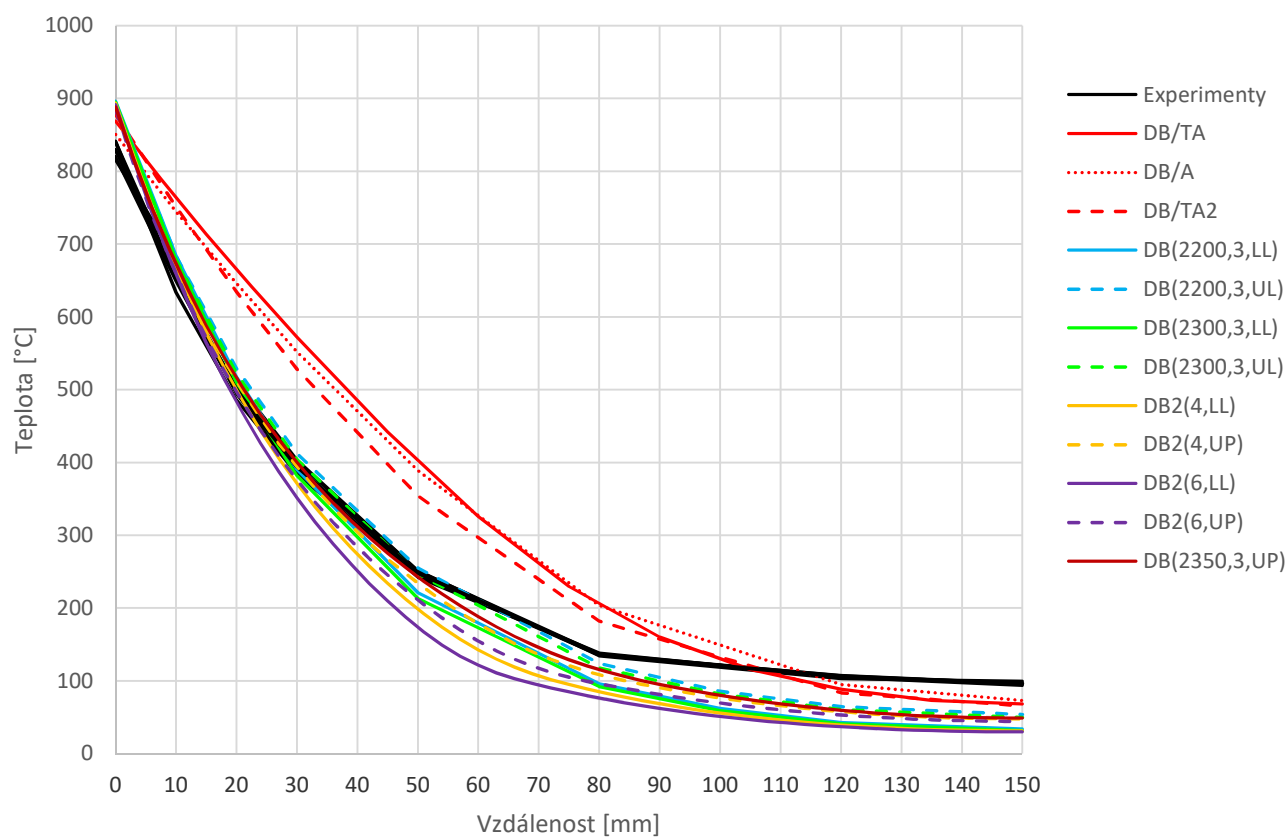
15minut



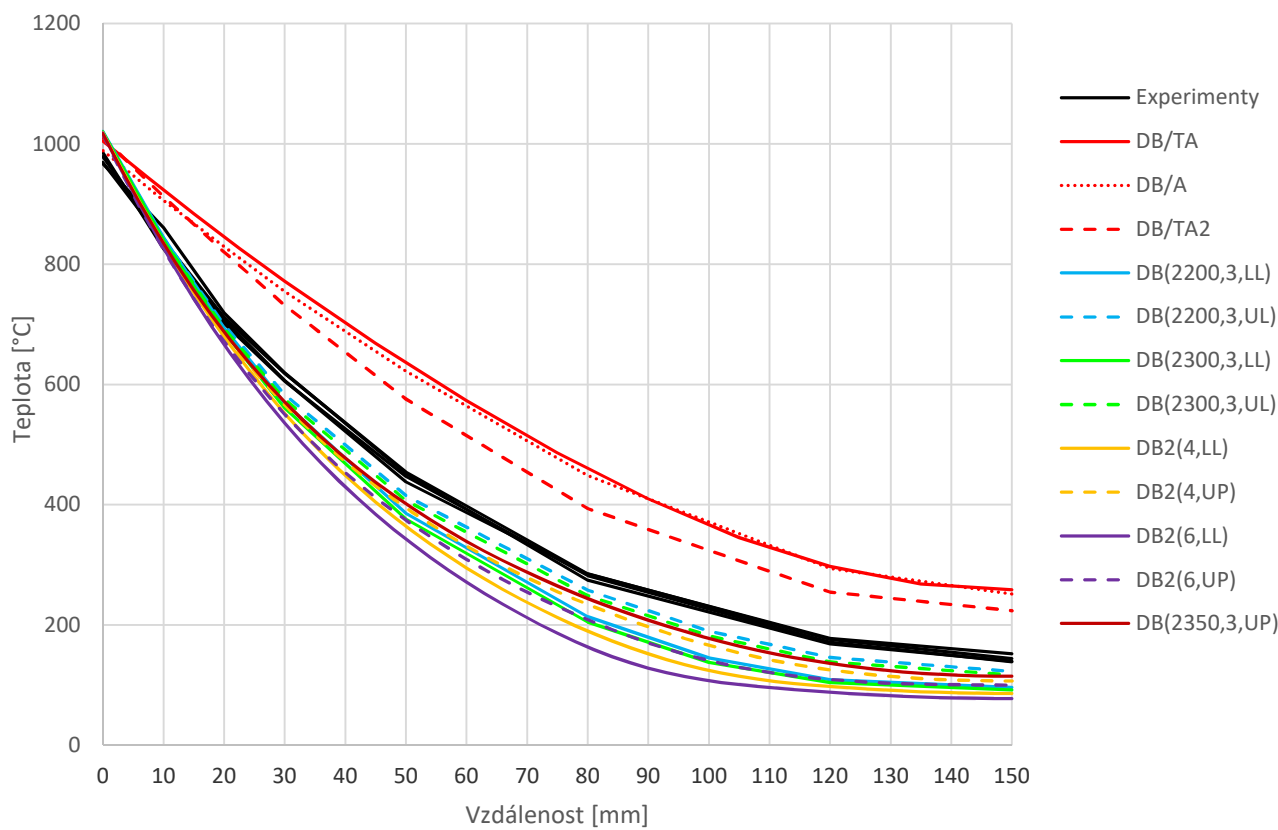
30 minut



**60 minut**

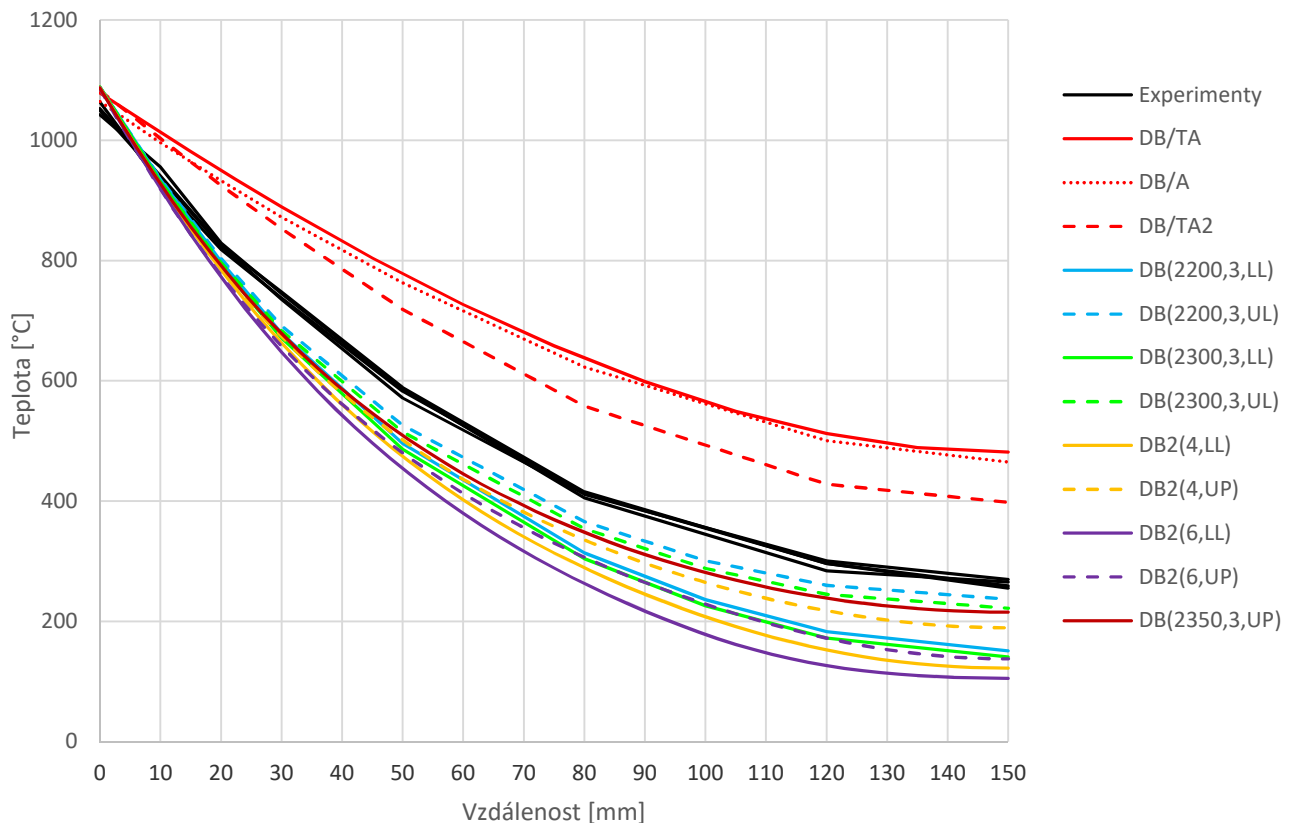


**120 minut**





## 180 minut



Na grafech si lze povšimnout několika věcí. Křivky DB/TA, DB/A, DB/TA2 udávají velmi nepřesné hodnoty (zahřívají se celkově mnohem více než vzorky z pece). Po úpravě tepelné vodivosti u křivky DB/TA2 se snižuje schopnost betonu vést teplo a celkový průběh je tak nižší a blíží se zkouškám. Je však evidentní, že tyto křivky mají stále velkou rezervu a je potřeba zjistit tepelné vlastnosti experimentálně. Jak bylo uvedeno výše, provedl jsem parametrickou studii a poté vybral prvky, které se nejlépe shodovaly. Vyšlo tak najevo, že v prvních minutách odpovídá nejlépe beton s objemovou hmotností  $2350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 3 procentní vlhkostí a horním limitem tepelné vodivosti. Později více odpovídalo měření pro beton s  $\rho = 2200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . U vzorků s upravenou vyšší počáteční vlhkostí, dochází k výraznému ochlazení a je tedy zřejmé, že použití těchto vlastností lze opravdu jen pro prvky ocelobetonové, kde je zamezeno odpařování a vlhkost zůstává v betonu.

V úvodních minutách se liší zkouška s modelem v počáteční teplotě téměř o  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lze to přisoudit emisivitě, která v ideálním případě činí 0,7. Při zkouškách ale ideálních podmínek nelze dosáhnout a lze uvažovat i hodnotu 0,65. Povšimněme si však, že po delším namáhání se teploty na povrchu shodují. Rozdíl v emisivitě jsem však při posuzování zanedbal.

V závěru této kapitoly lze říct, že matematický model lze s jistotou použít při modelování rozložení tepla v betonových 1D úlohách.

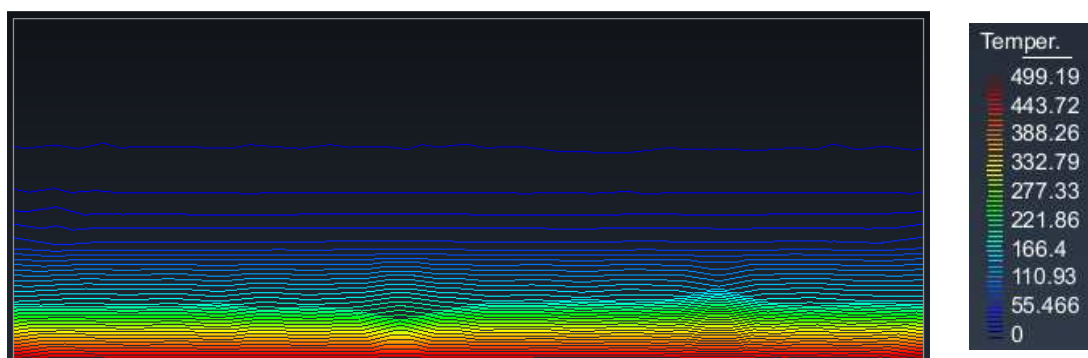
Pro úplnost ještě uvádím hodnoty okolního vzduchu, teplotu povrchu na ohřívané straně a neohřívané.

Tab. 3 Hodnotové porovnání výsledků pro betonovou desku

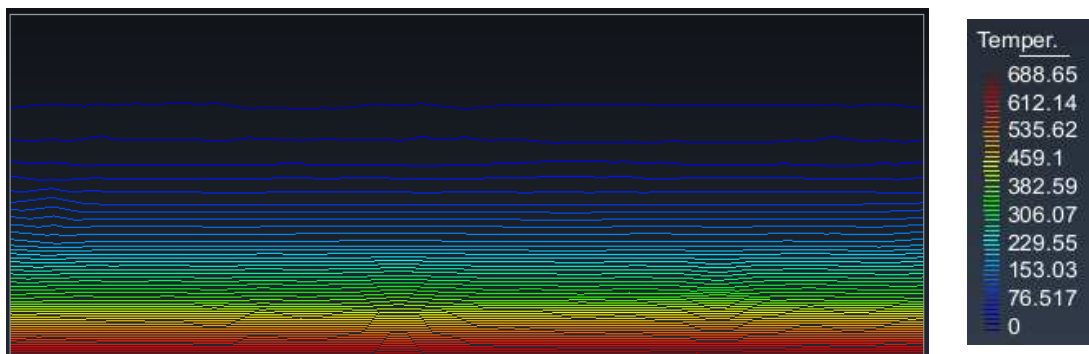
Experiment PAVUS 2016	TempAnalysis
	<b>15 minuta</b>
okolí 738,7 °C, na OS 413,9 °C na NS 8,23 °C	okolí 738,56 °C na OS 526,7 °C, na NS 20 °C
	<b>30 minuta</b>
okolí 843,19 °C, na OS 645,33 °C na NS 33,83 °C	okolí 841,8 °C na OS 710,93 °C, na NS 23,5 °C
	<b>60 minut</b>
okolí 946,58 °C, na OS 829,4 °C na NS 96,5 °C	okolí 945,34 °C na OS 868,92 °C, na NS 68,4 °C
	<b>120 minut</b>
okolí 1050,73 °C, na OS 975,1 °C na NS 143,78 °C	okolí 1049,04 °C na OS 1004,73 °C, na NS 258,35 °C
	<b>180 minut</b>
okolí 1110,93 °C, na OS 1052,1 °C na NS 262,33 °C	okolí 1109,74 °C na OS 1078,85 °C, na NS 481,29 °C

Teplotní profily betonové desky zobrazené programem Atena:

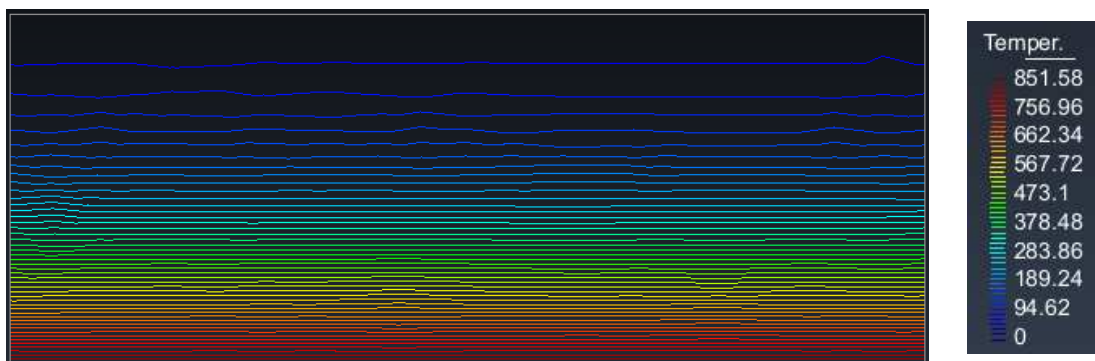
### 15 minuta



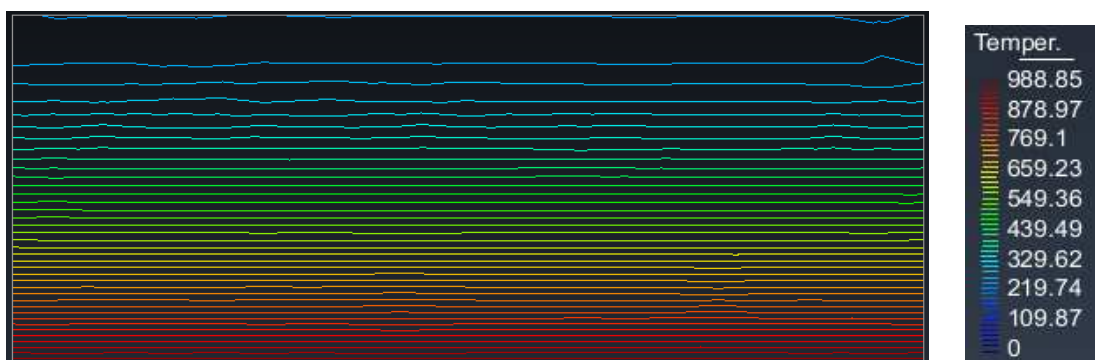
30 minuta



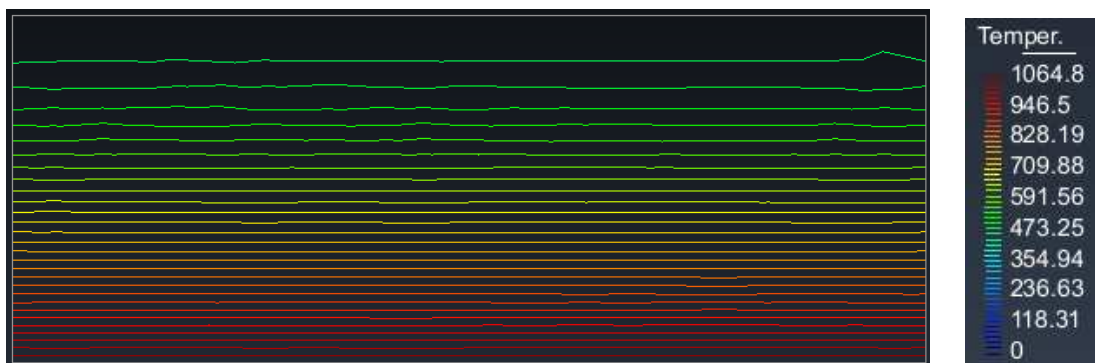
60 minuta



120 minut



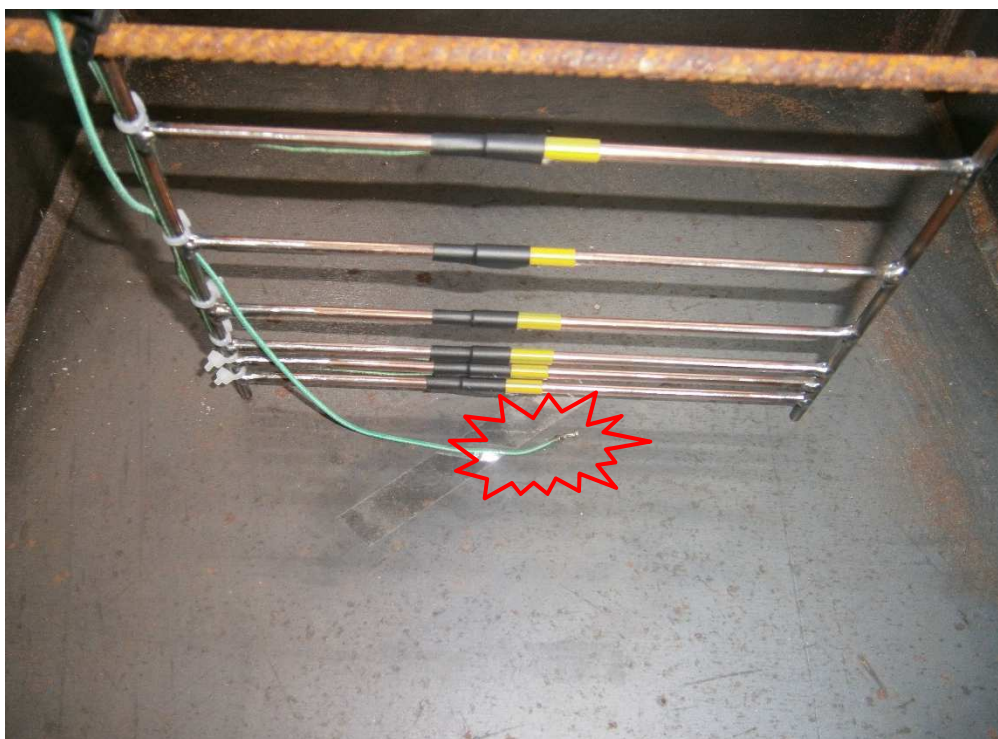
180 minut



#### 4.1.2 Deska ocelobetonová

U desky ocelobetonové jsem provedl následující úpravy. Udělal jsem stejnou analýzu jako u DB, ale nakonec jsem ponechal k srovnání betony z kapitoly 4.1.1., které se nejvíce shodovaly se zkušebními prvky. V kapitole 2.1.3 bylo zmíněno, že norma [12] pro ocelobetonové konstrukce obsahuje specifické úpravy při navrhování konstrukcí na požár. Po výpočtech ocelobetonové desky dle [2] se uvažuje počáteční vlhkost 3% objemu betonu. Norma pro ocelobetonové konstrukce připouští až 10% vlhkost. To velmi výrazně ovlivňuje měrnou tepelnou kapacitu, kdy při hodnotách  $c_p = 5600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  je dosaženo téměř trojnásobku hodnoty než dle [2]. Srovnával jsem tedy stejnou objemovou hmotnost, kombinovanou s různými vlhkostmi 4, 6, 8, 10 % a dolní a horní limit tepelné vodivosti.

Problém se ukázal v umístění termočlánků. Termočlánek na dně formy (v místě 0 mm) byl upevněn pomocí pásky, ale kvůli obavám, že by se mohla páska při vyšších teplotách roztavit a ovlivnit tak průběhy teplot, posunul se upevňovací bod cca 4 cm od vrcholku článku, který snímá teplotu, viz obr. 31. Pravděpodobné je, že při betonáži vzorků a jejich následnému hutnění došlo k situaci, kdy pod článek se dostal cementový tmel či menší kamínek, a článek byl nadzvednut, takže neměřil v předem určeném místě. Jak vyplývá z následujících grafů, je tato teorie velmi nadějná a tak byly upraveny i hodnoty z modelů. Ve skutečnosti je totiž ocel velmi dobrým tepelným vodičem, s čímž také modely nejprve pracovaly (srovnej křivky DO/TA). Lze si ale povšimnout, že zejména v počátcích si tvary křivek vůbec neodpovídají (ani přibližně). Zkusil jsem aplikovat výše zmíněnou teorii a tím došel k názoru, že teploty se měří na povrchu a pak uvnitř betonu a ne na povrchu desky. Beton se zahřívá pomaleji (oproti oceli až 40 x) a to způsobilo i pomalejší nárůst teploty.

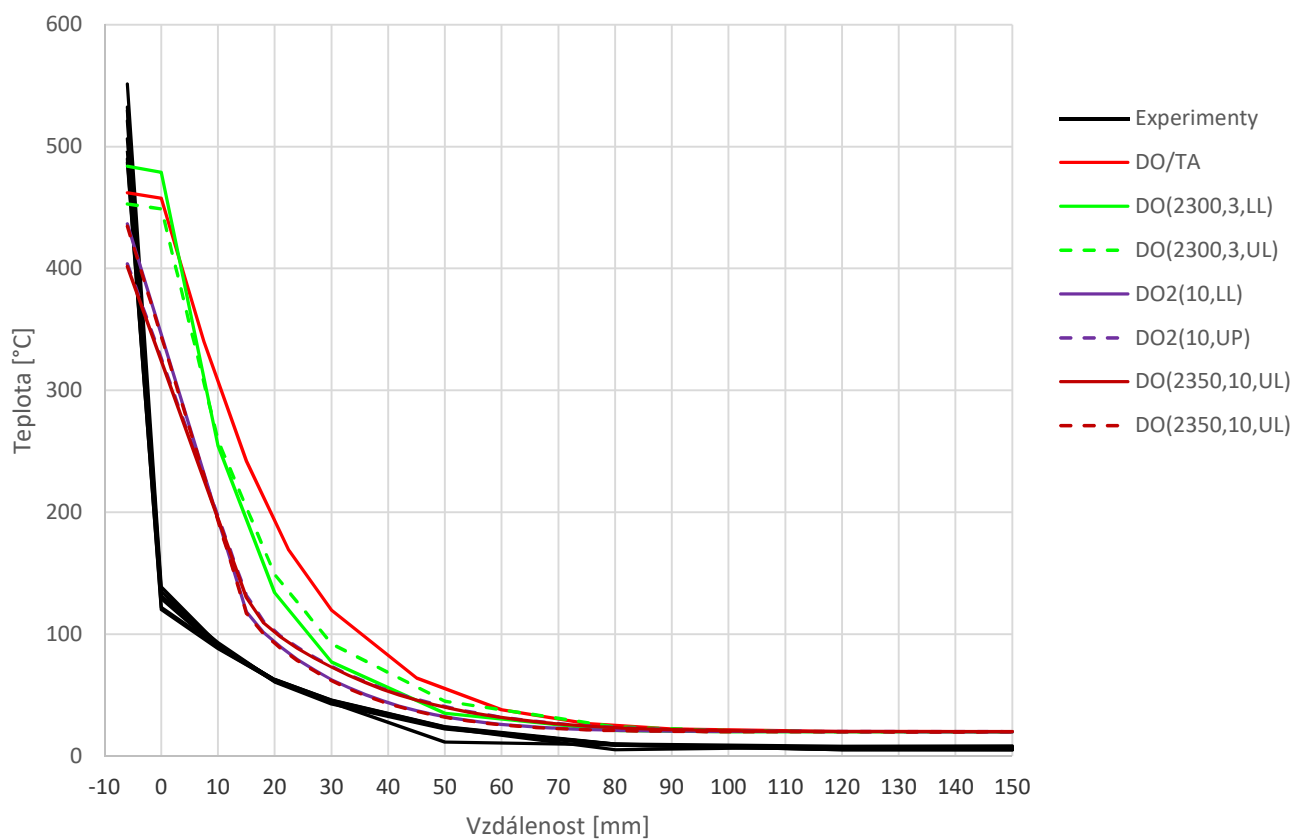


Obr. 31 Připevnění termočlánku [20]

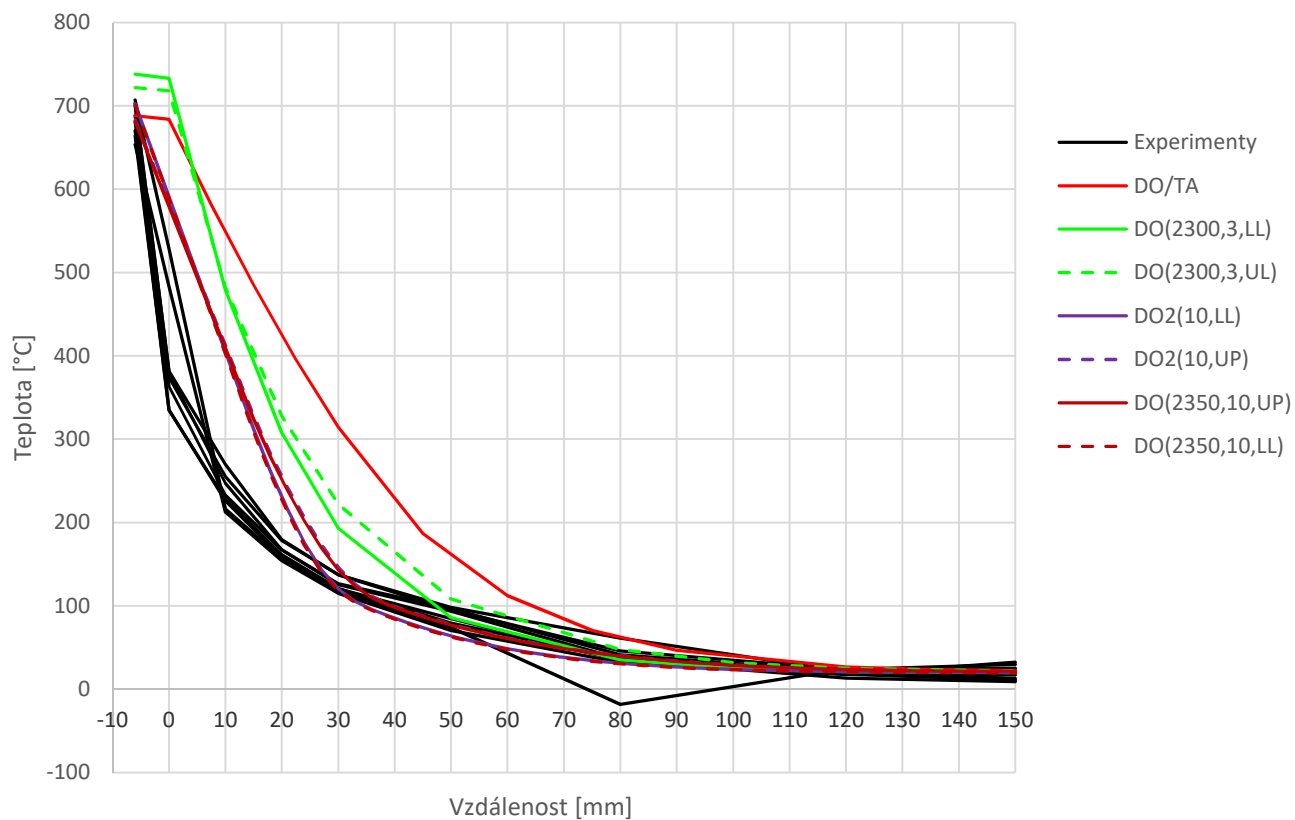
Křivky:

- **Experimenty**, značí data získaná v požární zkušebně
- **DO/TA**, značí teplotní křivky, materiálové charakteristiky dle [18]
- **DO** je deska ocelobetonová dle ČSN EN 1992-1-2 [2]
- **DO2** je deska ocelobetonová dle ČSN EN 1994-1-2 [12]

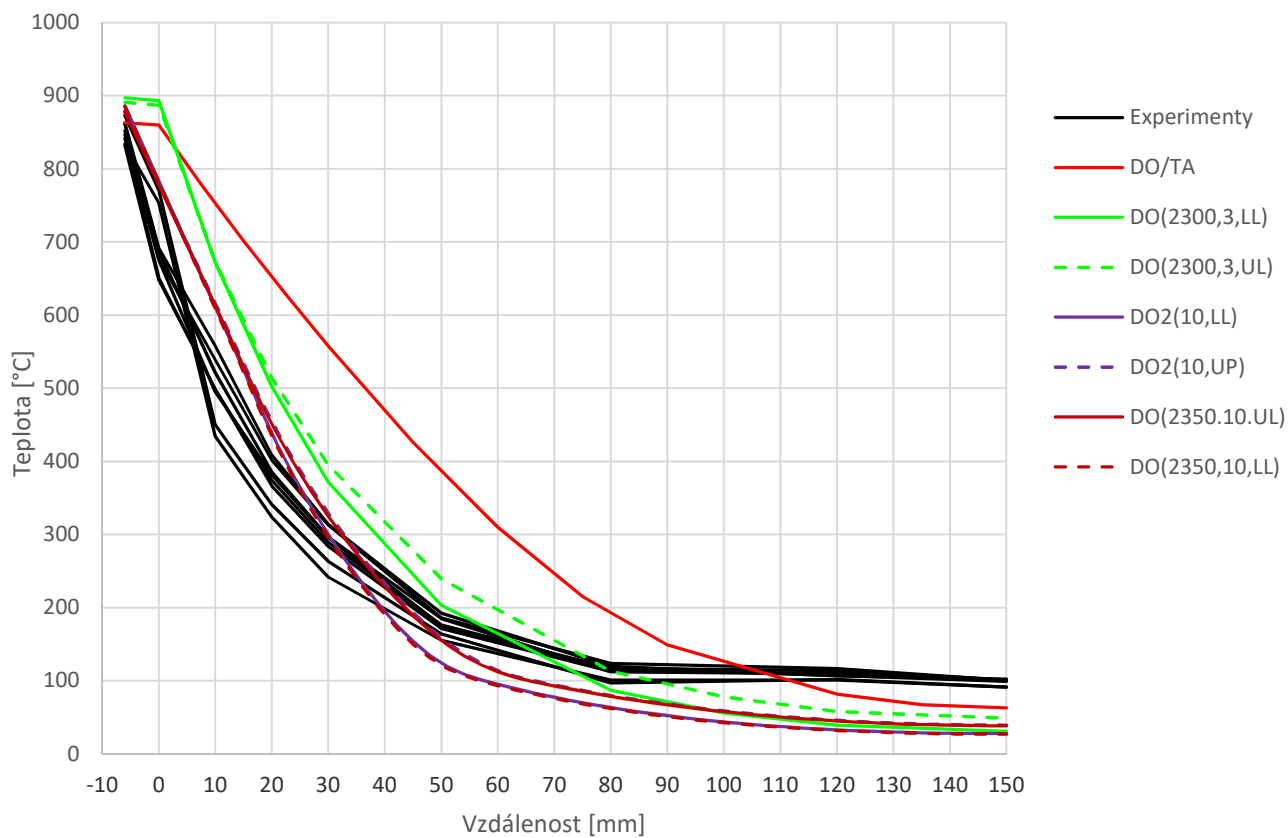
### 15 minut



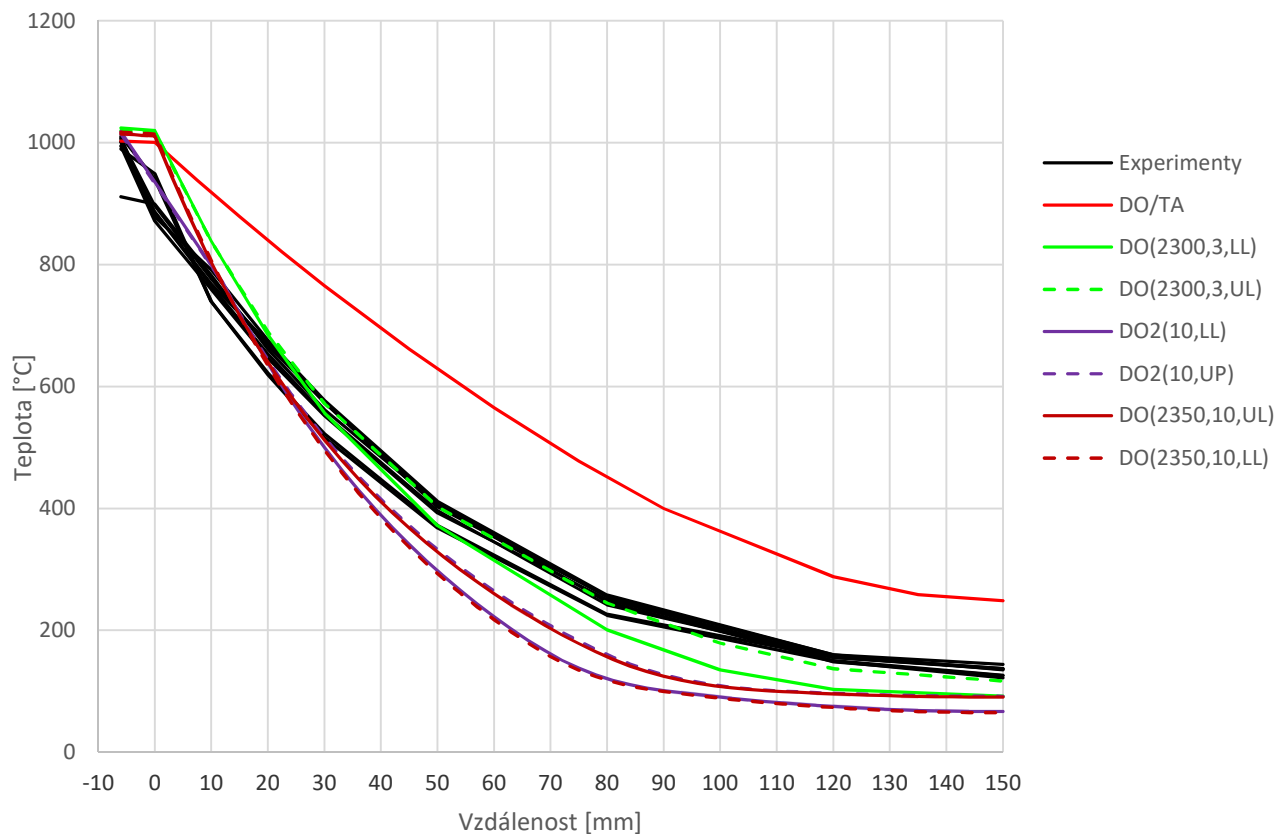
### 30 minut



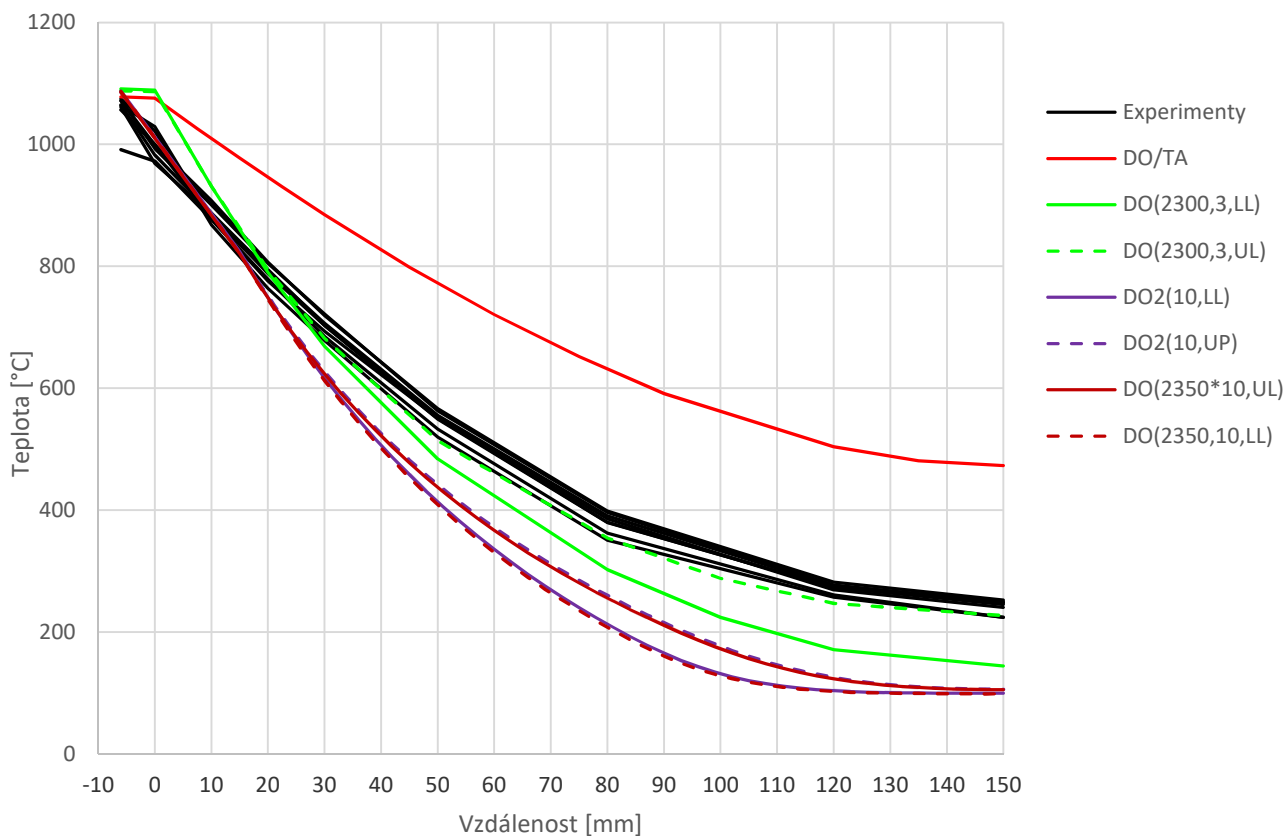
### 60 minut



### 120 minut



### 180 minut



Z obrázků vyplývá několik zajímavých věcí. Červená a zelená křivka jsou výpočty s ideálně umístěnými termočlánky. Lze vidět, že ocel vede teplo opravdu velmi dobře a vzniká tak téměř přímkové vedení tepla s mírným poklesem od -6 mm do 0 mm. Dále pak teplota klesá nelineárně. Když vezmeme v úvahu fakt, že se termočlánek posunul (cca o 15 mm) tvary křivek mnohem lépe vystihují rozložení teploty při zkoušce. Rozdílné teploty na počátku v bodě 0 (resp. – 6,3 mm), jsou dány zřejmě rozdílnou emisivitou, viz deska betonová.

Z hlediska úpravy vlhkosti lze konstatovat, že v úvodních minutách odpovídá počáteční vlhkost 10% skutečné vlhkosti ve vzorcích. Zajímavé je, že s postupujícím časem dochází k vypařování vody a vzorky se prohřívají rychleji než beton s velkým obsahem vody, jenž je naopak stále hodně ochlazován. Ze všech křivek nám nejvíce odpovídá křivka DO(2350,10,UL) neboť v počáteční fázi nejvíce kopíruje průběh zkoušek.

Pro ilustraci opět uvádím hodnoty teplot, okolního vzduchu, na ohřívané a neohřívané straně

Tab. 3 Hodnotové porovnání výsledků teplot ocelobetonové desky

<b>Experiment PAVUS 2016</b>	<b>TempAnalysis 1.2</b>
<b>15 minut</b>	
okolí 738,7 °C, na OS 514,11 °C, na NS 6,3 °C	okolí 738,56 °C na OS 462,11 °C, na NS 20 °C
<b>30 minut</b>	
okolí 843,19 °C, na OS 683,64 °C na NS 20,21 °C	okolí 841,8 °C na OS 687,99 °C, na NS 22,6 °C
<b>60 minut</b>	
okolí 946,58 °C, na OS 850,15 °C na NS 98,2 °C	okolí 945,34 °C na OS 861,13 °C, na NS 64,34 °C
<b>120 minut</b>	
okolí 1050,73 °C, na OS 990,54 °C na NS 132,84 °C	okolí 1049,04 °C na OS 1002,84 °C, na NS 248,8 °C
<b>180 minut</b>	
okolí 1110,93 °C, na OS 1056,9 °C na NS 241,31 °C	okolí 1109,74 °C na OS 1077,79 °C, na NS 472,88 °C



## 4.2 Sloupy

Tato kapitola představuje získané hodnoty z experimentů a matematického modelu pro sloupové prvky. U každého sloupy jsou obsaženy dvojí grafy. První série ukazuje rozložení teploty v průřezu v daném čase (15, 30, 60, 120, 180) a druhá série udává průběh teplot v termočláncích v čase.

### 4.2.1 Sloup betonový

Tento sloup byl zkoušen v roce 2016, viz kapitola 2.2 a 2.3 a [4]. Vyhodnocení grafů je jednoduché. Zkoušely se dva vzorky.

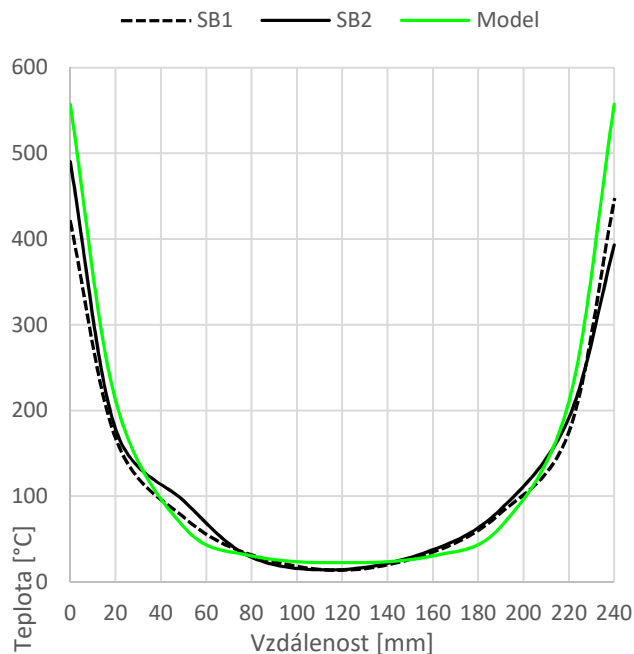
Materiálové charakteristiky pro výpočet v softwaru jsou:  $\rho = 2350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , vlhkost 3 % a horní limit tepelné vodivosti. Vycházel jsem hlavně z analýzy pro desku betonovou, kdy tento beton nejlépe odpovídal naměřeným hodnotám. Vyšší teploty na povrchu jsou opět problémem rozdílné emisivity na povrchu, ta totiž na začátku určuje pohltivost tepla povrchem materiálu.

Křivky:

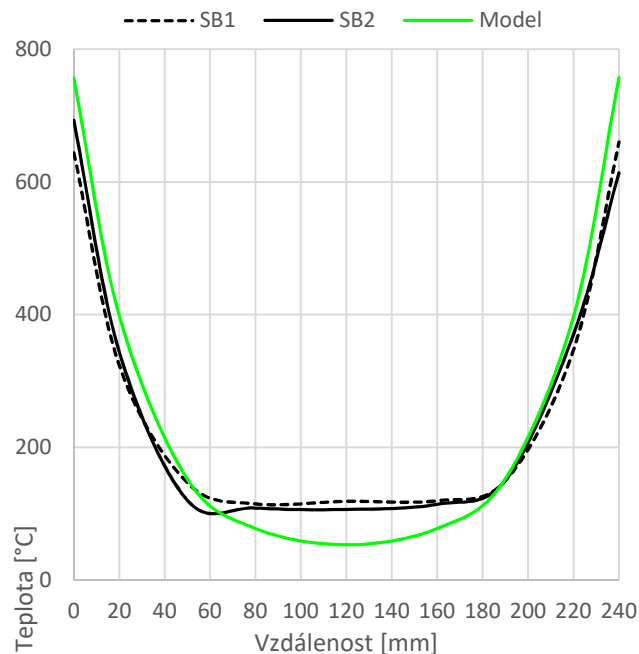
- **SB**, značí experimentální výsledky
- **Model**, značí vypočtené hodnoty

Obrázky grafů z hlediska rozložení teploty v průřezu v daném čase:

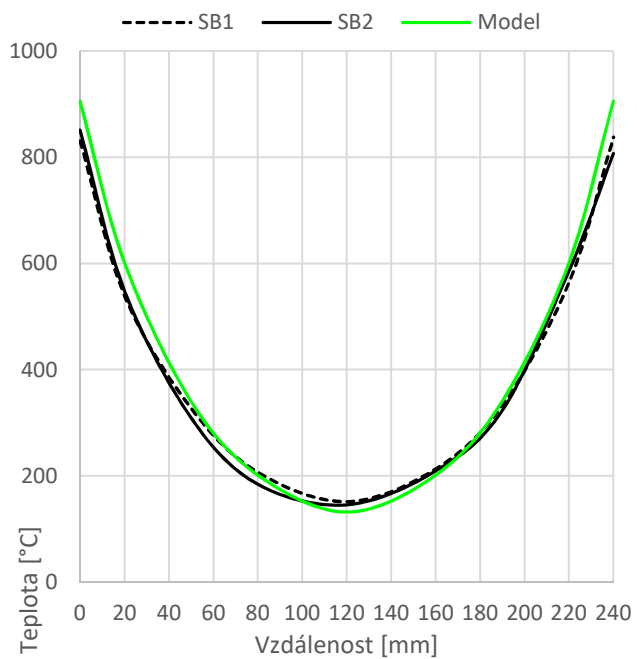
**15 min**



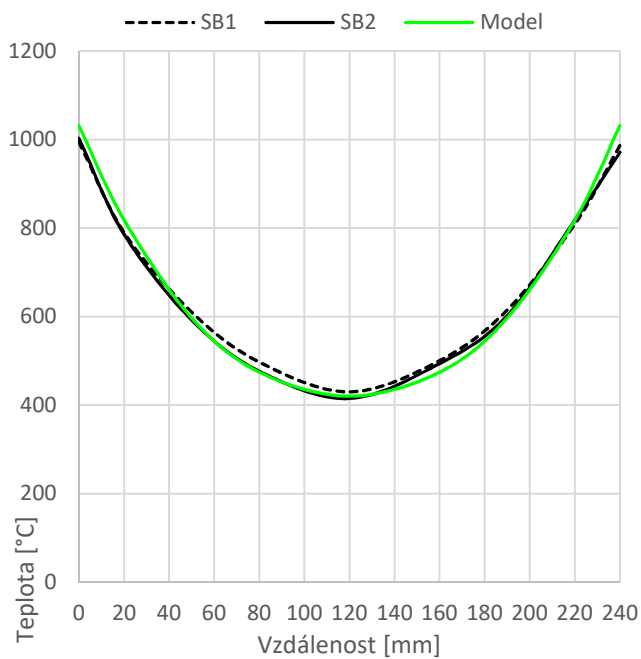
**30 min**



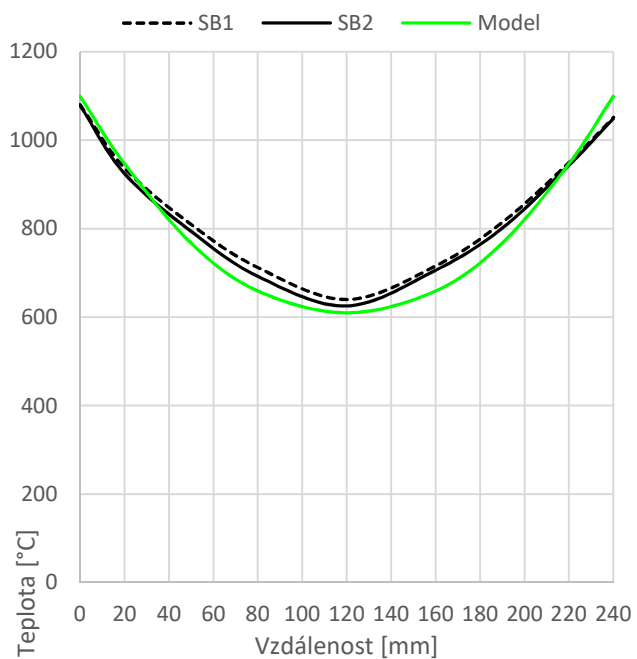
**60 min**



**120 min**

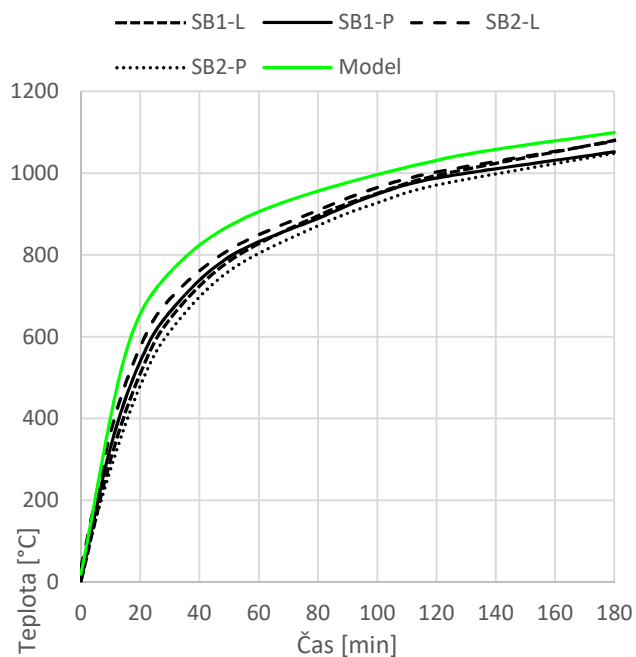


**180 min**

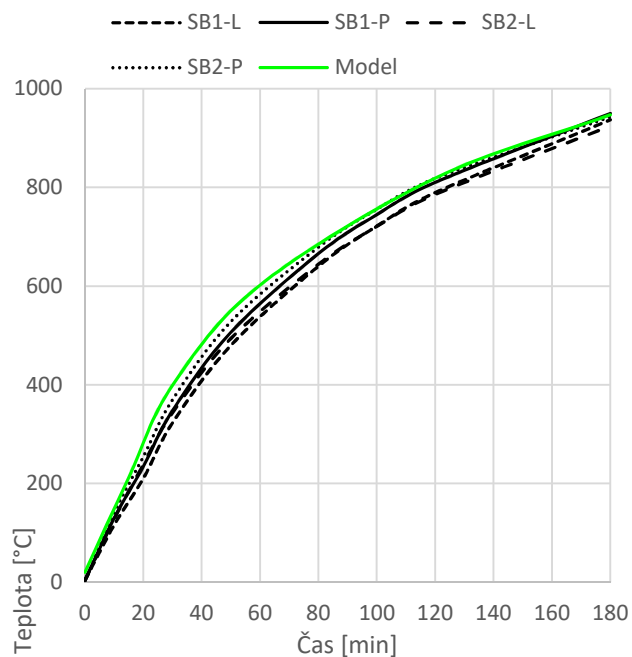


Grafy teplot v termočláncích (viz. článek 2.1.2) v průběhu času.

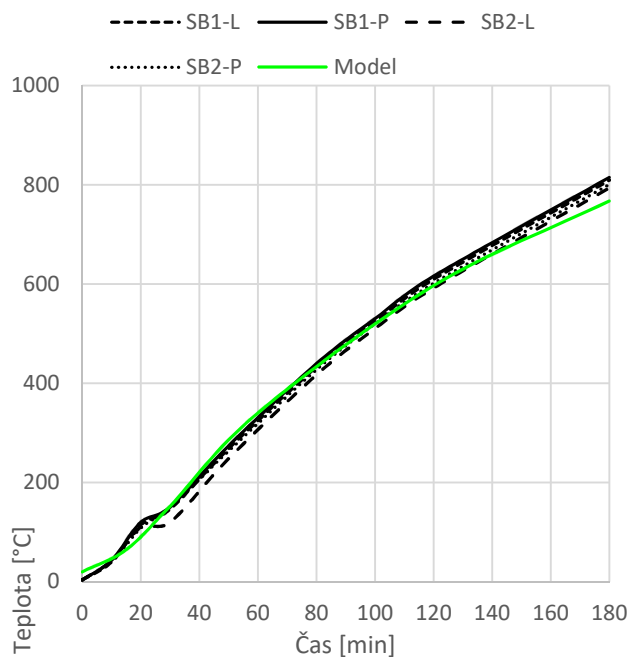
### 0 mm



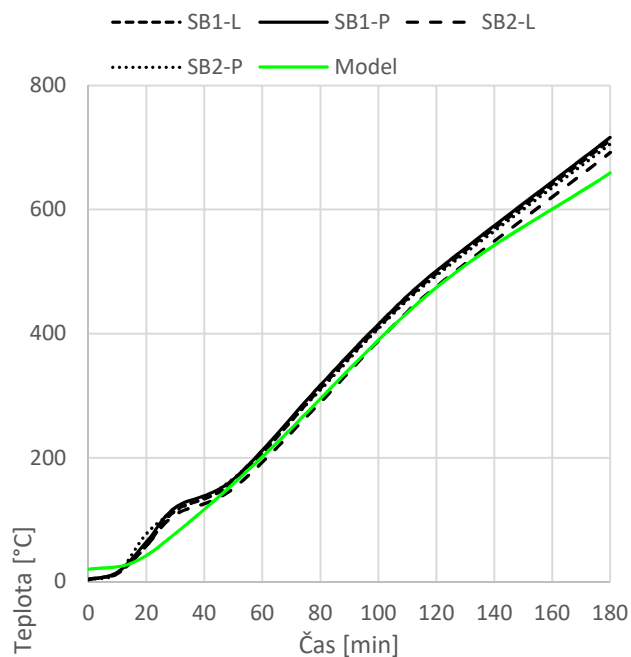
### 20 mm

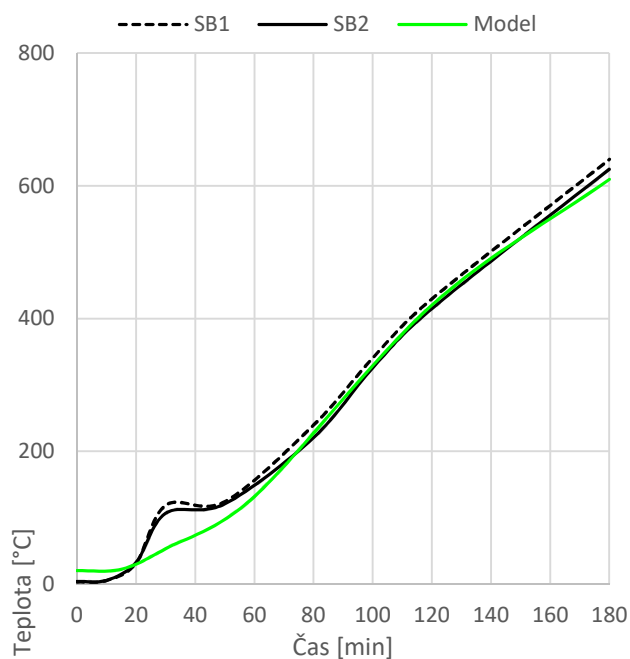


### 50 mm



### 80 mm



**Střed 120 mm**

U betonového sloupu jsou průběhy křivek téměř totožné. Je zajímavé, že program nevypočítal vliv odpařování vody, jako lze vidět u pokusu v teplotě 100°C od cca 23 do 45 minuty, kdy dochází k výraznému zpomalení růstu teploty. Sloupek spotřebuje velké množství tepla pro přeměnu vody na páru. Voda má totiž vysokou schopnost odebírat teplo, má vysoké skupenské teplo vypařování. Po odejmutí dostatečného množství vody se teplota začíná zvedat a cca od 60 minuty už se křivky překrývají. Matematický model lze aplikovat pro simulaci rozložení teploty u betonových sloupů.

## 4.2.2 Sloup ocelobetonový

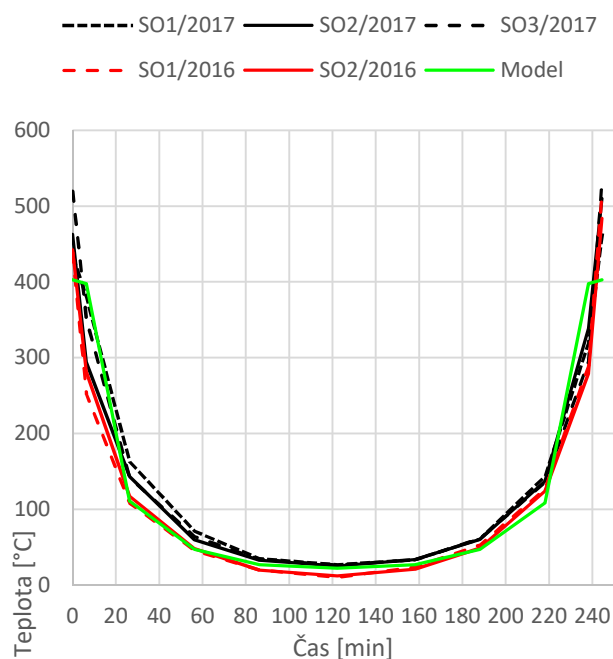
Tento prvek byl specifický v tom, že byl odzkoušen dvakrát. První měření ovšem nedopadlo dobře, takže křivky odpovídají zhruba do 30. minuty, pak se vysunul střed a změřené teploty přestaly dávat smysluplné hodnoty. V 60. minutě se termočlánky odstříhly. Při druhé zkoušce se měřily tři prvky. Měli stejné složení jako v předchozím případě, takže výsledky by neměly být zkreslující. Pro matematickou analýzu byl vybrán beton DO(2350,10,UL), viz kapitola 4.1.2.

Křivky:

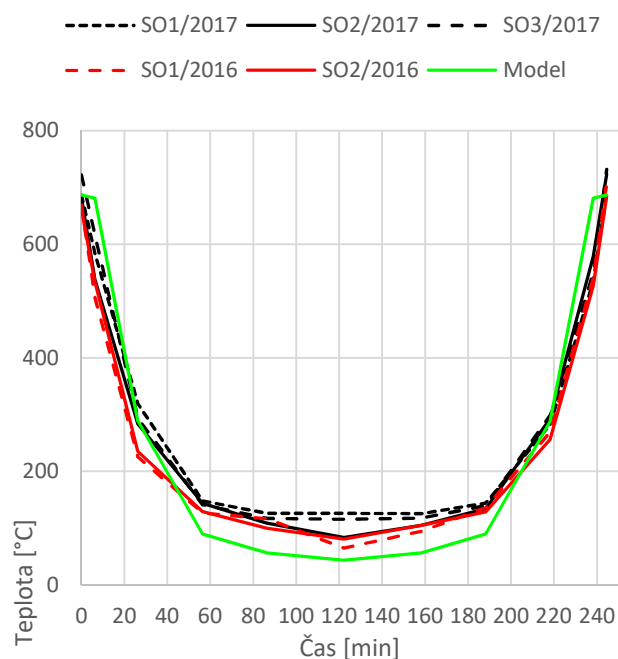
- **SO(X)/2016**, značí sloupy odzkoušené v roce 2016, viz [4]
- **SO(X)/2017**, značí sloupy odzkoušené v roce 2017, viz čl. 3.4
- **Model**, značí výsledky podle matematického modelu pro beton DO(2350,10,UL)

Obrázky grafů z hlediska rozložení teploty v průřezu v daném čase:

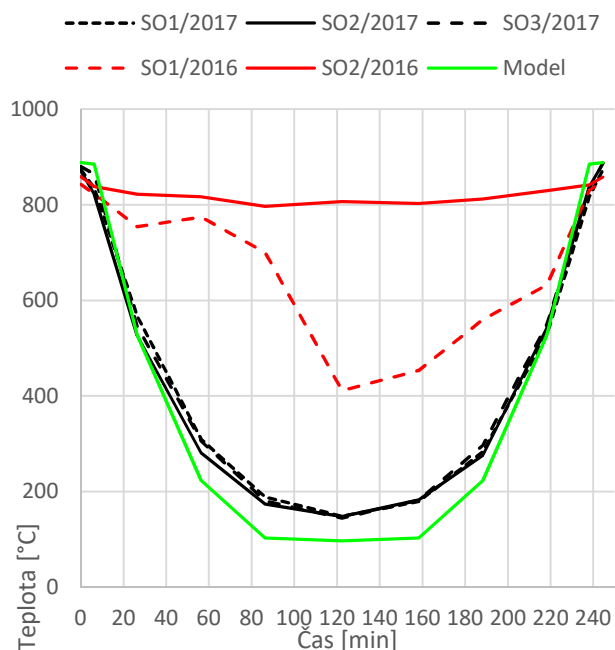
**15 min**



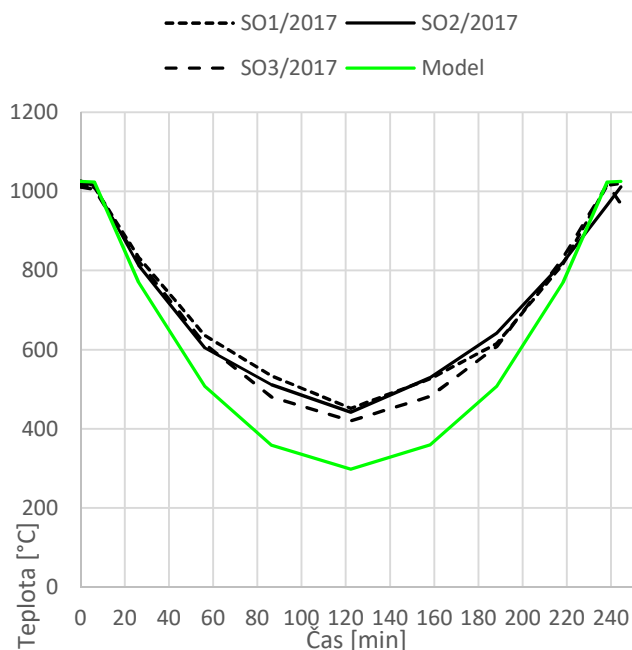
**30 min**



**60 min**

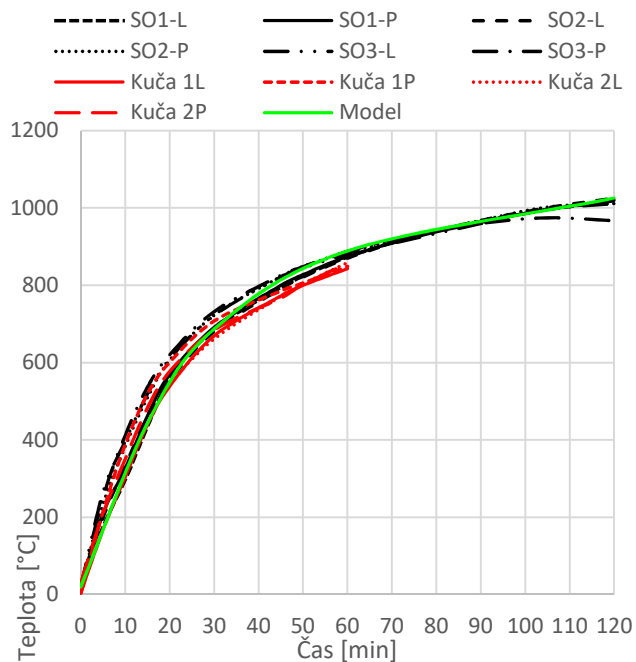


**120 min**

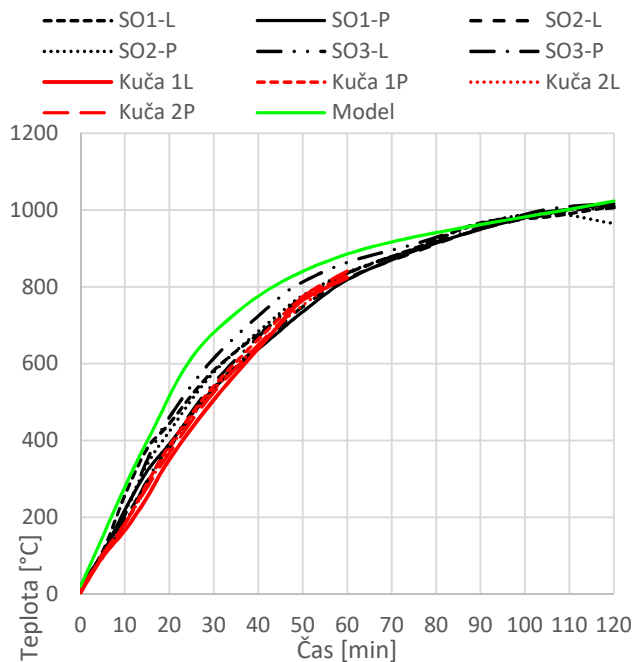


Grafy teplot v termočláncích v průběhu času.

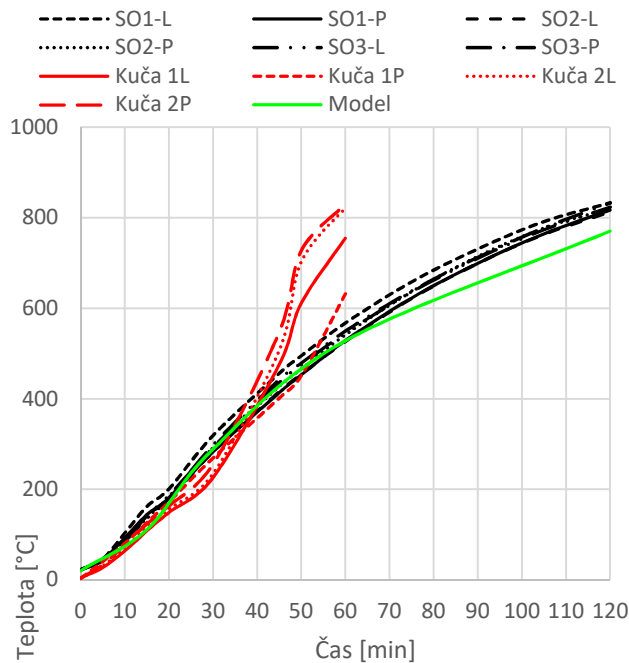
**Ohříváná strana**



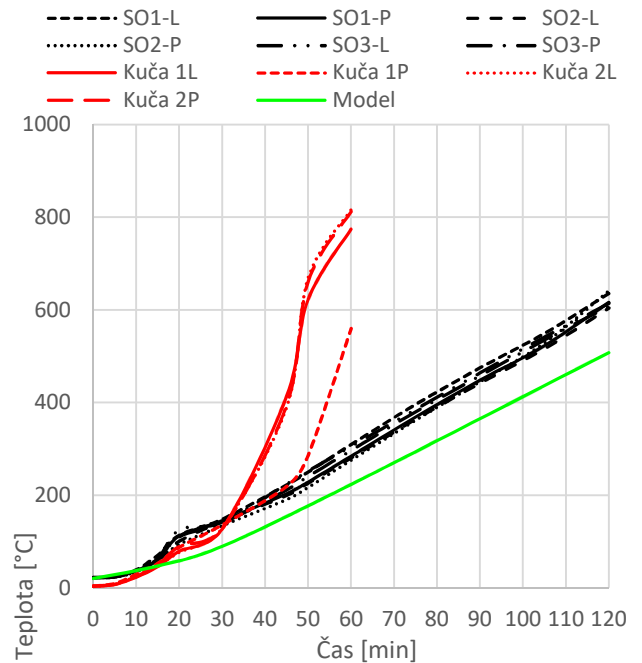
**0 mm**



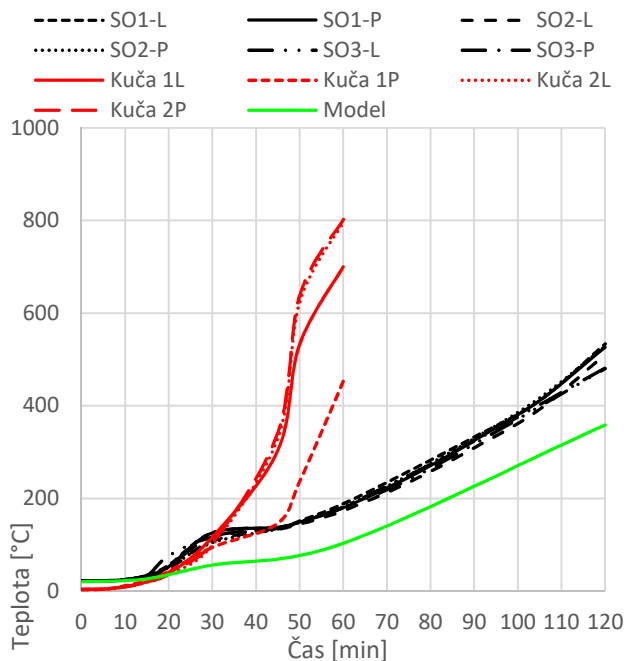
**20 mm**



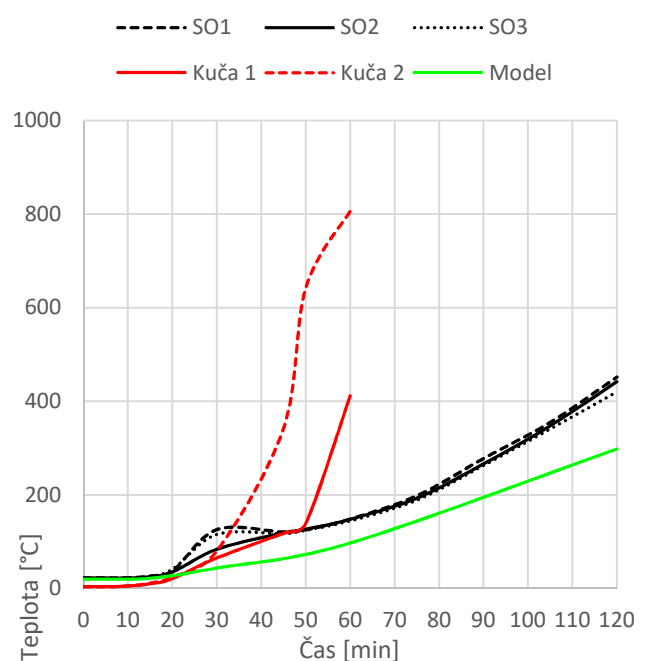
**50 mm**



**80 mm**



**Střed – 116 mm**



Průběh křivek ukazuje, že v prvních minutách jsou křivky shodné, takže model odpovídá zkoušce. V dalších minutách ovšem dochází k oddalování vlivem vyššího ochlazování, se kterým, díky vysoké vlhkosti, počítá software. Vidíme také nesmyslné tvary červených křivek. Pro výsledek je důležité, že ve všech případech mají čáry vzrůstající tendenci. Matematický model můžeme konzervativně použít i pro přibližný výpočet rozložení teploty v průřezu ocelobetonového sloupu.

## 5 Závěr

Tato práce měla za úkol přinést nějaké poznatky ohledně matematického modelování rozložení teploty v průřezu u betonových a ocelobetonových prvků s betonem s rozptýlenou výztuží. Práce byla založená na experimentálním zahřívání čtyřech typů vzorků. Jednalo se o betonové a ocelobetonové desky a sloupy. Cílem práce bylo srovnání experimentálního programu a matematického modelu.

Úvodní kapitola se věnovala teoretickému základu, potřebnému k pochopení problematiky navrhování betonu za požáru. K tomuto účelu bylo zapotřebí prohloubení znalostí problematiky a to nastudováním literatury zabývající se teplotní analýzou obecně [1], [14], principem metody konečným prvků [17], pak pracemi zabývajícími se navrhováním betonových konstrukcí za zvýšených teplot, [2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16], a dalších méně související literatury. Na počátku bylo potřeba stanovit teplotní materiálové charakteristiky betonu při zvyšování teploty. Tyto charakteristiky významně ovlivňují teplotu v určitém bodě. Lze brát v úvahu variantu dle [2] či [12]. Paralelně s experimentováním probíhalo měření změn vlastností na katedře materiálového inženýrství [18]. Tyto poznatky se ovšem ukázaly jako nepoužitelné, neboť výpočet těchto vlastností je založen na jiných metodách než normových a špatně se s nimi srovnávají ostatní experimenty a výpočty a nelze z nich jednoduše vycházet. V následující podkapitole jsem krátce představil způsoby teplotní analýzy a následně popsal, z jakých zákonitostí vychází matematické modelování průběhu tepla.

Druhá kapitola měla za cíl představení experimentálního programu. Proběhly dvě zkoušky, v roce 2016 se zkoušely všechny čtyři vzorky po dobu 180 minut. Výstupem z tohoto je práce [4]. Jelikož došlo k poškození vzorků ocelobetonových sloupů, proběhlo v srpnu 2017 v rámci jiného měření zahřívání tří sloupů po dobu 120 minut. Výsledky z tohoto experimentu jsou představeny v kapitole 2.4 a 2.5.

V další části proběhlo seznámení se softwarovými programy pro výpočet průběhu tepla. Vybral jsem dva programy počítající na základě metody konečných prvků. TempAnalysis [7] a Atena [21], přičemž s druhým programem jsem srovnával pouze betonové desky, neboť se ukázalo, že oba programy ukazují stejné hodnoty teplot. V této kapitole jsem chtěl také přiblížit postup výpočtu, zejména vstupní hodnoty, se kterými programy pracovaly.

Cíl práce je obsažen v kapitole 4. Zde jsem popsal výsledky u jednotlivých prvků. U desky betonové jsem provedl parametrickou studii, která měla za cíl stanovit materiálové charakteristiky podle normových hodnot odpovídající betonovým zkušebními vzorkům.

Nejvíce shodným se zjevně stal vzorek s objemovou hmotností  $2350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 3% vlhkostí a horním limitem tepelné vodivosti. Srovnáme-li průběh křivek u betonové desky a sloupu, musíme zkonstatovat, že tento typ materiálu odpovídá jak z hlediska experimentu tak matematického modelu. Lze tedy pomocí matematické analýzy namodelovat průběh teplot v průřezu u betonových prvků s rozptýlenou výztuží a to u 1D tak i u 2D úloh.

U ocelobetonových prvků je analýza složitější. Skládá se ze dvou rozdílných materiálů, které rozdílně teplotně reagují. Velká potíž je určit počáteční vlhkost ve struktuře betonu. Obecně [2] se stanovuje maximálně 3 %, ovšem norma pro ocelobetonové prvky nám ji umožňuje zvýšit až na 10%.



---

Je to z toho důvodu, že ocel na povrchu zabraňuje odpařování vody při hydrataci cementového tmele a ta se tak drží uvnitř struktury betonu. Při analýze jsem vybral beton s objemovou hmotností jako v předchozím případě a provedl parametrickou studii pro desku s různými hodnotami vlhkostí, tzn. 4, 6, 8, 10 procent. Kvůli tomu bylo potřeba upravit zdrojový kód v [7], který umožnil počítat i mimo hodnoty normy ČSN EN 1992-1-2 [2]. Ze studie vyšlo najevo, že pravděpodobně byla na počátku experimentu zabudovaná vlhkost o hodnotě 10% hmotnosti materiálu a zřejmě s horním limitem tepelné vodivosti. Je nutno také podotknout, že závěry ze zkoušek jsou zkresleny díky pravděpodobnému posunutí termočlánku umístěného na povrchu ocelového opláštění. Srovnání křivek pak více koresponduje, je potřeba se podívat na původní spočítané křivky s ideálně umístěnými termočlánky čl. 4.1.2. Bohužel neznáme průběh tepla v oceli a na povrchu betonu. Stejně jako u desek bylo potřeba u sloupů upravit program počítající s vlhkostí 10%. Sloupy jsem srovnal s vybraným betonem u desky. Vyšlo najevo, že model počítá s velkým ochlazováním vnitřku a rozdíly teplot dosahují max. 100°C. I tak můžeme srovnání považovat za dostačující byť ne moc přesné.

Závěrem lze konstatovat, že matematické modelování ocelobetonových prvků s betonem s rozptýlenou výztuží je možné. Lze počítat v klasických programech pro teplotní analýzu ovšem je potřeba upravit počáteční vlhkost betonu. Žádný předchozí výpočet neuvažoval s výrazným vlivem odpařování vody při 100 °C. Zajímavé by bylo srovnat všechny výsledky s uvažováním analýzy sdruženého transportu tepla a vlhkosti. Tato analýza vyžaduje hluboké znalosti procesů, probíhajících uvnitř struktury betonu. Je ovšem známo, že lze díky ní dosáhnout relativně přesných výsledků, nehledě na to, že můžeme pospat jevy probíhající v betonu za zvýšených teplot., např. odprýskávání povrchu betonu.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Normová teplotní křivka ISO 834 [7] .....	11
Obr. 2 Parametrická teplotní křivka [7].....	12
Obr. 3 Měrná tepelná kapacita dle ČSN 1992-1-2, převzato z [2] .....	14
Obr. 4 Měrná tepelná kapacita, převzato z [12] .....	14
Obr. 5 Tepelná vodivost betonu dle ČSN 1992-1-2 [2] .....	15
Obr. 6 Teplotní profily dle ČSN EN 1992-1-2, (A) kruhový sloup s $\varnothing$ 300 mm, (B) železobetonový nosník, převzato z [2] .....	17
Obr. 7 Schéma mezery mezi materiály, převzato z [15].....	19
Obr. 8 Vliv mezery v ocelobetonu, převzato z [16].....	19
Obr. 9 (A) Forma pro desku betonovou a (B) rozmístění termočlánků v průřezu, viz [4] .....	22
Obr. 10 (A) Forma pro desku ocelobetonovou, (B) rozmístění termočlánků, viz [4] .....	22
Obr. 11 (A) Forma na sloup betonový, (B) umístění termočlánků, převzato z [4] .....	23
Obr. 12 (A) Sloup ocelobetonový, (B) rozmístění termočlánků, převzato z [4] .....	24
Obr. 13 Objemová hmotnost $\rho$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] v závislosti na teplotě, (A) údaje z měření [18], (B) vstupní hodnoty v TempAnalysis [7], (C) normová hodnota [2, 12] pro beton s $\rho = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .....	25
Obr. 14 Měrná tepelná kapacita $c$ [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] v závislosti na teplotě, (A) naměřená data [18], (B) vstupní data v TempAnalysis [7], (C) podle ČSN EN 1992-1-2 [2], (D) podle ČSN EN 1994-1-2 [12] .....	26
Obr. 15 Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_s$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] v závislosti na teplotě, (A) data získaná měřením [18], (B) vstupní data TempAnalysis [7], (C) podle ČSN EN [2, 12].....	27
Obr. 16 Rozmístění vzorků v peci, převzato z [4].....	28
Obr. 17 Schéma upevnění sloupku u stropu pece, převzato z [20] .....	29
Obr. 18 Izolace dna a umístění termočlánku na povrchu, převzato z [20].....	29
Obr. 19 Umístění termočlánků [20].....	30
Obr. 20 Termočlánky, převzato z [20].....	30
Obr. 21 Schéma termočlánků, převzato z [20].....	31
Obr. 22 Úvodní okno softwaru TempAnalysis [7].....	32
Obr. 23 Hodnoty materiálových charakteristik desek dle teploty [7].....	33
Obr. 24 Zadání vlastností pro výpočet [7] (A) Deska betonová; (B) Deska ocelobetonová .....	34
Obr. 25 Okno pro zadávání materiálových charakteristik [7].....	35

Obr. 26 Vstupní tabulka s upravenými hodnotami pro beton a ocel [19] .....	35
Obr. 27 Úvodní okno pro definování materiálu [23].....	36
Obr. 28 Hodnoty vlastností při 25°C .....	37
Obr. 29 Hodnoty vlastností v závislosti na teplotě [23].....	37
Obr. 30 Mesh pro DB [23].....	37
Obr. 31 Připevnění termočláčku [20] .....	44

## Literatura

- [1] Buchanan, A. H. (2002). *Structural Design for Fire Safety*, Wiley.
- [2] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006
- [3] Wald, F., Procházka, J., Kuklík, P., Sokol, Z., Bednář, J., Horová, K., Jána, T., Starý, J., Štefan, R., Hejduk, P., Dvořák, O. and Angelis, J. (2011). *Software ke stanovení požární odolnosti nosných konstrukcí (Software for Structural Fire Design)*, CTU in Prague, Prague, Czech Republic. (in Czech).
- [4] Kuča, M. (2016). *Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích*, Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze.
- [5] Vyhláška Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb. o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci) ve znění vyhlášky č. 221/2014 Sb.
- [6] ČSN EN 13501-2 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení. Praha: ČNI, 2017
- [7] Štefan, R. and Procházka, J. (2016). *TempAnalysis – Computer program for temperature analysis of cross-sections exposed to fire [Software]*, CTU in Prague. <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/ta/ta.en.html>.
- [8] Skoumal, M. (2012). *Teplotní analýza betonových prvků při požáru*, Diplomová práce, Praha: ČVUT v Praze.
- [9] Choi, E. G. and Shin, Y. S. (2011). The structural behavior and simplified thermal analysis of normal-strength and high-strength concrete beams under fire, *Eng. Struct.* 33(4): 1123{1132}.
- [10] Štefan, R. (2015) *Transport Processes in Concrete at High Temperatures. Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling*. PhD thesis, CTU in Prague.
- [11] Procházka, J., Štefan, R. and Vašková, J. (2010). *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru (Fire Design of Concrete and Masonry Structures)*, CTU in Prague, Prague, Czech Republic. (in Czech).
- [12] ČSN EN 1994-1-2. Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006
- [13] Beneš, M., Wald, F., Hřebíková, P., Chladná, M. and Pašek, J. (2006). *Požární experiment na osmipodlažním objektu v Cardingtonu*.
- [14] Purkiss, J. A. (2007). *Fire safety engineering, Design of structures*, 2nd edn, Elsevier. Butterworth-Heinemann.
- [15] Rodrigues, F. M. and Moreno jr. A. L. (2017). *Temperature field of concrete-filled steel tubular columns in fire*. Engenharia Civil
- [16] Espinos C. A. (2012). *Numerical analysis of the fire resistance circular and elliptical slender concrete filled tubular columns*. Universitat politcnica de Valencia
- [17] Bergheau, J. M. and Fortunier, R. (2008). *Finite Element Simulation of Heat Transfer*, Wiley.

- [18] Vejmelková, E., Scheinherrová, L., Čáchová, M. (2016). Naměřená data vlastností, Praha: ČVUT v Praze.
- [19] Štefan, R. and Procházka, J. (2017). TempAnalysis – Computer program for temperature analysis of cross-sections exposed to fire [Software], pracovní verze. CTU in Prague. <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/ta/ta.en.html>.
- [20] Štefan, R. (2016, 2017). Informace o materiálových vlastnostech, fotografie z experimentu. Praha: ČVUT v Praze.
- [21] Prochazkova Z., Cervenka, J., Janda, Z., Pryl, D., (2016). ATENA Program Documentation Part 4-6, ATENA Science – GiD Tutorial, Cervenka Consulting s.r.o.
- [22] Červenka, V. a kol. (2017). Atena Science - GiD - software pro nelineární analýzu betonových konstrukcí, Praha., Cervenka Consulting s.r.o.
- [23] Černý R. and Vejmelková E. (2011). Aparent thermal conductivity approach at high-temperature measurements of prous material. Elsevier Ltd. Measurement 44. 1220-1228
- [24] MATLAB (2008). Version 7.6.0 (R2008a), The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.