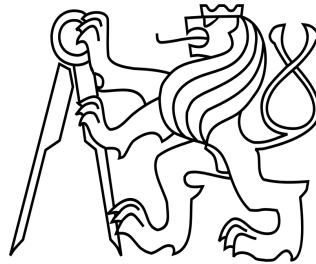


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta stavební**

**K134**

**Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**



Magisterský studijní program: **STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ**

Studijní obor: **INTEGRÁLNÍ BEZPEČNOST STAVEB**

**Bc. Nikola Lišková**

**134DPM – DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**ADIABATICKÁ TEPLOTA POVRCHU VE  
VODOROVNÉ PECI**

ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE IN THE HORIZONTAL FURNACE

vedoucí práce: **Ing. Kamila Cábová, Ph.D.**

Praha, leden 2017



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Lišková	Jméno: Nikola	Osobní číslo: 396625
Zadávací katedra: K134 _ Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Nm-Q _ Integrovaná bezpečnost staveb		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	Adiabatická teplota povrchu ve vodorovné peci	
Název diplomové práce anglicky:	Adiabatic surface temperature in horizontal furnace	
Pokyny pro vypracování:	<ul style="list-style-type: none"><li>- současný stav poznání</li><li>- CFD model vodorovné pece</li><li>- validace modelu pomocí naměřených dat ze zkoušky</li><li>- shrnutí a závěrečná doporučení</li></ul>	
Seznam doporučené literatury:	Wickström, U.: Temperature calculation in Fire Safety Engineering, 2016, ISBN 978-3-319-30172-3.	
Jméno vedoucího diplomové práce:	Ing. Kamila Cábová, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce:	3.10.2016	Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
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 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“.

Datum převzetí zadání	12/10/2016	Podpis studenta(ky)
-----------------------	------------	---------------------

# SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Nikola Liškova  
Název diplomové práce: Adiabatická teplota povrchu ve vodorovné peci

Základní část: Teplota v peci H2 a CFD modelu pece podíl: 100 %

Formulace úkolů: Současný stav poznání  
CFD model vodorovné pece  
Validace modelu pomocí dat naměřených při zkoušce  
shrnutí a závěrečná doporučení

Podpis vedoucího DP: ...

Datum: 15.12.2017

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: / podíl: 0 %

Konzultant (jméno, katedra): \_\_\_\_\_

Formulace úkolů: \_\_\_\_\_

Podpis konzultanta: .....

Datum: .....

3. Část: / podíl: 0 %

Konzultant (jméno, katedra): \_\_\_\_\_

Formulace úkolů: \_\_\_\_\_

Podpis konzultanta: .....

Datum: .....

4. Část: / podíl: 0 %

Konzultant (jméno, katedra): \_\_\_\_\_

Formulace úkolů: \_\_\_\_\_

Podpis konzultanta: .....

Datum: .....

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

## **Abstrakt**

Diplomová práce se věnuje tématu měření teploty v peci při požárních zkouškách ke stanovení požární odolnosti konstrukcí. Obecně uvádí do problematiky termoelektrických článků a zaměřuje se na plášťové termočlánky a deskové snímače teploty. Dále se podrobněji zabývá teorií adiabatické teploty povrchu měřené pomocí deskových snímačů teploty. Pro ověření získaných poznatků byly provedeny experimenty na vodorovné požární peci. Výsledky z těchto experimentů jsou následně porovnávány s výsledky z CFD modelu, vypracovaného dle reálné předlohy vodorovné požární pece. V CFD modelu jsou deskové snímače teploty simulovány právě adiabatickou teplotou povrchu.

### Klíčová slova

Fire Dynamics Simulator (FDS); dynamická analýza plynů (CFD); požární vodorovná zkušební pec; požární zkouška; teplota; termočlánky; deskové snímače teploty; adiabatická teplota povrchu.

## **Abstract**

The thesis is devoted to the topic of measuring temperature in the furnace of fire tests to determine the fire resistance of structures. Generally, it introduces the issue of thermoelectric elements and focuses on jacket - thermocouples and plate thermometers. Further it deals with the theory of adiabatic surface temperature measured by plate thermometers. To verify the obtained knowledge, experiments in a horizontal fire resistance furnace were performed. The results of these experiments are then compared with the results of the CFD model, drawn by real patterns of horizontal fire resistance furnace. In the CFD model plate thermometers are simulated by the aid of adiabatic surface temperature.

### Keywords

Fire Dynamics Simulator (FDS); Computational Fluid Dynamics (CFD); horizontal fire resistance furnace; fire test; temperature; thermocouples; plate thermometer; adiabatic surface temperature.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Adiabatická teplota povrchu ve vodorovné peci* vypracovala samostatně za použití všech uvedených zdrojů pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D.

Nemám námitek proti použití této školní práce ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 5. ledna 2016

.....  
Bc. Nikola Lišková

## Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí své diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D za odborné konzultace a vedení. Dále děkuji všem zaměstnancům požární zkušebny PAVUS, a.s. za ochotnou spolupráci při experimentech a zvláště pak za pomoc a cenné rady pana Ing. Mirko Loumi. Také bych chtěla poděkovat svým kolegům Ing. Martinu Benýškovi, Ing. Janu Mandinci, Bc. Filipu Zemanovi a Bc. Petře Novotné za spolupráci při vytváření modelu virtuální vodorovné pece v programu FDS.

Nakonec chci z celého srdce poděkovat své rodině, Bc. Janu Bednáři a příteli Vaškovi Špelinovi, DiS za obrovskou podporu a pevné nervy po celou dobu mého studia. ☺

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Prohlášení</b>	<b>II</b>
<b>Poděkování</b>	<b>III</b>
<b>Obsah</b>	<b>IV</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>VI</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Cíle	2
<b>2 Shrnutí současného stavu poznání</b>	<b>3</b>
2.1 Plášťové termočlánky a deskové snímače teploty	3
2.1.1 Legislativa	3
2.1.2 Princip funkce termočlánků	4
2.1.3 Konstrukce termočlánků	7
2.1.4 Základní vlastnosti a typy termočlánků	8
2.2 Plášťové termočlánky	10
2.3 Deskové snímače teploty	13
2.3.1 Teorie PT	13
2.3.2 Adiabatická teplota povrchu	15
2.3.3 Konstrukce PT	17
2.3.4 Umístění PT	18
<b>3 Experimentální studie</b>	<b>20</b>
3.1 Popis vodorovné pece H <sub>2</sub>	20
3.2 Rozmístění TC a PT při experimentu	24
3.3 Průběh experimentu	28
3.4 Výsledky experimentu	28
3.4.1 Normová teplotní křivka - Normové požadavky	28
3.4.2 Výkony hořáků v peci	31
3.4.3 Rozložení teplot v peci	37
<b>4 CFD model</b>	<b>52</b>
4.1 Popis CFD modelu vodorovné pece	52
4.1.1 Materiálové vlastnosti	55
4.1.2 Palivo	56
4.1.3 Ventilace	57
4.1.4 Měření teploty v peci - nastavení a rozmístění TC a PT	57
4.2 Výsledky z CFD modelu	60
4.2.1 CFD model - tlak	60
4.2.2 CFD model - rozložení teploty	63
<b>5 Validace CFD modelu</b>	<b>75</b>
5.1 Normová teplotní křivka – teploty pod stropem	75
5.2 Normová teplotní křivka – teploty po výšce	81
5.3 Konstantní výkon – teploty pod stropem	82

5.4	Konstantní výkon – teploty po výšce.....	90
6	Závěry.....	92
	<b>Literatura</b> .....	<b>94</b>
	<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>96</b>
	<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>99</b>
	<b>Seznam grafů</b> .....	<b>101</b>
	<b>Příloha 1</b> .....	<b>103</b>
	<b>Příloha 2</b> .....	<b>104</b>
	<b>Příloha 3</b> .....	<b>105</b>

# Seznam použitých symbolů a zkratek

## Latinské symboly

$c$	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
$T$	Teplota	°C
$t$	Čas	minuty
$\varnothing$	Průměr	---
$h_{tot}$	čistý sálavý tepelný tok	W/m <sup>2</sup>

## Řecké symboly

$\alpha_c$	je součinitele přestupu tepla prouděním	W/m <sup>2</sup> K
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
$\rho$	Objemová hmotnost	kg/m <sup>3</sup>
$\varepsilon$	Emisivita povrchu	---
$\sigma$	Stephan-Boltzmannova konstanta	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>

## Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
SMV	Smokeyview (software)
TC	Thermocouple – plášťový termočlánek
PT	Plate thermometer – deskový snímač teploty
AST	Adiabatic surface temperature – adiabatická teplota povrchu
PO	Požární odolnost
ISO 836	Normová teplotní křivka



# 1 Úvod

Požární zkoušky v pecích jsou běžnou metodou zjišťování hodnot požární odolnosti (dále v textu PO) konstrukcí. Jedná se o základní celosvětově přijatý postup pro zjišťování a zlepšování pasivní požární ochrany staveb. PO konstrukčního prvku je vyčíslena jako čas, po který tento prvek při vystavení tepelnému namáhání v požární peci splňuje určitá kritéria.

Náklady na zkoušky PO konstrukcí jsou vysoké. Navíc v případě archaických řešení nemusí být již materiály pro zkoušení v peci k dispozici. Vzhledem k těmto nevýhodám, je vhodné využívat matematické modely pro určování PO konstrukcí než jen požární zkoušky. V současné době je použití CFD modelů v oblasti požární bezpečnosti staveb běžnější pro předpověď průběhu požáru a teplot v PÚ specifických provozů, kde není využití běžných postupů efektivní. Touto problematikou se dnes již zabývá relativně velké množství odborné literatury.

Myšlenka využití CFD modelů pro simulaci standardních požárních zkoušek pro stanovení PO konstrukcí je relativně mladá. První pokusy aplikovat CFD model tímto způsobem jsou popsány v publikaci Cayla, 2011 [1] a Cuff, 2014 [2]. Nicméně byly modely těchto zdrojů připraveny pouze pro jedno použití. Předpovídání teploty zkoumané konstrukce a její vliv na dynamiku proudění plynů uvnitř virtuální pece nebyl studován hlouběji.

Přesnost matematického řešení je založena na přesnosti a míře rozsahu vstupních dat. Nejsložitějším úkolem v případě simulace požární pece je přesná modelace plynových hořáků a ventilačního systému. Oba systémy musí být monitorovány a musí zajistit normově požadované teplotní a tlakové podmínky uvnitř virtuální pece. Ve skutečnosti je rozložení teploty plynů přes objem pece při reálných požárních zkouškách nerovnoměrné, tento problém by měla odstranit právě přesná modelace hořáků a ventilace užitá při vytváření virtuální pece. Díky numerickému modelu pak lze např. optimalizovat funkci hořáků a tím zlepšit rovnoměrné rozložení teploty v peci.

Větší překážkou uvnitř pece je turbulentní proudění, které může zastavit horký plyn před prvkem. Otázku teplotního rozdílu mezi teplotou plynů a teplotou radiace lze nalézt v Wickström et al, 2010 [3]. V posledních letech byly deskové snímače teploty použity jako nástroj pro získání adiabatické teploty povrchu (AST). Teoreticky je AST teplota na povrchu dokonalého izolantu což znamená, že neztrácí žádnou energii vedením. Jedná se tedy o maximální teplotu, kterou může povrch získat v průběhu požární zkoušky. Výhodou AST je také možnost numericky simulovat tuto teplotu. Proto může být AST použita jako okrajová podmínka pro následné matematické modely mechanického chování konstrukcí.

## 1.1 Cíle

Diplomová práce si klade za cíl ověřit teploty uvnitř vodorovné pece při požárních zkouškách ke stanovení požární odolnosti konstrukcí měřené pomocí dvou různých typů snímačů – plášťových termočlánků a deskových snímačů teploty. Měření teploty v peci je simulováno numericky pomocí virtuálního modelu metodou CFD. Správnost a funkčnost modelu je validována pomocí požárních zkoušek provedených ve vodorovné peci v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Práce se zejména zaměřuje na teorii adiabatické teploty povrchu, která je měřena pomocí deskových snímačů teploty (dále v textu PT) a na porovnání této teploty s teplotou měřenou pomocí plášťových termočlánků. Získané poznatky z teoretického studia jsou aplikovány ve virtuálním modelu.

## 2 Shrnutí současného stavu poznání

### 2.1 Plášťové termočlánky a deskové snímače teploty

Tato práce je zaměřena na způsoby měření teploty plynů a konstrukcí ve zkušebních pecích s důrazem zejména na adiabatickou teplotu povrchu (Adiabatic Surface Temperature – AST), která je při požárních zkouškách měřena pomocí deskových snímačů teploty. Deskové snímače teploty jsou využívány pro zjištění, kolik tepelné energie zkoušená konstrukce přijala a pro řízení teploty v požárních pecích. Použití pro řízení teploty v pecích je normově harmonizováno.

Kvůli potřebě ověření naměřených hodnot deskovými snímači teploty jsou při experimentu využívány také plášťové termočlánky, jejichž použití a konstrukci specifikuje stejný okruh norem jako u deskových snímačů teploty.

#### 2.1.1 Legislativa

Hlavním okruhem norem, podle nichž se řídí zkoušení požární odolnosti konstrukcí, používání a konstrukci plášťových a deskových snímačů teploty jsou **ČSN EN 1363 Zkoušení požární odolnosti**,

kde **Část 1: Základní požadavky z roku 2013** [4] uvádí obecné zásady pro stanovení požární odolnosti různých prvků stavebních konstrukcí, jako jsou například: požadavky na teplotu a tlak včetně povolených odchylek v průběhu zkoušky v peci, požadavky na měřicí přístroje, podmínky vetknutí a okrajové podmínky včetně zatěžování zkoušené konstrukce, mezní kritéria deformace a celistvosti zkoušené konstrukce a další.

Podle požadavků, jako je například tlak a teplota v pecích při zkouškách, stanovených touto normou se řídilo vypracování CFD modelu pece H2.

Používání a konstrukce plášťových a deskových snímačů teploty je v ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti Část 1 popsáno v níže uvedených kapitolách.

Kapitola **4.5.1.1 Termoelektrické články v peci** předepisuje k měření teploty v peci použití deskových snímačů teploty, včetně jejich konstrukce a provádění kontrol správné funkčnosti, více viz kapitola 3.4 Deskové termočlánky.

Kapitola **4.5.1.5 Termoelektrický článek pro teplotu okolí** předepisuje k měření teploty okolí použití plášťových termočlánků. Ty musejí být typu K (Ni-CrNi) a s jmenovitým průměrem 3 mm, izolované minerálním materiálem, s pláštěm z korozivzdorné oceli, více viz kapitola 3.3 Plášťové termočlánky.

Dále jsou ve spojení s ČSN EN 1363-1 používány **ČSN EN 1363 Část 2: Alternativní a doplňkové postupy z roku 2000** [5], kde jsou specifikovány alternativní podmínky zvyšování teploty v pecích a další postupy, které mohou být za zvláštních okolností použity. Konkrétně jsou zde podrobnosti o zahřívání pecí dle uhlovodíkové křivky, křivky pomalého zahřívání, křivky vnějšího požáru, o přídavné zkoušce rázem a o měření radiace.

Na **ČSN EN 1363-1** je odkazováno také v **ČSN EN 1363 Část 3: Ověřování charakteristik pecí z roku 1999** [6], kde jsou uvedeny informace o postupech ověřování tepelných a tlakových charakteristik pecí pro zkoušení požární odolnosti dělicích prvků.

Další důležitou normou je z hlediska termočlánků **ČSN EN 60 584-1 Termoelektrické články - Část 1: Referenční tabulky z roku 1997** a **ČSN IEC 584-2 Termoelektrické články – Část 2: Tolerance z roku 1994**, tyto normy budou platné do 2.10.2016. Současně platná je **ČSN EN 60 584-1 Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance z roku 2014** [7], která výše zmíněné normy slučuje a od 2.10.2016 je v plném rozsahu nahradí. V těchto normách jsou specifikovány funkce a tolerance pro termočlánky typu R, S, B, J, T, E, K, N, C a A.

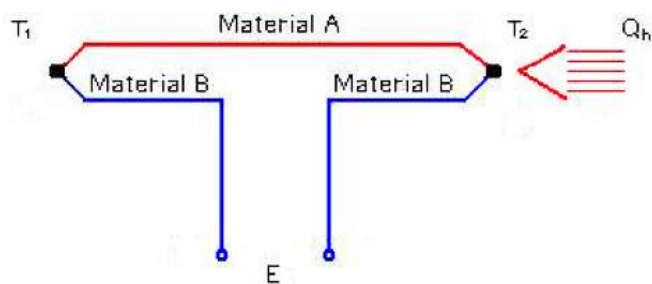
Nejdůležitějšími změnami proti předchozím normám je pak:

- ČSN EN 60 584-1:1997 a ČSN IEC 584-2:1994 byly sloučeny;
- Norma je nyní založena na referenčních polynomech, které vyjadřují napětí zdroje termočlánku jako funkce teploty. Tabulky odvozené z polynomů jsou uvedeny v příloze A;
- Inverzní polynomy vyjadřující teplotu jako funkci napětí zdroje jsou uvedeny v příloze B, ale inverzní tabulky uvedeny nejsou;
- Rozsah polynomů vztahujících se k napětí zdroje typu K je omezen do 1 300 °C;
- Hodnoty Seebeckových koeficientů jsou uvedeny pro interval 10 °C;
- Termoelektrická data (napětí zdroje a Seebeckovy koeficienty) jsou uvedeny jako pevné body ITS-90;
- Některé pokyny jsou uvedeny v příloze C a týkají se horních mezí teploty a podmínek prostředí pro jednotlivé typy termočlánků.

### 2.1.2 Princip funkce termočlánků

Termoelektrická zařízení založená na fyzikálních jevech pozorovaných v pevných látkách byla popsána už v první polovině 19. století.

Seebeckův termoelektrický jev popisující vznik napětí v obvodu složeném ze dvou různých vodičů, jejichž konce mají rozdílné teploty, byl objeven německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem v roce 1821. Princip termoelektrického obvodu podle Seebecka je znázorněn na obr. 1. Při různé teplotě konců vodiče se na každém konci objeví jiný potenciál (napětí). Míra tohoto jevu je určena Seebeckovým (termoelektrickým) součinitelem, který může mít hodnotu kladnou nebo zápornou. Seebeckovy koeficienty se udávají vzhledem k olovu, viz tab. 1. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia.



Obr. 1: Princip termoelektrického obvodu [8]

Seebeckův jev se tedy projevuje u dvou vodičů z různých kovových materiálů A a B, které jsou na obou koncích spolu vodivě spojeny. Jestliže teplota  $T_1$  jednoho spoje bude různá od teploty  $T_2$  druhého spoje, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. V zjednodušené formě můžeme závislost termoelektrického napětí na teplotě vyjádřit vztahem [9]:

$$E_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) dT \quad (1)$$

kde  $E_{AB}$  je elektromotorické napětí,

$\alpha_A, \alpha_B$  jsou Seebeckovy koeficienty kovů,

$T_1$  a  $T_2$  jsou teploty spojů.

Seebeckovy koeficienty jsou nelineární a závisejí na teplotě vodičů, použitém materiálu a jeho molekulární struktuře. Pokud jsou Seebeckovy koeficienty v daném rozsahu teplot přibližně konstantní, může být výše uvedená rovnice (1) linearizována dle vztahu [9]:

$$E_{AB} = (\alpha_B - \alpha_A) * (T_2 - T_1) \quad (2)$$

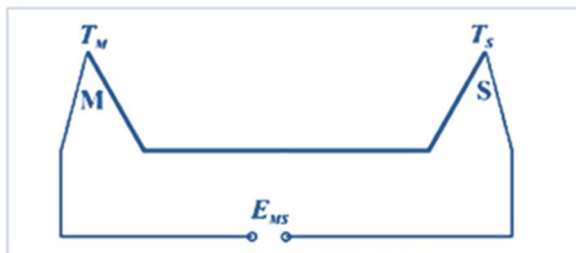
Tab. 1: Seebeckovy koeficienty pro různé kovy [8]

Kov	a [ $\mu\text{V/K}$ ]	b [ $\mu\text{V/K}^2$ ]
Antimon	35,6	0,145
Bismut	-74,4	0,032
Konstantan	-38,1	-0,0888
Měď	2,71	0,0079
Nikl	-19,1	-3,02
Platina	-3,03	-3,25
Železo	16,7	-0,0297

Koeficienty a, b jsou mj. závislé na přesném složení materiálu a jeho struktuře. Hodnoty uvedené v tab. 1 je z tohoto důvodu třeba brát s rezervou [8].

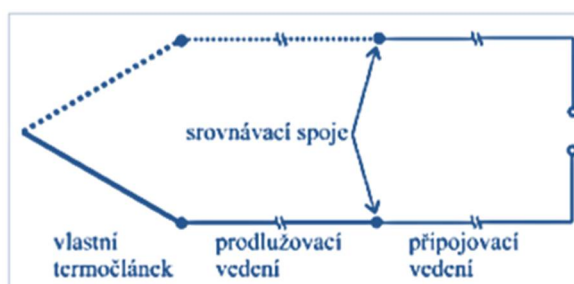
Základní zapojení termočlánku ze dvou vodičů zhotovených z různých materiálů s rozdílnými hodnotami termoelektrického součinitele je znázorněno na obr. 2. Při měření napětí je vhodné použít voltmetr s vysokým vnitřním odporem, jinak je v důsledku procházejícího proudu nutné údaj korigovat na odpor voltmetru [10].





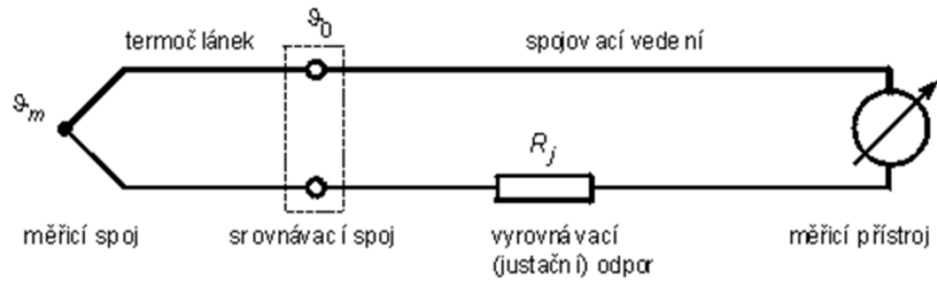
Obr. 2: Termoelektrický článek:  $M$  – měřicí spoj,  $S$  – srovnávací spoj,  $T_M$  [K] - teplota měřicího spoje,  $T_S$  [K] - teplota srovnávacího spoje,  $E_{MS}$  [V] - termoelektrické napětí, závislé na rozdílu teplot ( $T_M - T_S$ ) [10]

K termočláнку lze z úsporných důvodů připojit prodlužovací vedení z materiálů levnějších než materiály, ze kterých je zhotoven vlastní termočlánek, které mají horší některé vlastnosti, např. menší chemickou odolnost. Tyto materiály musejí však mít stejné termoelektrické součinitele jako vlastní termočlánek. Prodlužovací vedení se někdy nevhodně nazývá kompenzační (nedochází v něm k žádné kompenzaci). Použije-li se k termočláнку či k prodlužovacímu vedení přívodní vedení např. z mědi, vzniknou dva srovnávací spoje - na spojích měděného vedení s každým materiálem termočláunku, což je znázorněno na obr. 3. Termoelektrické napětí pro homogenní materiály závisí jen na teplotách konců vodičů, tedy spojů. To znamená, je-li do obvodu vložen další vodič z jiného materiálu, nemá v případě stejných teplot na svých koncích (spojích) žádný vliv na měřený údaj [10].



Obr. 3: Princip prodloužení termočláunku [10]

Teplota srovnávacího spoje má významný vliv na napětí měřené na termočláunku. Jsou tři způsoby jak tento vliv podchytit. Při prvním způsobu je tato teplota udržována na stálé (známé) výši, např. v termostatu, případně ve směsi ledové tříště a (destilované) vody, což je velmi přesný, ale nepříliš praktický způsob. Dalším způsobem je použití kompenzačního zapojení, kdy napětí kompenzuje elektrický obvod, který je navržen tak, aby korigoval odchylku napětí způsobenou změnou teploty srovnávacího spoje. Lze použít kompenzačního můstku nebo zapojení s PN přechodem. Posledním způsobem, užívaným např. u měřicích ústředí je číslicová korekce. Srovnávací spoje jsou vyvedeny na tzv. izotermickou svorkovnici, jejíž teplota je měřena odporovým nebo PN snímačem a korekci pak stanoví měřicí systém výpočtem [10], viz obr. 4.



Obr. 4: Zapojení termočláňku [10]

Měřicí spoj termočláňku, vyrobeného z kovů A a B má teplotu  $T$ , srovnávací spoj má teplotu  $T_0$ . Propojení s měřicím přístrojem je provedeno vodičem C a D, přičemž svorky měřicího přístroje mají teplotu  $T_1$ . S použitím 2. Kirchhoffova zákona může být psán pro napětí termočláňku vztah:

$$E_{ABC}(T, T_0, T_1) = \alpha_{AB}(T) + \alpha_{BC}(T_0) + \alpha_{CD}(T_1) + \alpha_{DC}(T_1) + \alpha_{CA}(T_0) \quad (3)$$

Dále platí:

$$\alpha_{CD}(T_1) = -\alpha_{DC}(T_1) \quad (4)$$

Uvažujeme-li, že  $T = T_0$ , pak  $E = 0$  a platí:

$$-\alpha_{AB}(T_0) = \alpha_{BC}(T_0) + \alpha_{CA}(T_0) \quad (5)$$

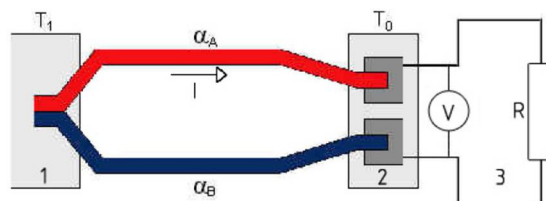
Po dosazení vztahů (4) a (5) do vztahu (3) dostaneme:

$$E_{ABC} = \alpha_{AB}(T) - \alpha_{BC}(T_0) \quad (6)$$

Z rovnice vyplývá již dříve uvedené tvrzení, že teplotu srovnávacího spoje je nutno udržovat konstantní, anebo člen  $-\alpha_{AB}(T_0)$  vhodně kompenzovat. Na počtu dalších přídatných spojů nezáleží [9].

### 2.1.3 Konstrukce termočláňků

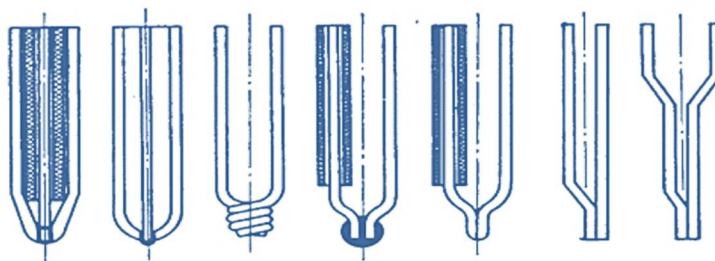
Termočlánek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů, které jsou na koncích vodivě spojeny. Jestliže je teplota jednoho spoje rozdílná od teploty druhého spoje viz obr. 6, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. Jeden z uzlů je přitom měřicí a druhý srovnávací. Princip konstrukce termočláňku je zobrazen na obr. 5 [11].


 Obr. 5: Princip konstrukce termočláňku: 1 – měřicí spoj, 2 – srovnávací spoj, 3 – kompenzační obvod,  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$  – dva vodiče s různým termoelektrickým součinitelem [11]

Termočláňky lze s výhodou použít při měření teplotních rozdílů, protože jsou ve své podstatě diferenčním měřidlem. V takovém případě jsou brány oba spoje jako měřicí a výsledné napětí

závisí na rozdílu teplot těchto spojů. Tímto způsobem se eliminuje chyba, která je u jiných metod způsobená odečítáním blízkých hodnot [12].

Měřicí spoj bývá tvořen mechanickým spojením, pájením nebo svařením drátů stejného průměru, podobně jako je zobrazeno na obr. 6 [8].



Obr. 6: Příklady řešení měřícího spoje termočlánků [8]

Dále mohou být konce chráněné, viz kapitolu 3.3 Plášťové termočlánky, nebo nechráněné (drátové termočlánky) [8].

Nechráněné termočlánky jsou nejjednodušší formou. Jak již bylo řečeno, měřicí konec je tvořen mechanickým spojením dvou drátů o stejném průměru, buď svařením, nebo pájením. Koncový spoj je velmi důležitou částí termočlánku, proto musí být oba dráty dokonale očištěny a pevně spojeny. Spoj je nechráněný, proto jsou zde jistá omezení použití. Velice nevhodné je použití pro měření teploty kapalin, dráty by mohly korodovat nebo oxidovat. Dále je třeba se vyhnout měření povrchů kovových částí, které jsou použity k uzemnění elektrických systémů. Nejčastěji se tyto termočlánky používají pro měření teploty plynu. Jsou velmi malé a mají rychlou odezvu [8].

#### 2.1.4 Základní vlastnosti a typy termočlánků

Mezi obecné požadavky na termočlánky patří: vysoký koeficient teplotního napětí (udává se v mV/100°C), lineární průběh napětí, stálost termoelektrických vlastností v čase, mechanická a chemická odolnost v redukčním a oxidačním prostředí, odolnost proti korozi, použitelnost v širokém rozsahu teplot, příznivý dynamický výkon termočlánků. Všechny tyto vlastnosti se mění podle toho, z jaké dvojice kovů je termočlánek vyroben. V následující tab. 2 jsou uvedeny základní vlastnosti vybraných termočlánků.

Tab. 2: Základní vlastnosti termočlánků

Ozn.	Původní značení dle složení	Termoel. napětí (mV/100 °C)	Použitelnost (°C)		Odolnost v prostředí	
			Trvale	Krátkodobě	oxidačním	redukčním
<b>T</b>	Cu-CuNi	4,25	-200 až +400	+600	malá	/
<b>J</b>	Fe-CuNi	5,37	-200 až +600	+900	malá	velká
<b>K</b>	NiCr-NiAl	4,8	-50 až +1000	+1300	velká	malá
<b>S</b>	Pt10Rh-Pt	0,64	0 až +1300	+1800	velká	malá

Dalšími vlastnostmi termočlánků jsou přesnost a spolehlivost. Třídy přesnosti jsou rozděleny do 3 skupin. Skupina 1 a 2 pro teploty vyšší než  $-40^{\circ}\text{C}$  a skupina 3 pro hodnoty teplot do  $-200^{\circ}\text{C}$ .

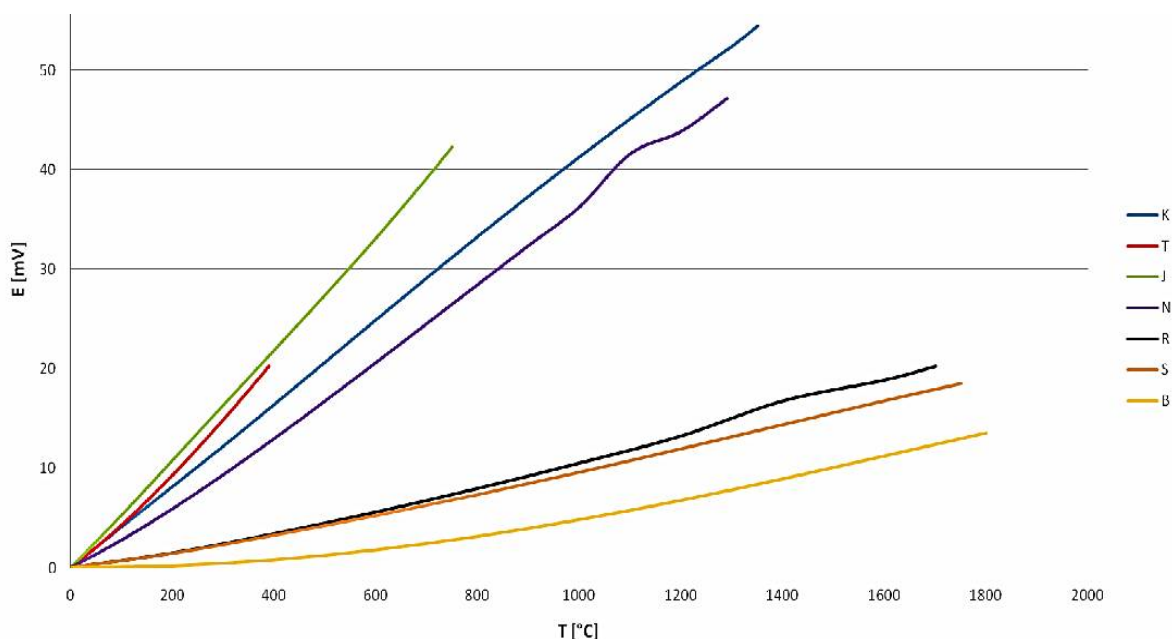
- 1) Třída přesnosti, s výjimkou typu C a A, je vyjádřena buď jako odchylka ve  $^{\circ}\text{C}$  nebo jako funkce absolutní hodnoty teploty  $t$ . Vždy platí vyšší hodnota. [7]
- 2) Termočlánky a termodráty jsou zpravidla dodávány tak, aby byly dodrženy limity tříd přesnosti uvedené v Tab. 12; ČSN EN 60 584-1:2014 pro teplotní rozsah nad  $-40^{\circ}\text{C}$ . Odchylky termočlánků vyrobených ze stejných materiálů mohou být při teplotách pod  $-40^{\circ}\text{C}$  vyšší, než je limitní hodnota třídy 3. V případě potřeby termočlánků, které mají odpovídat třídám přesnosti 1, 2 nebo 3, musí kvůli správnému výběru materiálu kupující uvést tento požadavek v objednávce. [7]

Příklad toleranční třídy pro termočlánky typu K a N: viz ČSN EN 60 584-1 [7]

1. třída - pro teploty od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $1000^{\circ}\text{C}$  je tolerance  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$  nebo  $0,004*|t|$
2. třída - pro teploty od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $1200^{\circ}\text{C}$  je tolerance  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$  nebo  $0,0075*|t|$
3. třída - pro teploty od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $40^{\circ}\text{C}$  je tolerance  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$  nebo  $0,015*|t|$

Tolerance a rozsahy platnosti, které se liší od hodnot uvedených v Tab. 12; ČSN EN 60 584-1:2014 musí být dohodnuty mezi výrobcem a uživatelem [7].

Dle předpokládaného rozsahu měřených teplot se stanovuje vhodná dvojice kovů a to podle závislosti termoelektrického napětí na teplotě. Je třeba vybrat takové dva kovy, aby změna napětí byla co nejvyšší. Závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termočlánky je znázorněna na grafu 1 [8].



Graf 1: Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termočlánky [13]

Z grafu například vyplývá, že nejlineárnějším průběhem se vyznačuje termočlánek typu K, nejvyšší termoelektrické napětí poskytuje termočlánek typu J, ovšem lze ho použít jen při nízkých teplotách. Termočlánek typu S poskytuje sice nízké termoelektrické napětí (k měření je nutno použít citlivější milivoltmetry), je však chemicky stabilní (neoxiduje se) a je použitelný i při vysokých teplotách [8].

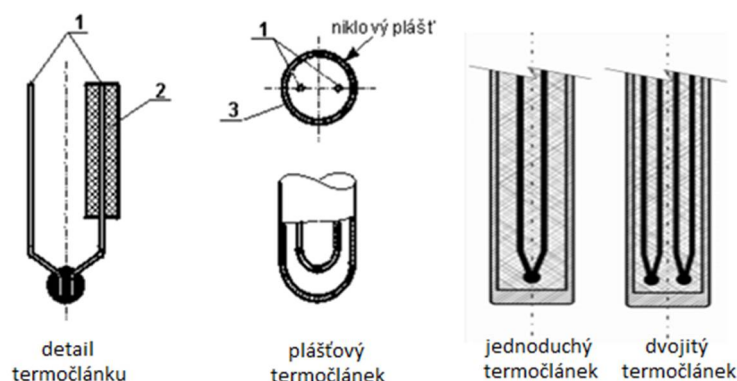
Typy termočláneků se původně označovaly použitou dvojicí kovů (chemickým složením), dnes se označují dle ČSN EN 60 584-1 [7] velkými písmeny viz tab. 3. V České republice jsou nejčastěji používány termočláanky J, K, S, B, čímž je pokryt rozsah teplot od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $1700^{\circ}\text{C}$ . Použitím termočláanky na bázi wolframu a rhodia (typ C a A) lze měřit až do  $2300^{\circ}\text{C}$ . V Příloze C, Tab. C.1, ČSN EN 60 584-1 [7] je uveden kompletní rozsah maximálních doporučených teplot použití pro jednotlivé typy a průměry termočláanky.

Tab. 3 Značení termočláanky dle ČSN EN 60 584-1:2014

Označení	Původní značení dle složení	Doporučený teplotní rozsah použití [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Barevné označení	
			Kladný pól	Záporný pól
T	Cu-CuNi	+200 až +350	hnědá	bílá
J	Fe-CuNi	+400 až +750	černá	bílá
E	NiCr-CuNi	+440 až +800	fialová	bílá
K	NiCr-NiAl	+750 až +1200	zelená	bílá
N	NiCrSi-NiSi	+850 až +1250	lila	bílá
S	Pt10Rh-Pt	+1400 až +1600	oranžová	bílá
R	Pt13Rh-Pt	+1400 až +1600	oranžová	bílá
B	Pt30Rh-Pt6Rh	+1500 až +1700	bez údaje	bílá

## 2.2 Plášťové termočláanky

Základním typem kompaktních snímačů teploty jsou tzv. plášťové termočláanky, u nichž jsou dráty uloženy v niklové trubičce vyplněné práškovým MgO nebo  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Vyrábějí se jako jednoduché s jedním nebo jako dvojité se dvěma články, viz obr. 7.



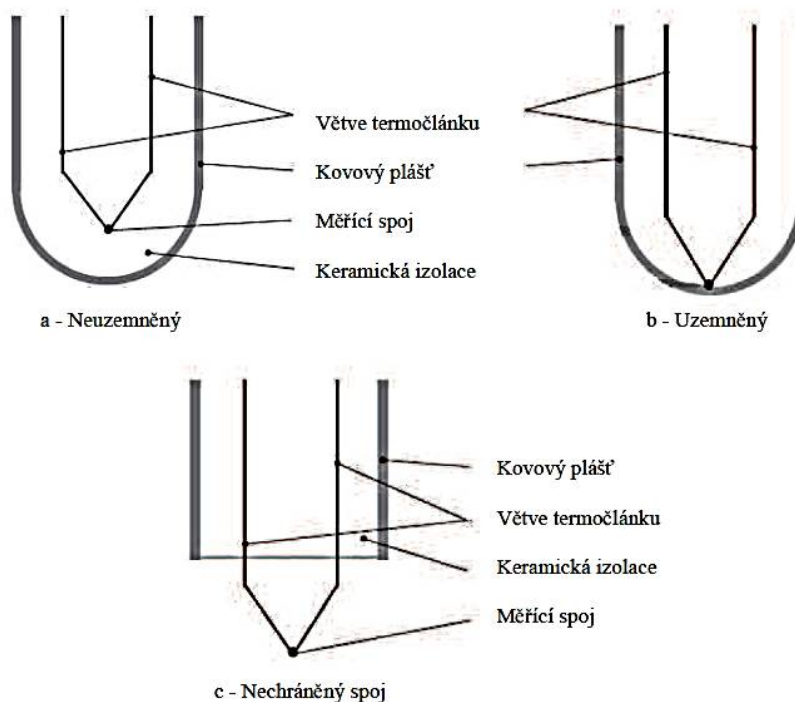
1 ... termočláanky dráty, 2 ... keramická izolace  
3 ... keramický prášek

Obr. 7: Konstrukce plášťového termočláanky [13]



Průměr kovového pláště činí 0,15 až 10 mm. Plášťové termočlánky lze ohýbat, mají malou časovou konstantu a umožňují měření i na těžko přístupných místech. Nejčastěji používaným materiálem pláště jsou nerezová ocel (značně široká chemická odolnost) a Inconel (větší teplotní rozsah) [8].

Měřicí konec termočlánekové sondy má tři různá provedení. Uzemněný, neuzemněný (izolovaný) a nechráněný (otevřený), viz obr. 8. U uzemněného typu je měřicí konec termočlánek svařen s pláštěm sondy. Tento uzemněný spoj má rychlou časovou odezvu, ale je velmi citlivý na uzemněné měřicí elektrické smyčky. U neuzemněných spojů je termočlánek oddělen od stěny pláště sondy izolací, tím je lépe chráněn proti vlivům prostředí a vhodným zapojením lze potlačit i vliv elektromagnetického rušení a zemních smyček. Má ale oproti ostatním dvěma provedením delší dobu odezvy, z důvodu prostupu tepla pláštěm a izolací. Nechráněný spoj termočlánekové sondy je vysunut z pláště. Tyto termočlánekové sondy jsou nejlepší při měření teploty vzduchu. Pro agresivní a vlhké prostředí je tento spoj nepoužitelný [13].



Obr. 8: Příklad provedení měřicího konce termočlánek [8]

Kapitola 4.5.1.5 Termoelektrický článek pro teplotu okolí ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti Část 1: Základní požadavky z roku 2013 [4] říká: „Pro zjištění teploty prostředí v laboratoři v blízkosti zkušební vzorku před zkouškou i během ní se použije termoelektrický článek. Termoelektrický článek musí **mít jmenovitý průměr 3 mm**; musí to být **termoelektrický článek typu K**, stanovený v EN 60584-1, s tolerancemi stanovenými v EN 60584-2, **izolovaný minerálním materiálem, s pláštěm z korozi-vzdorné oceli**. Měřicí spoje musí být **chráněny** před sálavým teplem a průvanem zařízení“ [4].

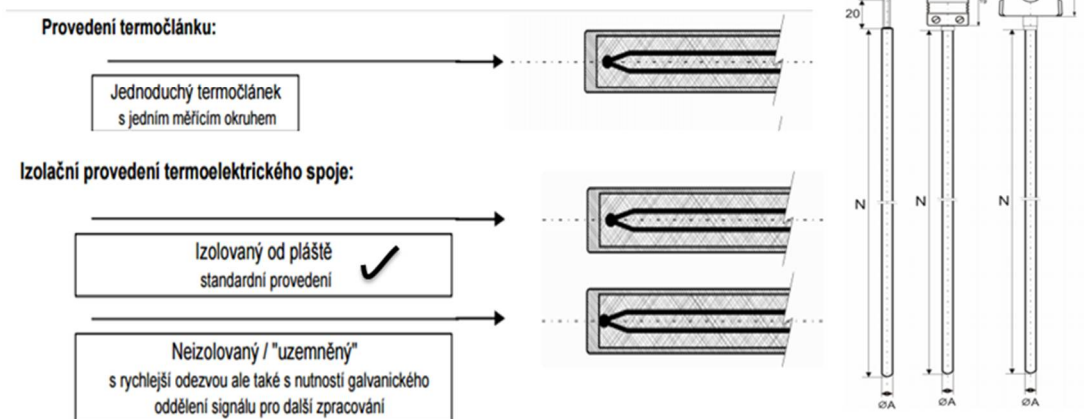
Takovému provedení odpovídá například MTC 10 - plášťové termočlánky - bez / s konektorem, viz obr. 9, od českého výrobce termočlánekových a odporových snímačů teplot MAVIS Nový Bor s.r.o., celý technický list výrobce viz Příloha 1.

MAVIS Nový Bor s.r.o.

### MTC 10 - plášťový termočlánek

Měřicí rozsahy plášťových termočláneků a třídy přesnosti dle ČSN EN 60584, DIN 43 710:

"K" (NiCr-Ni)	ČSN EN 60584	třída přesnosti 1 [-40 až 1000°C]	třída přesnosti 2 [-40 až 1200°C]
"J" (Fe-CuNi)	ČSN EN 60584	třída přesnosti 1 [-40 až 750°C]	třída přesnosti 2 [-40 až 750°C]
"N" (NiCrSi-NiSi)	ČSN EN 60584	třída přesnosti 1 [-40 až 1000°C]	třída přesnosti 2 [-40 až 1200°C]
"L" (Fe-CuNi)	DIN 43 710	[-200 až 900°C]	



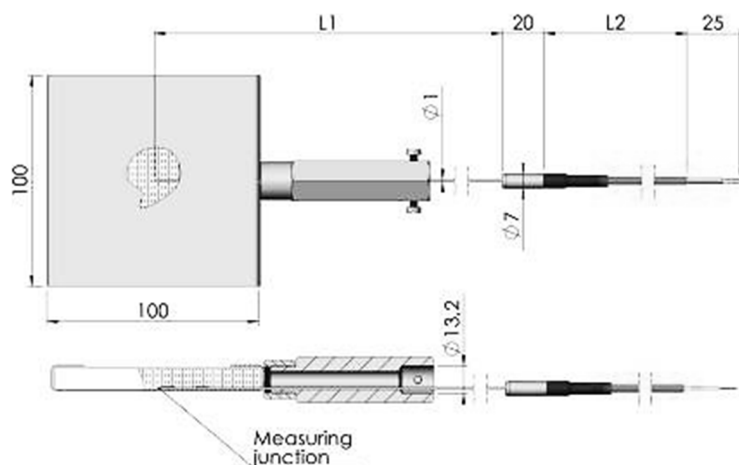
Obr. 9: MTC 10 - plášťový termočlánek - bez / s konektorem, výrobce MAVIS Nový Bor s.r.o., viz technický list výrobce Příloha 1

Shrnutí vlastností termočláneků typu K (NiCr-NiAl):

- barevné označení kladného pólu – zelená viz tab. 3
- doporučený teplotní rozsah použití +750°C až +1200°C viz tab. 3,
- použitelnost: trvale -50°C až +1000°C, krátkodobě +1300°C viz tab. 2
- dostatečná linearita křivky napětí viz graf 1
- nízký koeficient teplotního napětí = 4,8 mV/100°C viz tab. 2
- vhodný pro oxidační a inertní atmosféru,
- od 600°C zokujení oxidací,
- necitlivý na neutronový tok (měření v jaderných reaktorech),
- nevhodný pro měření ve vakuu, redukční atmosféře nebo prostředích obsahujících síru,
- nevýhodou je jistá nestabilita v rozsahu 200 až 600°C, kdy vykazuje hysterezi (průběh fyzikálních změn při cyklickém opakování podmínek) [13].

## 2.3 Deskové snímače teploty

Deskový snímač teploty angl. Plate Thermometers (dále v textu PT) je zobrazen na obr. 1. PT jsou v požárních pecích používány k řízení teploty plynů v průběhu experimentů a to tak, že dle teploty na nich naměřené jsou automaticky upravovány výkony hořáků. Vzhledem k tomu, že jsou deskové snímače teploty využívány v požárních pecích, je jejich konstrukce a použití normově harmonizováno, viz kapitoly 2.3.3 a 2.3.4.



Obr. 10: Deskový snímač teploty.

### 2.3.1 Teorie PT

K šíření tepelné energie z jednoho místa na druhé dochází v důsledku proudění (konvekce), sálání (radiace) a vedení (kondukcí) tepla. Pro správné pochopení chování konstrukce za požáru jsou důležité první dvě složky tepelného toku: proudění a sálání.

Díky vhodné konstrukci umožňují deskové snímače teploty zaznamenat složky tepelného toku a vypočítat množství tepelného namáhání, které přijala konstrukce prouděním a sáláním.

Výpočtové tepelné zatížení, jemuž je konstrukce při požáru vystavena, je dáno čistým tepelným tokem  $h_{tot} [W/m^2]$  dopadajícím na povrch konstrukce. Čistý tepelný tok se skládá ze složek proudění a sálání horkých plynů z plamenů nebo z horkých povrchů konstrukcí. Důležitou úlohu při přestupu tepla představují součinitel emisivity povrchů a prostředí a součinitel přestupu tepla prouděním [14].

Dle ČSN EN 1991-1-2: 2004 kapitola 3 jej lze stanovit jako [15]:

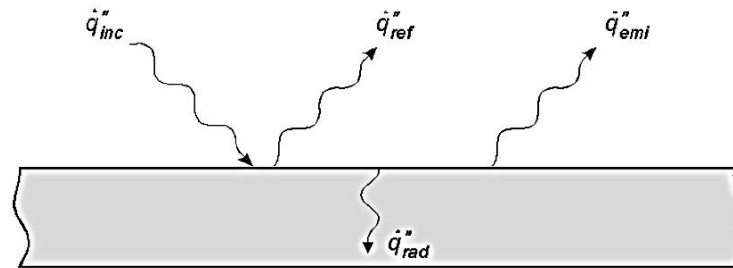
$$h_{tot} = h_{tot,c} + h_{tot,r} [w/m^2] \quad (7)$$

kde

$h_{tot,c}$  je složka čistého konvekčního tepelného toku,

$h_{tot,r}$  je složka čistého sálavého tepelného toku.

Čistý **sálavý** tepelný tok  $h_{tot,r}$  ve výše uvedené rovnici (7) je roven rozdílu mezi pohlcenou částí dopadajícího záření a částí emitovaného záření z povrchu konstrukce viz obr. 11.



Obr. 11: Přenos tepla sáláním závisí na dopadajícím záření, teplotě a emisivitě povrchu <sup>1</sup>

Část dopadajícího sálavého tepelného toku je absorbována a zbytek je odražen -  $h_{ref}$ . Následně povrch emituje část přijatého sálavého tepelného toku a to v závislosti na emisivitě a teplotě povrchu na čtvrtou viz rovnice (8).

$$h_{emi} = \sigma \cdot T_s^4 \quad [w/m^2] \quad (8)$$

kde

$h_{emi}$  je část sálavého tepelného toku emitovaná (vyzářená) z povrchu konstrukce

$\sigma$  je Stephan-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),

$T_s$  je teplota povrchu.

Pokud zanedbáme teplo přenášené přes povrchy a vliv různých vlnových délek a jelikož jsou si pohltivost a emisivita rovny, lze čistý tepelný tok přijatý povrchem vyjádřit jako [16]:

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot (h_{inc} - h_{emi}) \quad [w/m^2] \quad (9)$$

kde

$h_{inc}$  je část sálavého tepelného toku dopadající na povrch,

$\varepsilon$  je emisivita prvku závislá na povrchu materiálu. Tato hodnota může být změřena, ale ve většině případů ji lze předpokládat rovnou 0,8. U lesklých povrchů, například v případě hliníku, může být hodnota  $\varepsilon$  mnohem nižší.

Vzhledem k tomu, že požáry se vyznačují nehomogenním rozdělením teploty, by měla  $h_{inc}$  část sálavého tepelného toku dopadající na povrch zahrnovat v ideálním případě příspěvky od okolních plamenů, horkých plynů a povrchů. V takovém případě může být  $h_{inc}$  zapsána jako součet příspěvků ze všech radiační zdrojů [16]:

$$h_{inc} = \sum \varepsilon_i F_i \sigma \cdot T_i^4 \quad [w/m^2] \quad (10)$$

kde

$\varepsilon_i$  je emisivita  $i$ -tého plamene nebo povrchu,

<sup>1</sup> V různých publikacích můžeme často nalézt odlišné značení a to zejména u  $h_{tot}$ ,  $h_{inc}$ ,  $h_{tot,r}$  značené jako  $q_{tot}$ ,  $q_{inc}$ ,  $q_{rad}$  nebo  $\alpha_c$  značené jako  $h_c$ .

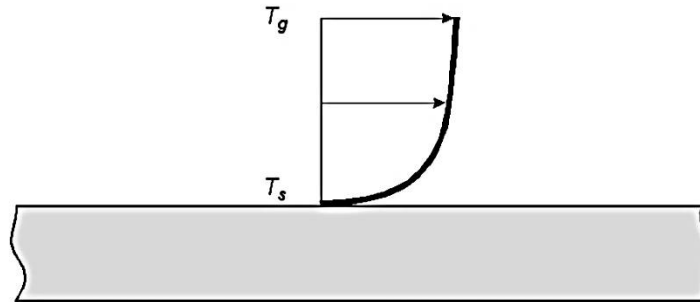
$\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta,

$F_i$  a  $T_i$  jsou odpovídající polohový faktor a teplota.

Získání  $h_{inc}$  pomocí rovnice (10) je obecně velmi složité, ale aktuální generace požárních modelů již obsahuje různé algoritmy pro její výpočet,  $h_{inc}$  lze také vyjádřit pomocí radiační teploty  $T_r$ :

$$T_r^4 = \sum \varepsilon_i F_i T_i^4 \quad (11)$$

Přenos tepla konvekcí závisí na rozdílu mezi teplotou plynu a teplotou povrchu konstrukce a na rychlosti proudění plynu viz obr. 12.



Obr. 12: Profil rychlosti proudění plynu podél ohřívané konstrukce.

Složka čistého konvekčního tepelného toku  $h_{tot,c}$  z rovnice (8) může být přibližně vyjádřena jako [16]:

$$h_{tot,c} = \alpha_c (T_g - T_s) \quad [w/m^2] \quad (12)$$

kde

$\alpha_c$  je součinitele přestupu tepla prouděním, který se v praxi pohybuje od 25 (normový požár) do 50  $W/m^2K$  (uhlovodíkové hoření),

$T_g$  je teplota plynu dopadajícího na exponovaný povrch.

Z výše uvedeného vyplývá, že celkový čistý tepelný tok  $h_{tot} [W/m^2]$  dopadající na povrch konstrukce, může být vyjádřen jako:

$$h_{tot} = \varepsilon (h_{inc} - \sigma T_s^4) + \alpha_c (T_g - T_s) \quad [w/m^2] \quad (13)$$

nebo vyjádřením  $h_{inc}$  pomocí radiační teploty  $T_r$  jako:

$$h_{tot} = \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_s^4) + \alpha_c (T_g - T_s) \quad [w/m^2] \quad (14)$$

### 2.3.2 Adiabatická teplota povrchu

**Adiabatický děj** je termodynamický děj, při kterém nedochází k tepelné výměně mezi plynem a okolím. Děj probíhá při dokonalé tepelné izolaci, takže soustava žádné teplo nepřijímá ani nevydává. Za předpokladu, že je povrch, který je vystaven tepelnému zatížení, dokonalým izolátorem, je tedy celkový čistý tepelný tok  $h_{tot}$  přestupující do tohoto ideálního povrchu nulový.

$$0 = \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_s^4) + \alpha_c (T_g - T_s) \quad [w/m^2] \quad (15)$$

V případě **deskového snímače teploty** je toto zajištěno vrstvou izolace, vedení v tenkém plechu se zanedbává, platí proto výše uvedená rovnost. V případě potřeby přesnějšího dopočtu se u PT používají hodnoty  $\varepsilon_{PT} = 0,9$ ;  $\alpha_{PT} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $K_{PT} = 8,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

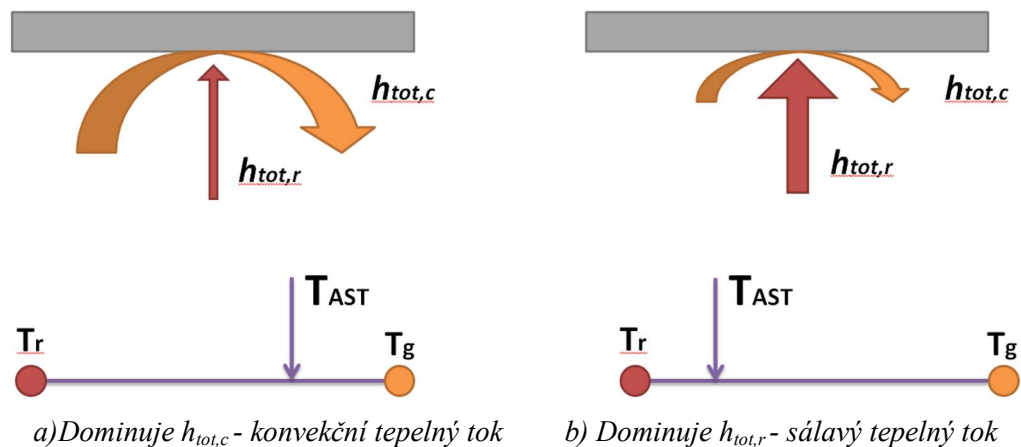
Teplota ideálního povrchu, který neabsorbuje žádný tepelný tok, je označován jako **adiabatická teplota povrchu (AST)**. Z toho vyplývá, že teplota naměřená PT bude přibližně rovna AST:

$$T_{PT} \approx T_{AST} \quad (16)$$

Rovnici (15) můžeme tedy s použitím  $T_{AST}$  přepsat jako:

$$0 = \varepsilon\sigma(T_r^4 - T_{AST}^4) + \alpha_c(T_g - T_{AST}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (17)$$

V případě měření  $T_{AST}$  záleží na pozici a orientaci, v každém bodě lze definovat maximálně 6 různých  $T_{AST}$ , zatímco  $T_g$  je pouze jedna.  $T_{AST}$  vyjadřuje vážený průměr mezi  $T_r$  a  $T_g$ , je závislá na emisivitě povrchu, součiniteli proudění, avšak není závislá na teplotě povrchu  $T_s$ . Pokud je převládající složkou tepelného toku konvekce  $h_{tot,c}$  je hodnota  $T_{AST}$  bližší teplotě plynu  $T_g$  a v případě, že převládá sálání  $h_{tot,r}$  je hodnota  $T_{AST}$  bližší radiační teplotě, viz obr. 13.



Obr. 13: Vliv složek konvekčního a sálavého tepelného toku na hodnotu  $T_{AST}$

$T_{AST}$  může být získána jako výstup z CFD modelu, viz kapitola 4, nebo může být měřena při reálných požárních zkouškách s použitím deskových snímačů teploty, viz kapitola 3. V tomto smyslu, je  $T_{AST}$  teplota, která by byla změřena ideálním deskovým snímačem teploty.

Rozdílem rovnic (14) a (17) je možné získat rovnici (12).

$$(+)\ h_{tot} = \varepsilon\sigma(T_r^4 - T_s^4) + \alpha_c(T_g - T_s) \quad [\text{W/m}^2] \quad (14)$$

$$(-)\ 0 = \varepsilon\sigma(T_r^4 - T_{AST}^4) + \alpha_c(T_g - T_{AST}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (17)$$

$$h_{tot} = \varepsilon\sigma(T_{AST}^4 - T_s^4) + \alpha_c(T_{AST} - T_s) \quad [\text{W/m}^2] \quad (18)$$

Namísto dvou rozdílných teplot  $T_r$  a  $T_g$  lze k výpočtu přestupu tepla do konstrukce použít pouze jednu teplotu  $T_{AST}$ , kterou díky vhodné konstrukci umožňují měřit deskové snímače teploty a tím nám dávají možnost přesněji dopočítat teplotu, dále například i kolik tepla konstrukce přijala konvekčním a kolik sálavým tepelným tokem.

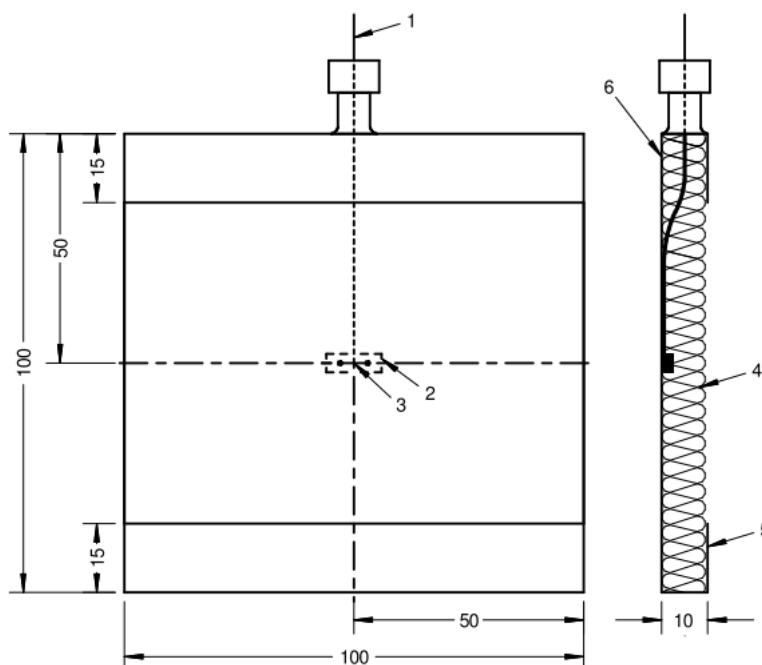
### 2.3.3 Konstrukce PT

Konstrukce a materiál deskového snímače teploty je definován v ČSN EN 1363-1: 2013 kapitola 4.5.1.1 Termoelektrické články v peci [4].

Termoelektrické články v peci jsou požadovány v provedení deskových snímačů teploty tvořených ohnutou deskou ze slitiny niklu, k ní připevněnému termoelektrickému článku a izolačního materiálu.

Ohnutá kovová deska musí být zhotovena z proužků vysoce legované austenitické slitiny na bázi niklu, s odolností proti oxidaci při vysokých teplotách, o délce ( $150 \pm 1$  mm), šířce ( $100 \pm 1$  mm) a tloušťce ( $0,7 \pm 1$  mm), viz obr. 14.

Měřicí konce termoelektrických článků v peci jsou požadovány z drátu typu K (NiCr-NiAl), uzavřeného v minerální izolaci v tepelně odolném plášti z ocelové slitiny o jmenovitém průměru 1 mm až 3 mm, s měřicími spoji elektricky izolovanými od pláště (stejně provedení jako na obr. 9). Měřicí spoj termoelektrického článku musí být připevněn v geometrickém středu desky, v poloze znázorněné na obr. 14, pomocí malého pásku zhotoveného ze stejného materiálu jako deska. Pásek se může k desce přivařit nebo přišroubovat, aby usnadňoval výměnu termoelektrického článku. Rozměr přivařovaného pásku musí být přibližně  $18 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ , rozměr přišroubovávaného pásku pak  $25 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ . Šroub musí mít průměr 2 mm. Sestava desky a termoelektrického článku se opatří vložkou z anorganického izolačního materiálu o jmenovitých rozměrech ( $97 \pm 1 \text{ mm} \times 97 \pm 1 \text{ mm} \times \pm 10 \text{ mm}$ ) a s objemovou hmotností ( $280 \pm 30 \text{ kg/m}^3$ ) [4].



#### Legenda

- 1 plášťový termoelektrický článek typu K – NiCr-NiAl s izolovaným měřicím spojem
- 2 bodově přivařený ( $18 \times 6$  mm) nebo  
přišroubovaný ocelový pásek ( $25 \times 6$  mm), šroub musí mít průměr 2 mm

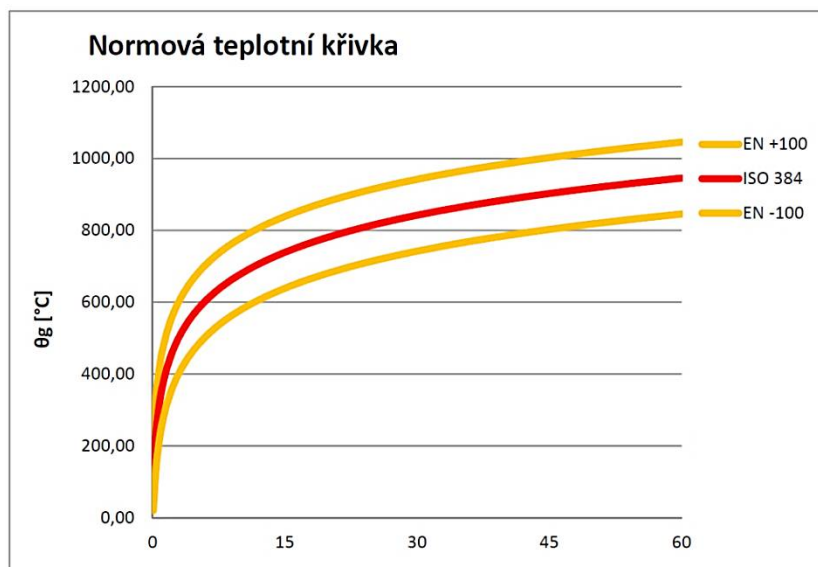
- 3 měřicí spoj termočlánku
- 4 minerální izolační materiál ( $97 \pm 1$  mm x  $97 \pm 1$  mm x  $10 \pm 1$  mm), objem. hmotnost ( $280 \pm 30$ ) kg/m<sup>3</sup>
- 5 pásek slitiny niklu o délce ( $150 \pm 1$  mm), šířce ( $100 \pm 1$  mm) a tloušťce ( $0,7 \pm 1$  mm)
- 6 strana "A" – přijímající tepelný tok

Obr. 14: Konstrukce deskového snímače teploty [4]

Před prvním použitím deskových snímačů teploty se ohýbaná část desky nechá vyzrát uložením po dobu 1 hodiny do pícky předeřháté na  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ , nebo se ohřívá v peci na zkoušení požární odolnosti po dobu 90 minut, zkouška je provedena podle normové křivky v závislosti teplota-čas dle vztahu [4]:

$$\theta_g = 345 + \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (19)$$

Dále je v ČSN EN 1363-1: 2013 [4] kapitola 5.1.2 Odchyly stanovená mezní odchylka pro průběh teploty v peci, kdy je dovoleno lišit se o  $\pm 100\ ^\circ\text{C}$  od průběhu normové teplotní křivky, aby zkouška byla považována za platnou, viz graf 2.



Graf 2: Průběh křivky normové teplotní křivky s tolerancí  $\pm 100\ ^\circ\text{C}$

Použije-li se termoelektrický článek více než jednou, mají se o jeho užití a kontrole vést záznamy. Termoelektrický článek a izolační vložka se mají vyměnit po 50 hodinách tepelného namáhání [4].

### 2.3.4 Umístění PT

Deskové snímače teploty se používají k řízení teploty v peci a měření tepelného toku, jemuž je posuzovaná konstrukce při tepelném zatížení v peci vystavena. Podle toho se také odvíjejí pravidla pro umístování těchto snímačů teploty v požárních pecích a okolo zkoumaných konstrukcí.



Rozmístění deskových snímačů teploty se věnuje ČSN EN 1363-1: 2013 [4] kapitola 9.1.1 Termoelektrické články v peci (deskové snímače teploty).

Deskové snímače teploty použité pro měření teploty v peci se rozmístí tak, aby spolehlivě uváděly **průměrnou teplotu v blízkosti vzorku**. Nesmí být ve styku s plameny hořáků v peci a musí být vzdáleny **min. 450 mm** od kterékoliv stěny, podlahy nebo stropu **pece**. (Pozn.: vzdáleností 450 mm je myšlena vzdálenost od konstrukce pece, nikoliv od zkoušené konstrukce)

Při zahájení zkoušky musí být každý deskový snímač teploty (**100 ± 50 mm**) od **nejbližšího bodu** ohřívaného povrchu **zkušební konstrukce** a musí být v této vzdálenosti během zkoušky pokud možno udržován. V Příloze C této normy je uvedeno v kapitole C.1.2 Umístění, že podpora pro deskové snímače teplot v peci **nemá procházet vzorkem** nebo **být k němu připevněna** [4].

Na počátku zkoušky musí být v peci nejméně tolik deskových snímačů teploty (**n**), kolik požaduje specifická zkušební metoda. Jestliže přestanou být snímače teploty funkční, je zkouška považována za platnou a není potřeba žádných opatření ze strany zkušebny, pokud počet funkčních snímačů neklesne pod **n-1**. V opačném případě, pokud zkušebna nefunkční snímače nenahradí, jsou výsledky zkoušky považovány za neplatné.

Například dle ČSN P ENV 1363-3 Ověřování charakteristik pecí:1999 [6] kapitola 9.1 Deskové snímače teploty v peci, musí být na každých **1,5 m<sup>2</sup>** ohřívané povrchové plochy zkušební konstrukce osazen alespoň jeden snímač. Dále pak musí být snímače teploty orientovány tak, aby strana **A** (značení viz obr. 14) směřovala k zadní stěně pece, pokud se jedná o stěnovou pec, nebo k podlaze pece, jde-li o horizontální pec.

### 3 Experimentální studie

Experiment proběhl 29.7.2016 ve vodorovné zkušební peci H2 v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí viz obr. 15. Výsledky z tohoto experimentu budou použity pro ověření správné funkce a přesnosti CFD modelu vodorovné pece.



Obr. 15: Pohled na pec H2

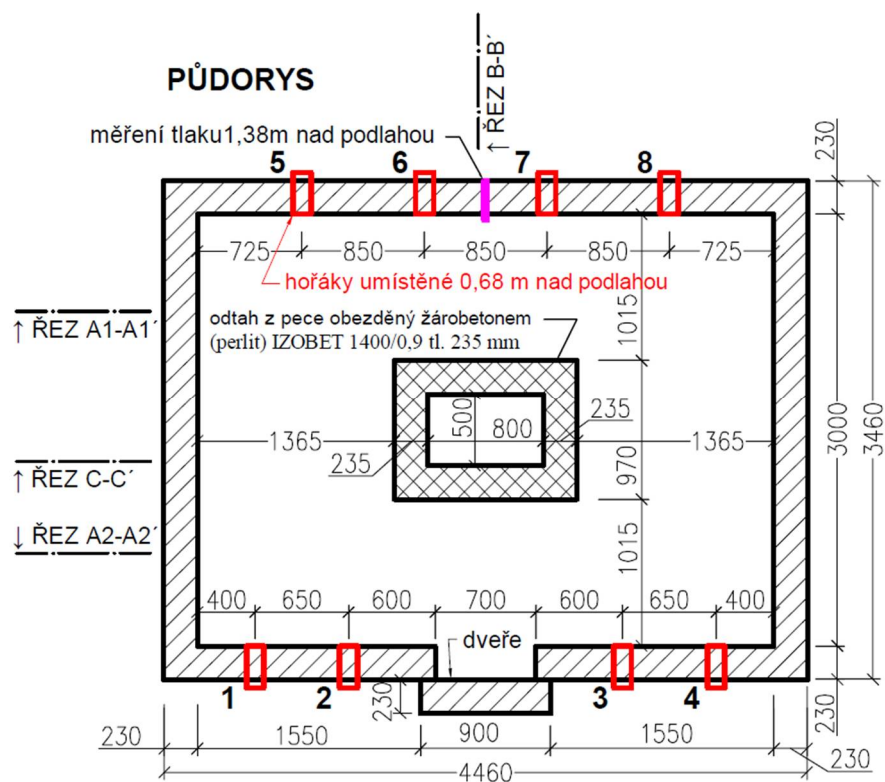
#### 3.1 Popis vodorovné pece H2

Rozměry požární pece H2, která je předlohou pro počítačový model, byly přeměřeny přímo na místě při návštěvě zkušebny PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí viz obr. 16. Naměřené rozměry jsou znázorněny na obr. 17, obr. 18 a obr. 19.

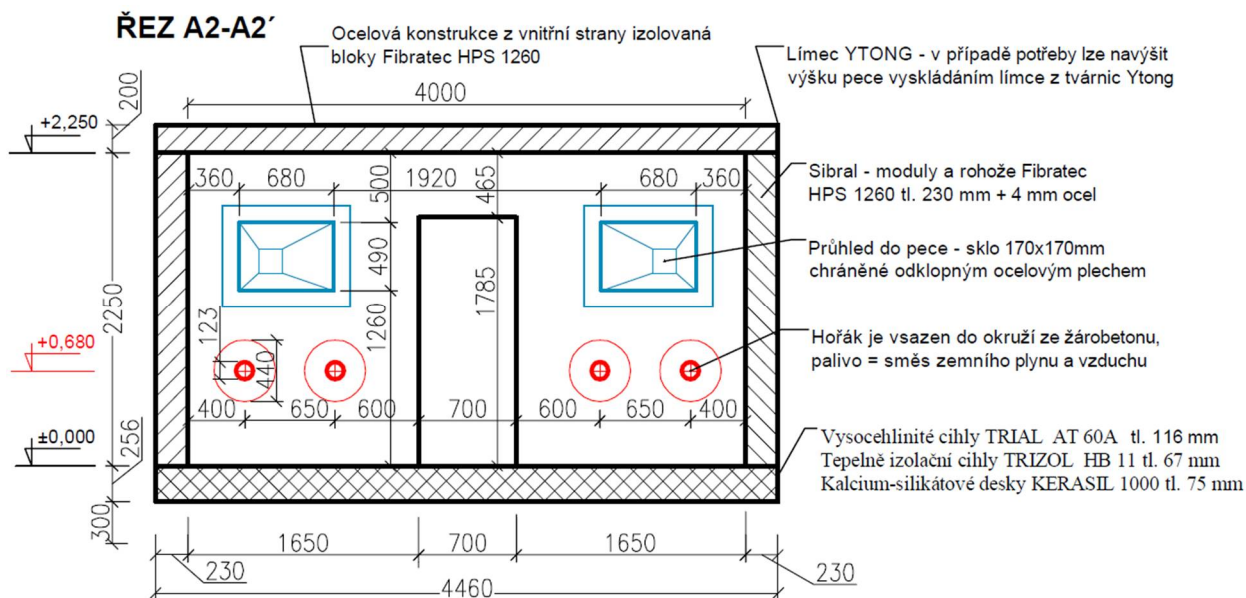


Obr. 16: Pec H2 – pohled shora

Vodorovná pec H2 má vnitřní půdorysné rozměry 3,0 x 4,0 m, viz obr. 17. Světlá výška pece je min. 2,16 m, tento rozměr je variabilní pomocí límcového nástavce po obvodě pece vytvořeného z tvárníc YTONG, viz obr. 18.

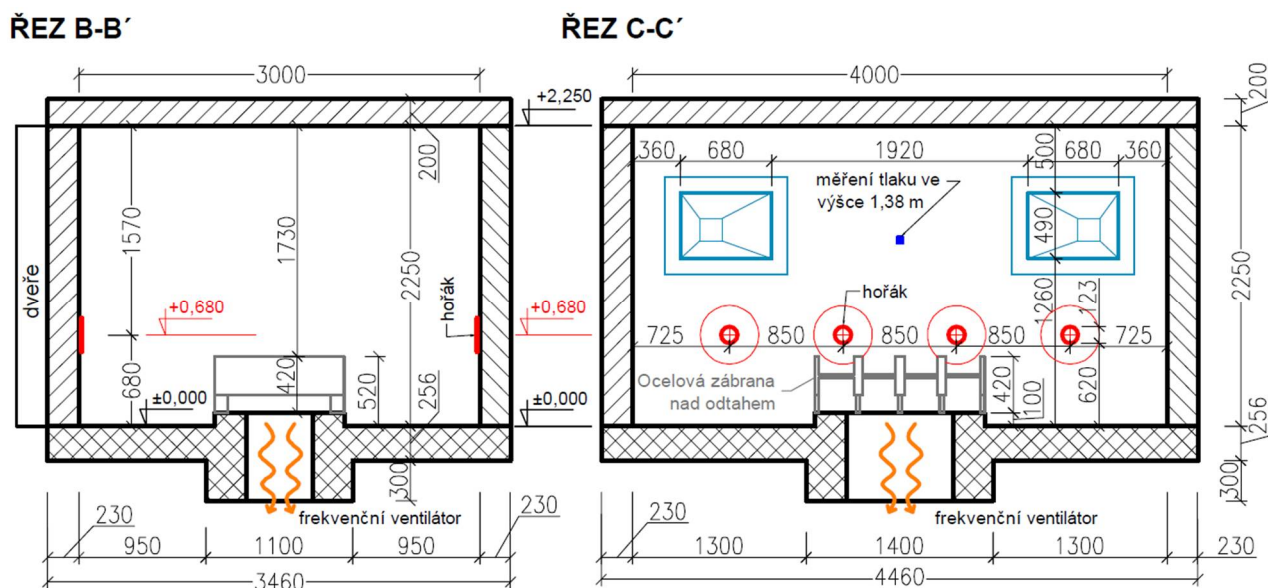


Obr. 17: Rozměry reálné pece - půdorys



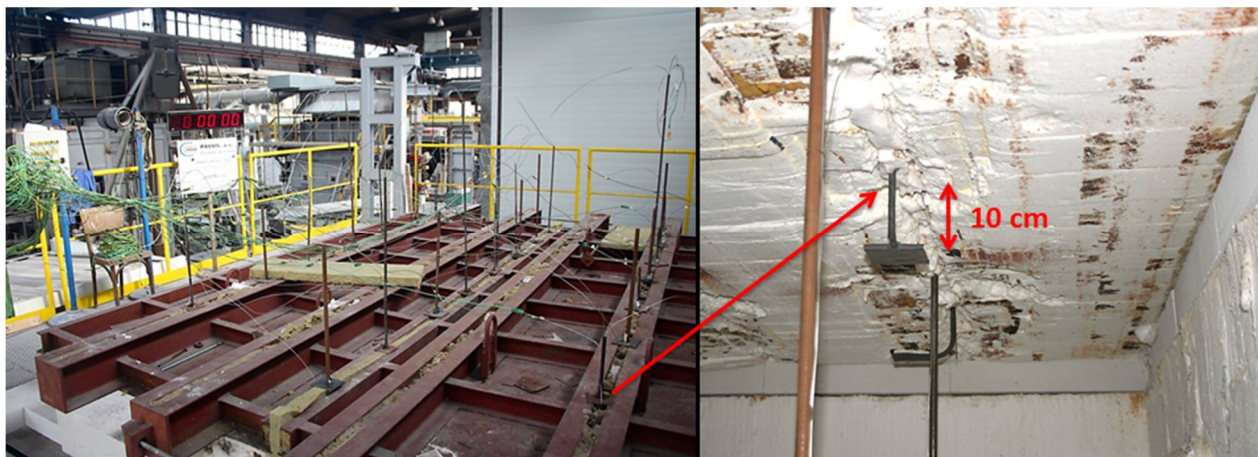
Obr. 18: Rozměry reálné pece - ŘEZ A2-A2'





Obr. 19: Rozměry reálné pece - ŘEZ B-B' a ŘEZ C-C'

Konstrukce stropu pece je výměnná a volí se dle doby trvání požární zkoušky či dalších potřeb. Pro déle trávající zkoušky (například 60 minut) je strop tvořen železobetonovými panely, zatímco v případě kratší doby zkoušky je strop tvořen keramickým vložkovým stropem. Dále je možné použít k uzavření stropu svařovanou ocelovou konstrukci, která je z vnitřní strany obložena stejnou minerální izolací jako vnitřní stěny pece, viz obr. 20. Tato konstrukce byla vyrobena přímo ve zkušebně dle rozměrů pece H2.



Obr. 20: Experiment – stropní svařovaná konstrukce na peci H2

Palivem pece je směs zemního plynu se vzduchem. Pec je vytápěna osmi plynovými hořáky, které jsou umístěny vždy 4 na delší straně pece, viz obr. 18 a obr. 19, kde jsou znázorněny jako červené kružnice.

Dále je v peci stabilně umístěno čidlo kontrolující tlakové podmínky v průběhu zkoušky a 10 cm pod stropem je rozmístěno symetricky naproti sobě na delších stranách 14 otvorů, které slouží pro umístění deskových snímačů teploty. Tyto snímače jsou napojeny na plynové hořáky a regulují jejich výkon v závislosti na teplotě v peci. V případě překrytí stropu pece ocelovou

konstrukcí je možné tyto deskové snímače teploty regulující výkony hořáků umístit do svislých mezer v ocelové konstrukci, které jsou utěsněny minerální vatou, viz obr. 20.

Stěny pece jsou tvořeny vyzdívkou z bloků a rohoží z ohnivzdorných keramických vláken o celkové tl. 230 mm. Vnější opláštění pece pak tvoří ocelový plech tl. 4 mm. Skladba stěn pece je znázorněna na obr. 21. Dno je vyskládáno ze šamotových cihel, celková tloušťka podlahy je 256 mm, viz obr. 22. Veškeré technické listy materiálů použitých ve vodorovné peci H2 obsahuje Příloha 2.



Obr. 21: Skladba stěn pece H2



Obr. 22: Skladba podlahy pece H2

Odtah spalin je prováděn pomocí frekvenčního ventilátoru umístěného v potrubí, které je připojeno k otvoru (500 mm x 800 mm) v podlaze pece. Další důležitou funkcí frekvenčního ventilátoru je kontrola přetlaku uvnitř pece vůči okolí, kdy by v průběhu zkoušky měl být tlak okolí v každé výškové úrovni o cca 20 Pa nižší. Přetlak je kontrolován pomocí čidla umístěného na vnitřní stěně pece ve výšce 1,38 m přímo naproti dveřím. Nad otvorem je umístěna svařovaná ocelová konstrukce výšky 420 mm (obr. 19 a obr. 23) bránící průniku odpadávajících částí zkoušených konstrukcí do otvoru v podlaze.



Obr. 23: Otvor v podlaže pece H2 s ochrannou ocelovou konstrukcí

Průběh zkoušky je možné sledovat čtyřmi průhledovými okénky umístěnými na delších stranách pece. Vstup do pece je umožněn dveřmi (1785 mm x 700 mm) se stejnou materiálovou skladbou, jako mají stěny pece, viz obr. 18.

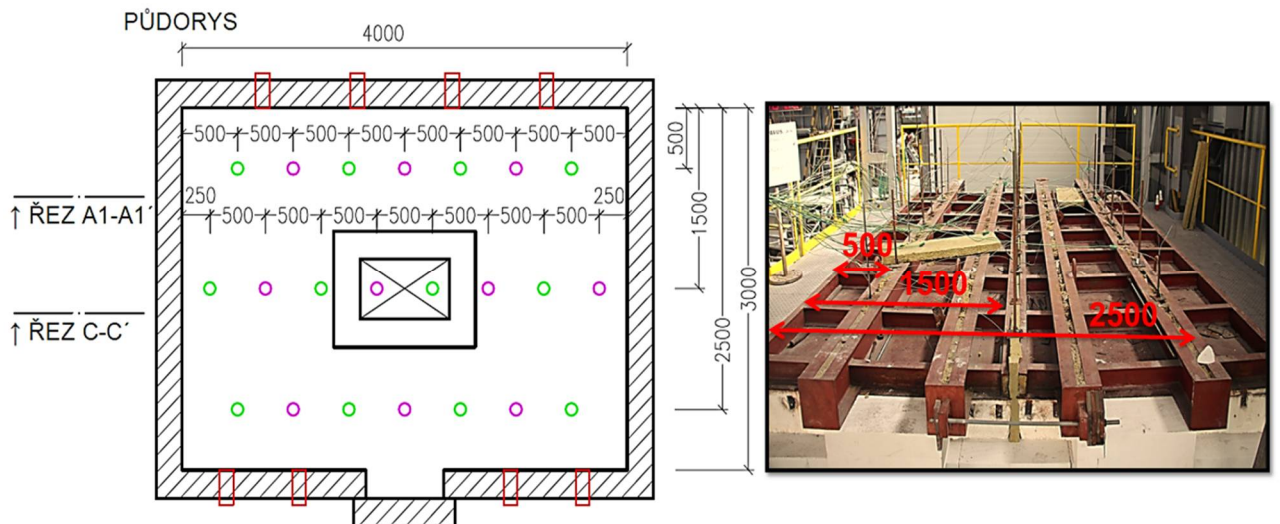
## 3.2 Rozmístění TC a PT při experimentu

K měření teploty v peci jsou používány dva typy snímačů teploty a to **plášťové termočlánky (TC)** a **deskové snímače teploty (PT)**, viz kapitolu 2.12.1 Plášťové termočlánky a deskové snímače teploty.

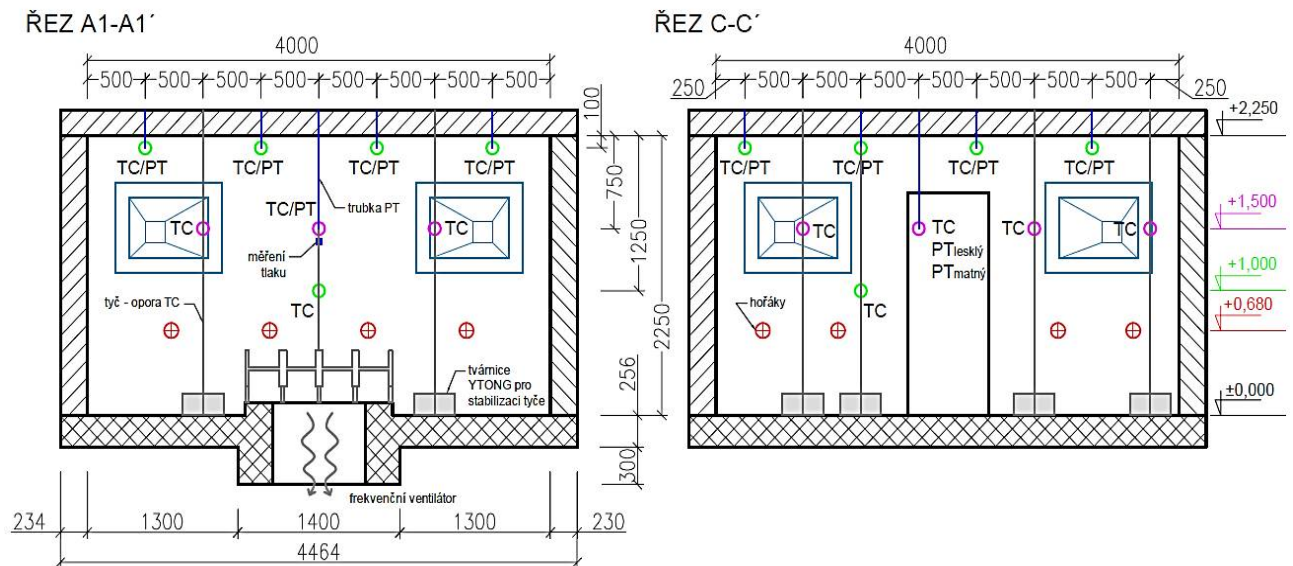
Rozmístění termočlánků vyplívá z konstrukčních možností pece a snahy pokrýt rovnoměrně celý vnitřní prostor pece, tak aby bylo dostatečné množství výsledků pro ověření teplot dosažených v CFD modelu. V ocelové stropní konstrukci uzavírající pec jsou podélně s delším rozměrem vedeny tři drážky, tyto drážky jsou utěsněny minerální vatou a je možné jimi v libovolných místech zavést snímače teploty do prostoru pece.

Termočlánky jsou tedy umístěny půdorysně ve třech řadách souběžných s delší stranou pece. Jedna řada termočlánků prochází přesně středem a krajní dvě řady vedou ve vzdálenosti 500 mm od vnitřních stěn pece, viz obr. 24. Po výšce jsou rozmístěny také tři řady termočlánků. První řada se nachází 1250 mm nad podlahou, druhá pak v úrovni 1750 mm nad podlahou a třetí je umístěna 100 mm pod spodním povrchem stropní konstrukce, viz obr. 25.



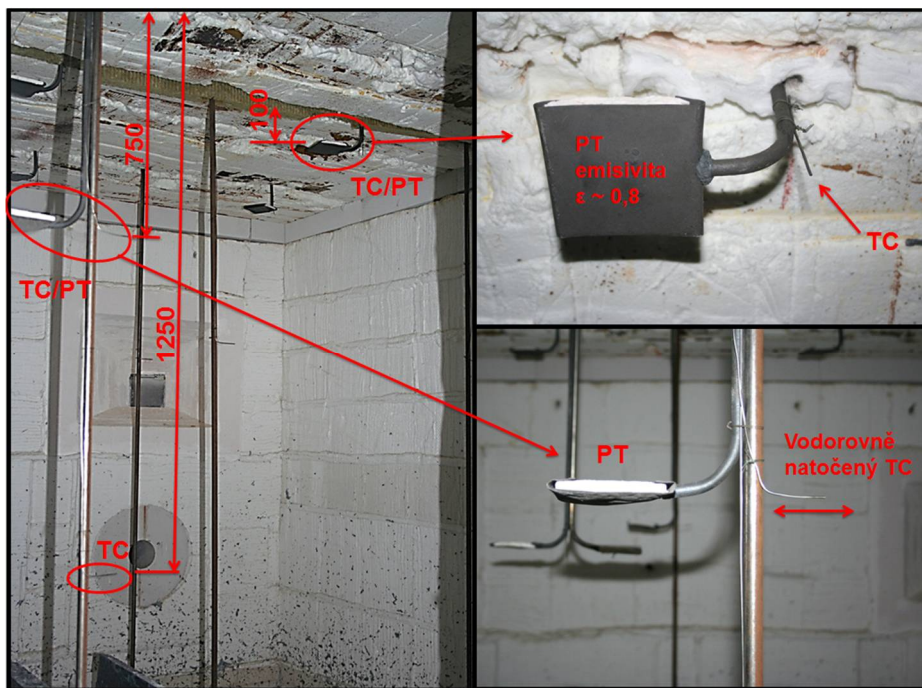


Obr. 24: Půdorys pece H2 s rozmištěním termočlánků + foto ocelové stropní konstrukce s umístěním termočlánků v drážkách.



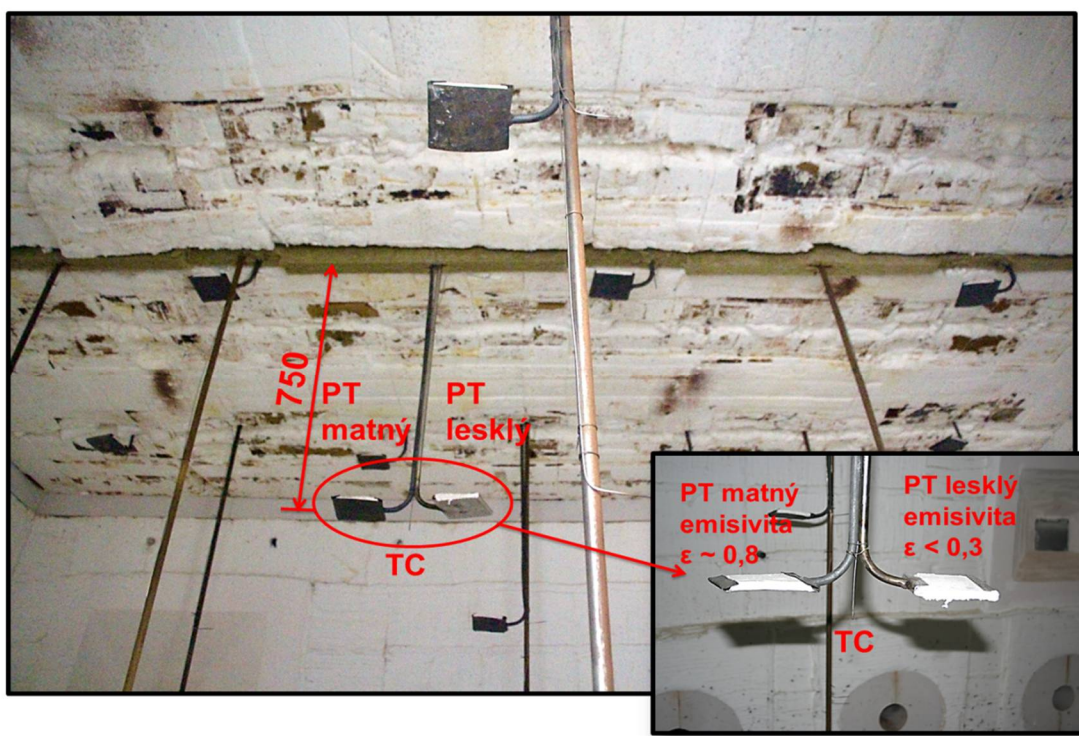
Obr. 25: ŘEZ A1-A1' a ŘEZ C-C' - Rozmištění plášťových termočlánků (TC) a deskových snímačů teploty (PT)

Ve vzdálenosti 100 mm pod stropní konstrukcí jsou umístěny vždy v jednom bodě dvojice TC a PT, další tři tyto dvojice se také nacházejí ve středu pece ve výšce 750 mm pod stropem. V dalších dvou výškových úrovních 750 mm a 1250 mm pod stropem jsou umístěny řady plášťových termočlánků. Měřicí konce TC jsou ohnuty vodorovně s podlahou, tak aby byla poloha měřícího konce shodná s polohou měřícího konce v PT, viz obr. 26.



Obr. 26: Výškové rozmístění TC a PT v prostoru pece + detail upevnění.

Přímo ve středu pece jsou ve vzdálenosti 750 mm pod stropem umístěny v jednom bodě dva deskové snímače teploty a jeden plášťový termočlánek, viz obr. 26. Tento dvojitý PT je velmi důležitý z hlediska zkoumání vlivu emisivity povrchu PT na naměřené teploty. Deska PT na fotografii vpravo je lesklá – nízká hodnota emisivity (nový PT) a deska PT vlevo je matná (opakovaně používaný při zkouškách) – vyšší hodnota emisivity ( $\epsilon \sim 0,8$ ) tak, aby byly hodnoty emisivity povrchu co nejrozdílnější.



Obr. 27: Umístění dvojitého PT a TC ve středu pece.



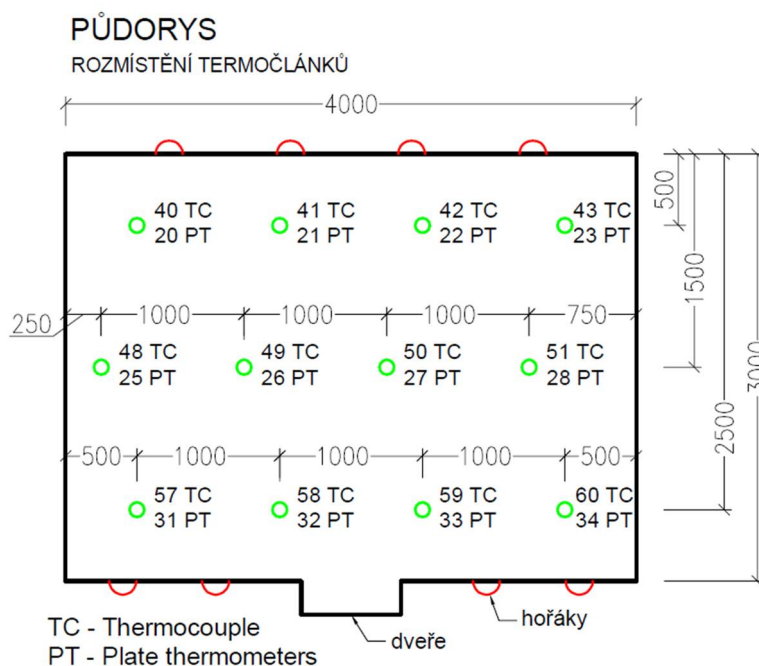
V následujících tabulkách (tab. 4, tab. 5) je uveden souhrn použitých termočlánků včetně číselného označení dle požární zkušebny PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí, toto značení je následně použito i v CFD modelu pece. Pro přehlednost je níže zobrazen půdorys pece s rozmístěním termočlánků v úrovni 100 mm, 750 mm a 1250 mm pod stropem včetně jejich číselného označení, viz obr. 28 a obr. 29.

Tab. 4: Deskové snímače teploty (PT)

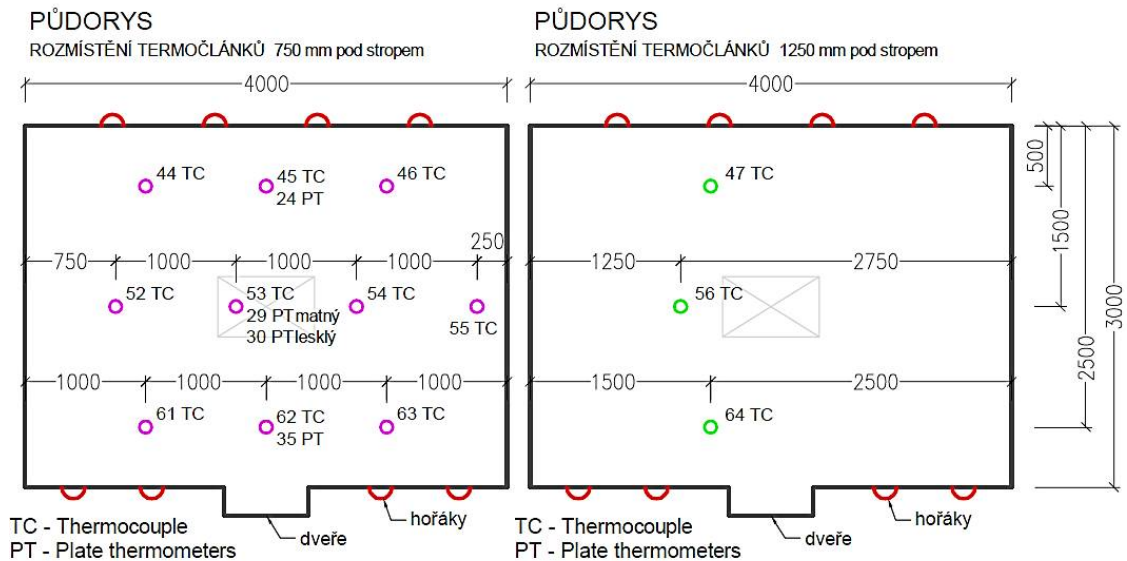
Orientace    s	Žíhaný / lesklý	Hloubka (mm)	Měřicí místo v řezu			Celkem (PT)
			A1 - A1'	C - C'	A2 - A2'	
podlahou	žíhaný	100	20-23	25-28	31-34	16
podlahou	žíhaný	750	24	29	35	
podlahou	lesklý	750		30		

Tab. 5: Plášťové termoelektrické články  $\varnothing$  2 mm (TC)

Hloubka (mm)	Měřicí místo v řezu			Celkem (TC)
	A1 - A1'	C - C'	A2 - A2'	
100	40-43	48-51	57-60	25
750	44-46	52-55	61-63	
1250	47	56	64	



Obr. 28: Půdorys pece – číselné označení termočlánků umístěných 100 mm pod stropem.



Obr. 29: Půdorys pece – číselné označení termočlánků umístěných 750 a 1250 mm pod stropem.

### 3.3 Průběh experimentu

Dne 29.7.2016 proběhly dvě zkoušky ve vodorovné zkušební peci H2 v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Obě tyto zkoušky trvaly 30 minut a teplota v peci byla zvyšována dle níže popsaných scénářů.

Při první zkoušce byla teplota v peci zvyšována dle normové teplotní křivky (ISO 834), viz rovnice (19), podle níž se musí teplota v peci řídit při běžných zkouškách požární odolnosti konstrukcí. První scénář tedy simuloval nejběžnější způsob provádění požárních zkoušek předepsaný normou ČSN EN 1363-1 článek 5.1.2. Odchyly [4], kdy se odchyly teploty plynu měřené 100 mm pod stropem musí pro zkoušky ve vodorovné peci pohybovat v rozmezí  $\pm 100$  °C od průběhu křivky ISO 834, viz graf 2.

Druhá zkouška byla spuštěna po vychladnutí pece na  $\sim 100$  °C a teplota nebyla navyšována dle žádného předpisu. Hořáky byly nastaveny na konstantní výkon 30 %, což odpovídá výkonu 88 kW z maximálně možných 264 kW. Tento scénář byl zvolen kvůli nastavení hořáků v CFD modelu, kdy je možné díky konstantnímu výkonu snadněji nastavit správnou velikost sálavých ploch, tak aby teplota v modelu odpovídala teplotám v peci při tomto experimentu.

### 3.4 Výsledky experimentu

#### 3.4.1 Normová teplotní křivka - Normové požadavky

Pro ověření správného průběhu zkoušky je rozhodující průměrná teplota 100 mm pod stropem počítaná z hodnot naměřených řídicími deskovými snímači teploty (PT). Hodnoty naměřených teplot při první zkoušce s průběhem teplot plynu podle normové teplotní křivky jsou uvedené v tab. 6. Průměrná teplota je monitorována a řízena tak, aby sledovala vztah rovnice (19),

naměřená průměrná teplota je v grafu 3 znázorněna žlutou barvou, černou barvou je vyznačen průběh dle normových požadavků.

Procentní odchylka ( $d_e$ ) v ploše křivky průměrné teploty, z plochy normové teplotní křivky musí být dle normy ČSN EN 1363-1 v rozmezí 15% pro čas  $5 < t \leq 10$  minut a v rozmezí  $(15-0,5*(t-10))$  % pro čas  $10 < t \leq 30$  minut,

kde

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} * 100 \quad (20)$$

kde je

$d_e$  procentní odchylka;

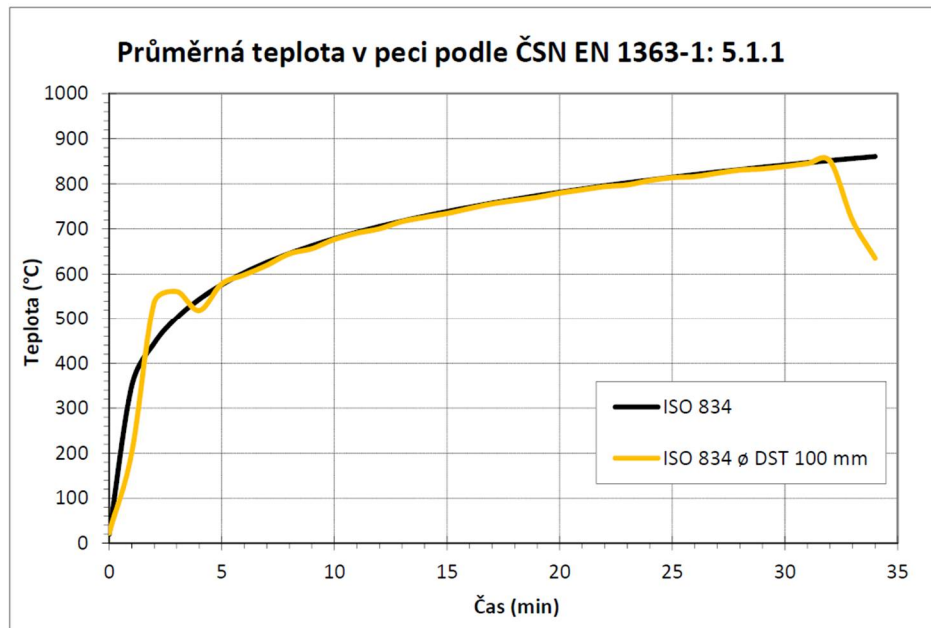
$A$  plocha pod skutečnou teplotní křivkou v peci;

$A_s$  plocha pod normovou teplotní křivkou [4].

Tab. 6: Souhrn teplot v peci naměřených PT 100 mm pod stropem při průběhu teplot dle ISO 834

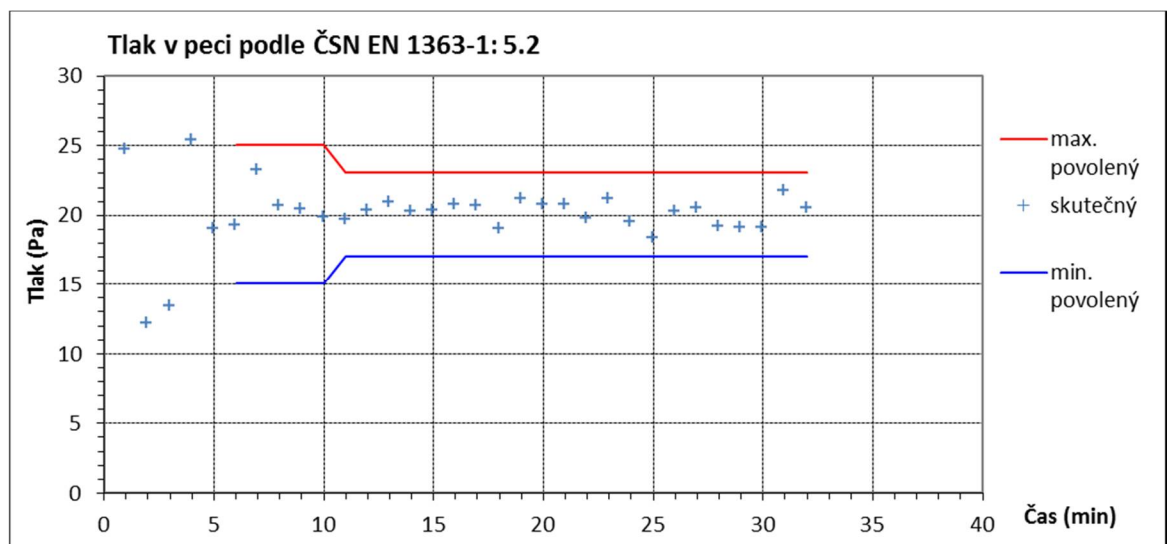
Podmínky zkoušky podle ČSN EN 1363-1: 5 (zkouška 1)

Čas $t$ (min)	Teplota v peci - PT 100 mm pod stropem vybraný pro řízení pece číslo														Odchylka $d_e$			Odchylka od $T$	
	ISO 834 $T$ (°C)	20 (°C)	21 (°C)	22 (°C)	23 (°C)	25 (°C)	26 (°C)	27 (°C)	28 (°C)	31 (°C)	32 (°C)	33 (°C)	34 (°C)	prům. $\bar{\varnothing}$ (°C)	od (%)	do (%)	skutečná (%)	min (°C)	max (°C)
0	20	22	22	22	22	22	22	22	22	23	23	25	23	23					
1	349	184	175	175	164	151	232	213	199	217	242	272	182	201			-39,6		
5	576	564	563	589	588	544	571	600	589	567	590	593	580	578	-15,0	15,0	-1,0		
6	603	579	582	609	614	566	586	615	611	589	609	613	602	598	-15,0	15,0	-0,8		
10	678	675	657	687	699	656	659	679	689	665	687	689	674	677	-15,0	15,0	-0,8	-22	21
11	693	690	671	701	715	673	675	692	701	677	698	702	690	690	-14,5	14,5	-0,7	-21	23
15	739	729	707	735	746	713	723	741	737	729	750	756	745	734	-12,5	12,5	-0,6	-32	17
20	781	777	753	782	793	760	769	785	781	771	791	798	789	779	-10,0	10,0	-0,5	-28	17
25	815	813	790	816	827	798	805	817	815	807	825	830	820	814	-7,5	7,5	-0,5	-25	15
30	842	840	814	840	850	825	831	843	838	832	849	853	843	838	-5,0	5,0	-0,5	-28	11
31	847	849	822	847	856	832	840	848	842	840	855	857	848	845	-4,9	4,9	-0,5	-24	11
32	851	855	827	852	863	839	845	854	848	847	860	862	852	850	-4,8	4,8	-0,4	-24	11



Graf 3: Srovnání průběhu ISO 834 s průběhem průměrné teploty v peci H2 100 mm pod stropem

Sledovaný tlak v peci je dán rozdílem tlaku v peci a okolního tlaku (normální atmosférický tlak  $\sim 101\,325$  Pa) na stejné výškové úrovni, tj. výšce nad podlahou pece. Normou ČSN EN 1363-1 článkem 5.2.2.3 *Vodorovné dělicí prvky* je stanovena neutrální tlaková rovina 100 mm pod spodní stranou zkoušeného dělicího prvku, kde musí být udržován tlak 20 Pa. Po prvních 5 min od počátku zkoušky musí být tlak v peci dle článku 5.2.1 *Tlak v peci* v toleranci  $\pm 5$  Pa, po 10 min je tolerance zpřísněna na  $\pm 3$  Pa. Při experimentu byla tato kritéria splněna, viz graf 4.

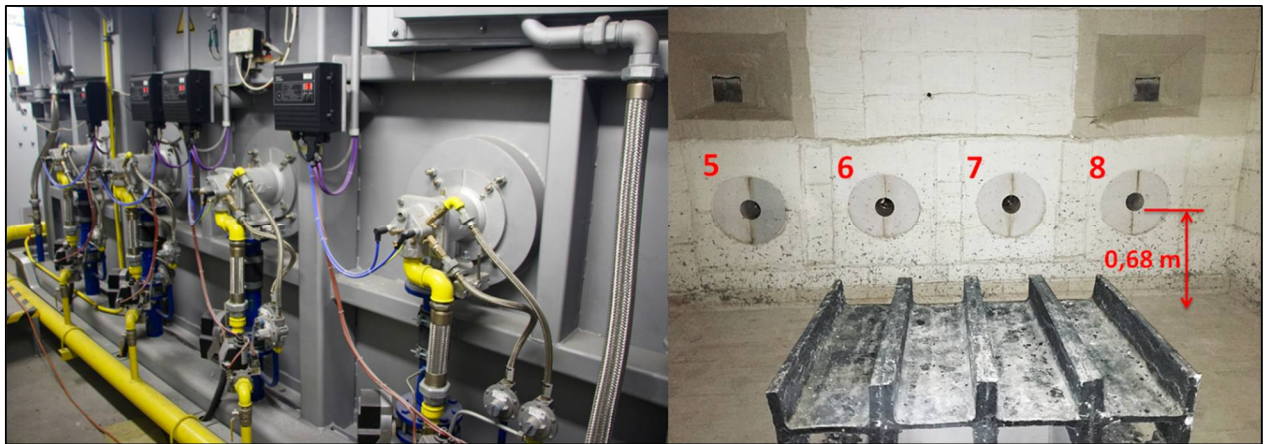


Graf 4: Tlak v peci H2 100 mm pod spodním okrajem stropní konstrukce

Z průběhů výše uvedených grafů (graf 3, graf 4) teploty a tlaku v peci jasně vyplývá, že při zkoušce nebyly překročeny normou požadované odchylky. **Zkoušku tedy lze považovat za úspěšnou a vhodnou pro následnou validaci CFD modelu, zároveň jsou naměřené výkony hořáků použity pro nastavení hořáků v CFD modelu.**

### 3.4.2 Výkony hořáků v peci

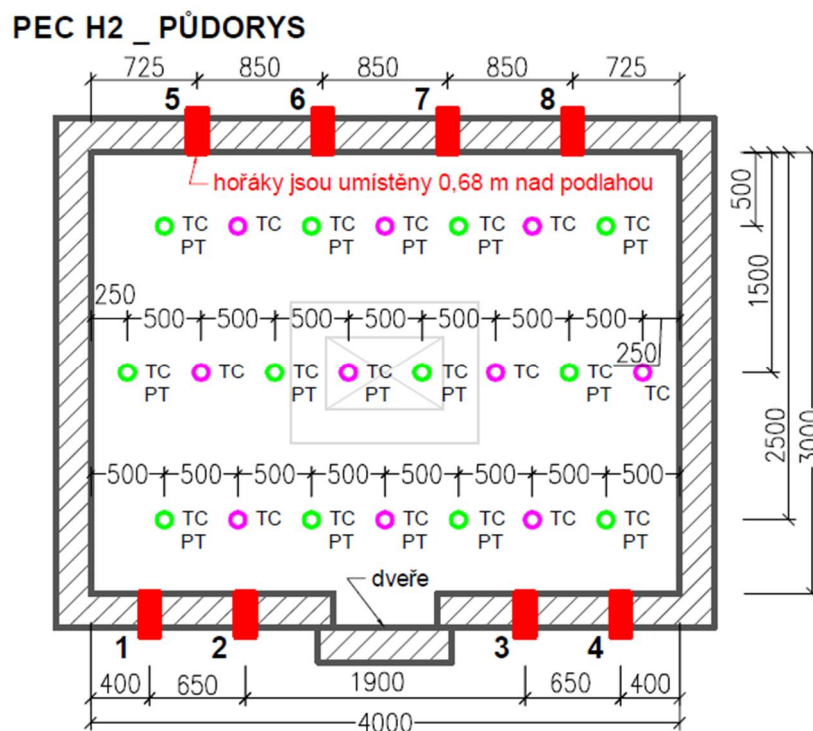
System připojení hořáků k vodorovné peci je vidět na obr. 30, žluté potrubí rozvádí směs plynu se vzduchem k jednotlivým hořákům, které jsou umístěny 0,68 m nad vnitřní úrovní podlahy pece. Rozmístění včetně číslování jednotlivých hořáků je znázorněno na obr. 31.



a) pohled zvenku

b) pohled zevnitř

Obr. 30: Zapojení plynových hořáků k peci H2



Obr. 31: Rozmístění a označení hořáků ve vodorovné peci H2

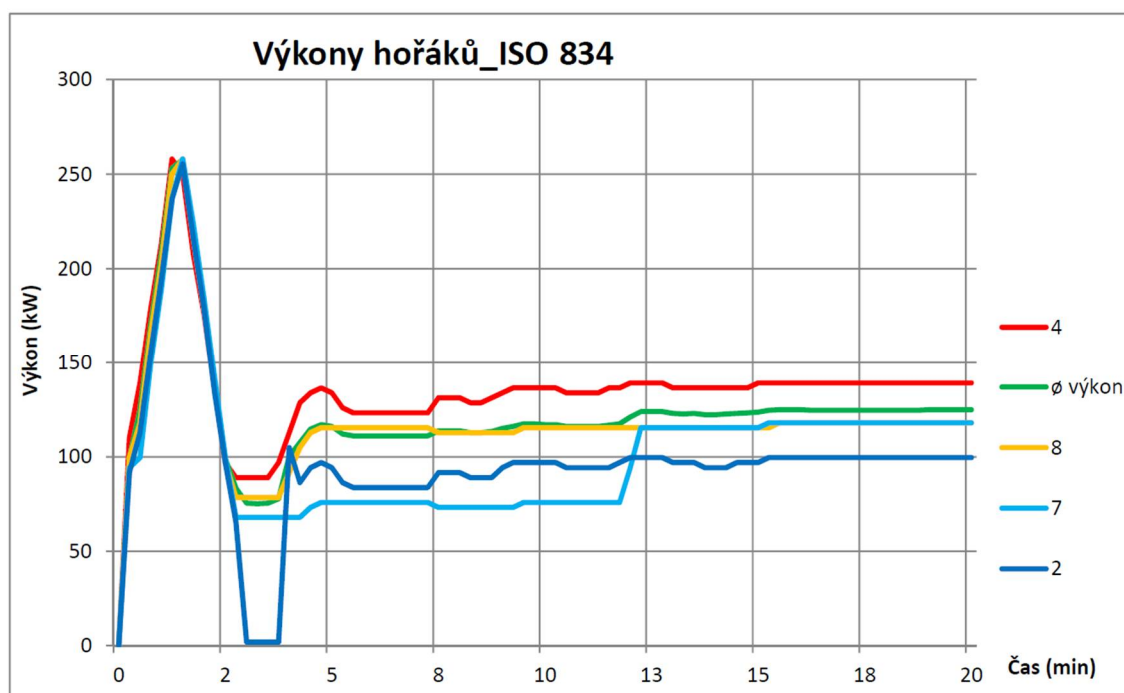
Vybrané výkony hořáků zajišťující průběh teploty dle ISO 834 je zobrazen v grafu 5. Červenou barvou je označen hořák číslo 4, na kterém je zaznamenán nejvyšší průměrný výkon 137 kW, a také nejvyšší množství celkem uvolněného tepla 263 MJ, viz tab. 7. Naopak, nejnižší průměrný výkon 99 kW a nejmenší množství uvolněného tepla 189 MJ je na hořáku číslo 2,



kteřý je v grafu 5 označen tmavě modrou barvou. Zároveň je na hořáku 2 zaznamenána nejvyšší výchylka a to 253 kW, což je o 71 kW víc než je průměrná hodnota výchylky, kdy rozdíl mezi maximálním a minimálním průměrným výkonem činí 182 kW, viz tab. 7. Vysoká hodnota výchylky svědčí o značné nestabilitě výkonu hořáku 2, což potvrzuje průběh výkonu v grafu 5, kdy je vidět, že ve 3. min došlo téměř k vypnutí hořáku a výkon klesl na 2 kW. Dále hořák číslo 7 (světle modrá barva) vykazuje do cca 13. min nižší výkon než hořák 2, ale po 13. min výkon vzroste na 115 kW a jeho průběh je od této chvíle, stejně jako výkony ostatních hořáků, konstantní až do konce zkoušky. Zelenou barvou je v grafu 5 označen průměrný výkon počítaný ze všech osmi hořáků, který se pohybuje v rozmezí 75 - 124 kW, viz tab. 7. Z grafu a tabulky lze také vyčíst, že průběh výkonu hořáku 8 je téměř shodný s průměrným výkonem. Nejvyššího výkonu 266 kW dosáhl hořák 3, což je o 8 kW více než průměrné maximum 258 kW, viz tab. 7.

Tab. 7: Přehled výkonů hořáků pro průběh teploty dle ISO 834

HOŘÁKY	1	2	3	4	5	6	7	8	∅
VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	kW
průměrný	137	99	136	137	123	130	109	119	124
minymální	89	2	86	89	92	92	68	78	75
maximální	263	255	266	258	258	261	258	258	258
výchylka výkonu	174	253	180	169	166	169	190	180	182
Celkové uvolněné teplo (MJ)	262	189	260	263	237	249	208	229	237



Graf 5: Výkon hořáků pro průběh teploty dle ISO 834

Prudký nárůst výkonu hořáků v prvních 2 min je způsoben potřebou sledování prudkého nárůstu teploty v prvních minutách křivky ISO 834, hořáky během tohoto času dosahují výkonu nad 250 kW. Následně je výkon prudce snížen na hodnotu kolem 100 kW a po cca 13. min se výkony všech hořáků ustálí na hodnotách od 100 kW do 139 kW.

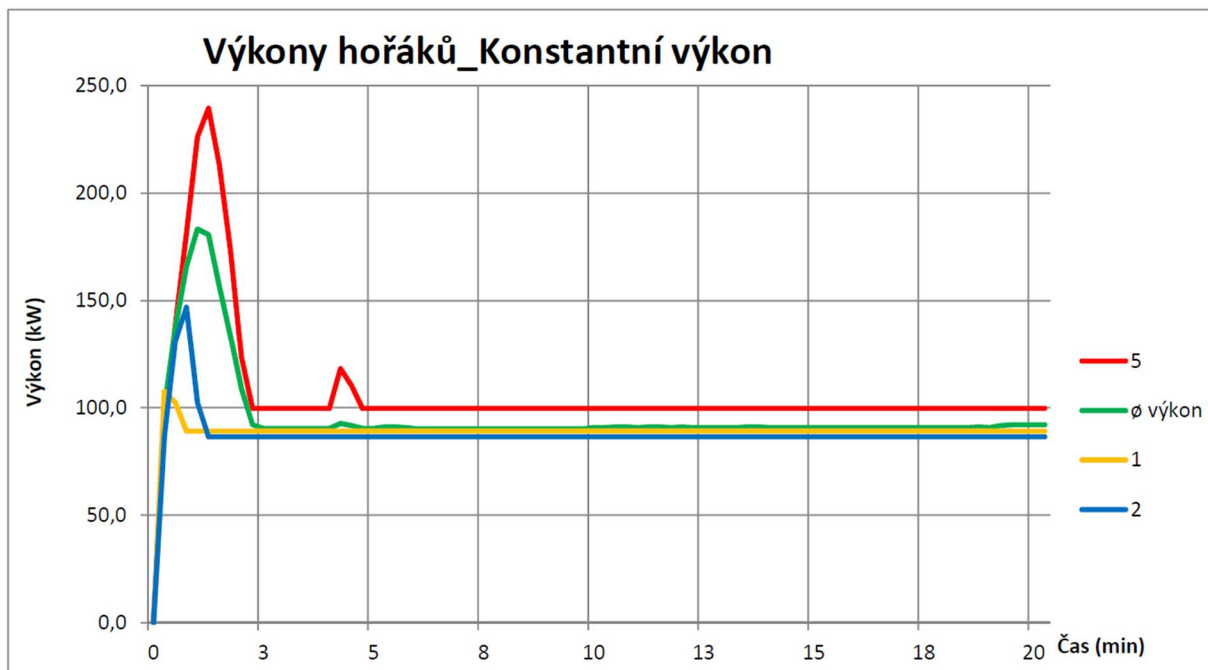
U hořáku číslo 2 dochází ve 3. min k prudkému poklesu a dostává se téměř na nulový výkon. Jak již bylo řečeno dříve, výkony hořáků jsou řízeny podle 12 deskových snímačů teploty (PT) umístěných 100 mm pod stropem. Každý hořák je tedy ovládán dvojicí nebo jedním PT. Na příkladu hořáku 2 je nejzřetelnější tento systém řízení, kdy je možné nezávisle upravovat výkony jednotlivých hořáků a dokonce je úplně vypnout. K velkým výkyvům výkonů dochází zejména v prvních minutách, kdy jsou podmínky v peci nejméně stabilní v důsledku potřeby prudkého nárůstu teplot v krátkém časovém úseku 5 min.

Vybrané výkony hořáků zaznamenané při druhé zkoušce, kdy nebyl průběh experimentu řízen teplotou, ale nastavením konstantního výkonu na 88 kW, tedy 30% z maximálního výkonu, je zobrazen na grafu 6.

Červenou barvou je označen hořák číslo 5, na kterém je zaznamenán nejvyšší průměrný výkon 104 kW, a také nejvyšší množství celkem uvolněného tepla 236 MJ viz tab. 8. Naopak, nejnižší průměrný výkon 86 kW a nejmenší množství uvolněného tepla 196 MJ je na hořáku číslo 2, v grafu označen tmavě modrou barvou. Hořák číslo 1 (žlutá barva) vykazuje nejstabilnější průběh, odchylka od ustálení výkonu na 89 kW po 5. min činí pouze 18 kW viz tab. 8. V 1. min zkoušky dosáhne výkon hořáku 1 oproti ostatním pouze 108 kW, následně se výkon sníží a ustálí až do konce zkoušky na hodnotě 89 kW. Z tab. 8 můžeme dále vyčíst, že hořák 6 vykazuje nejvyšší rozdíl ve výkonu a to 153 kW, který také dosahuje v prvních 3 min nejvyššího výkonu a to 245 kW. Dále je v grafu 6 zelenou barvou označen průměrný výkon počítaný ze všech 8 hořáků, který se pohybuje v rozmezí 90 - 183 kW, viz tab. 8. V tomto případě byl průběhu průměrného výkonu nejbližší hořák číslo 3.

Tab. 8: Přehled výkonů hořáků při nastavení Konstantního výkonu

HOŘÁKY	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	kW
průměrný	89	86	93	95	104	97	94	93	94
minymální	89	84	86	89	89	92	89	89	90
maximální	108	147	195	213	240	245	237	237	183
výchylka výkonu	18	63	108	124	150	153	148	148	94
Celkové uvolněné teplo (MJ)	203	196	211	215	236	220	213	212	213

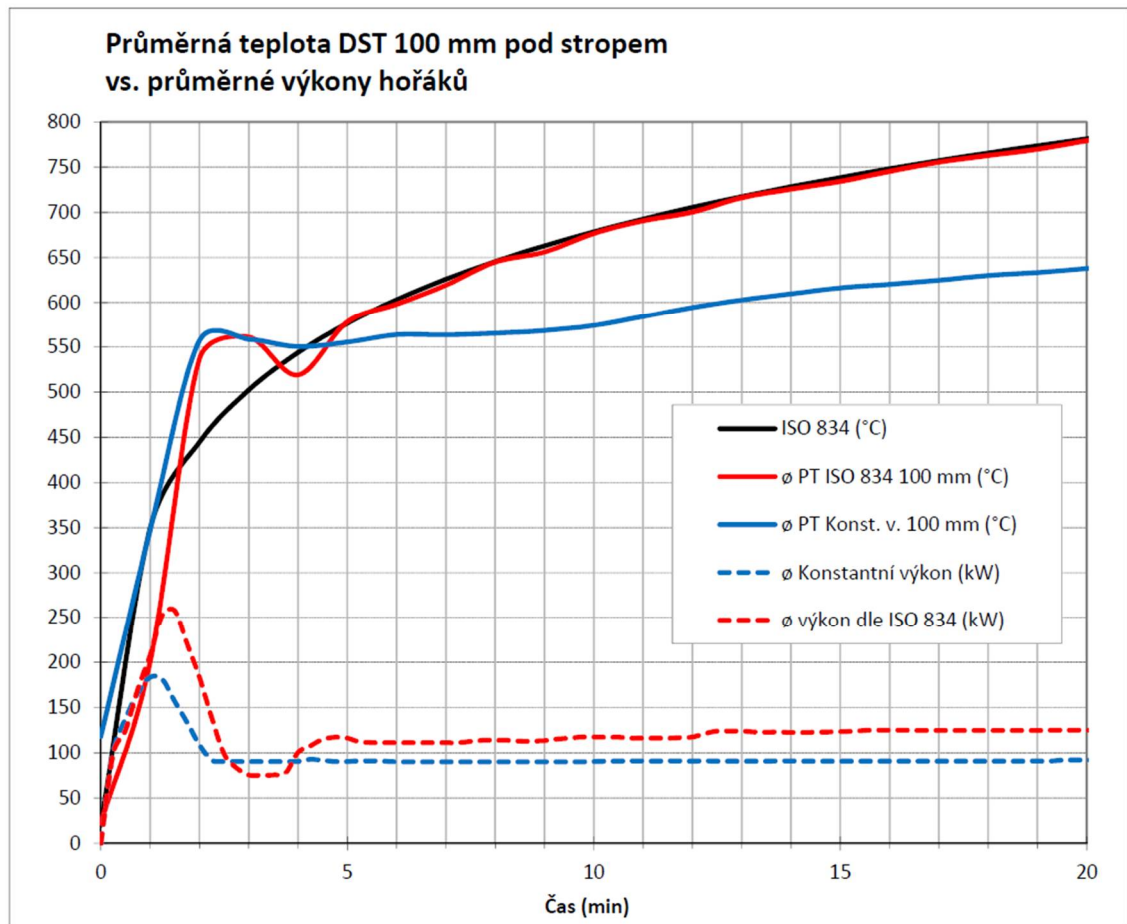


Graf 6: Výkon hořáků při nastavení Konstantního výkonu

Teplota v peci je přímo závislá na výkonu hořáků, proto tvar teplotních křivek v peci sleduje s určitým časovým zpožděním tvar křivek znázorňujících průběh výkonů hořáků, viz graf 7. Na tomto grafu je znázorněn průběh průměrné teploty 100 mm pod stropem naměřený 12ti řídicí deskovými snímači teploty (PT). Červenou křivkou je vykreslen průběh teploty ( $^{\circ}\text{C}$ ) při první zkoušce (navyšování teploty dle normové teplotní křivky) a červenou přerušovanou křivkou je znázorněn průběh výkonů (kW) při této zkoušce. Pro srovnání s normou je v grafu zakreslena černou barvou teplota dle normové teplotní křivky. Tmavě modrou je pak vyznačen průběh teploty ( $^{\circ}\text{C}$ ) při druhé zkoušce s konstantním výkonem hořáků (kW), který je v grafu zaznamenán modrou přerušovanou křivkou.

Uvnitř pece dochází zpočátku k prudkému nárůstu teploty a tlaku, automaticky je spuštěn frekvenční ventilátor udržující přetlak pod stropem na 20 Pa, viz graf 4. Ustálení podmínek v peci trvá cca 10 až 15 min, na tento fakt pamatuje i norma, která v prvních 5 min zkoušky nepředepisuje žádné odchylky pro tlak, až mezi 5. a 10. min je stanovena mezní odchylka  $\pm 5$  Pa. Toto kritérium je následně zpřísněno na  $\pm 3$  Pa až po 10. min, kdy dochází k úplnému ustálení podmínek v peci.





Graf 7: Srovnání průběhu křivek průměrné teploty měřené DST 100 mm pod stropem a průměrného výkonu hořáků.

Jak již bylo řečeno výše, v grafu 7 lze jasně vidět, že průběh teplot s určitým časovým zpožděním opisuje průběh výkonů hořáků. Na průběhu křivek z první zkoušky dle normové teplotní křivky je vidět, že se průměrný výkon (v grafu vyznačen červenou přerušovanou křivkou) v 1,5 min vyšplhá na maximální hodnotu 258 kW, průměrná teplota (v grafu vyznačena červeně) dosáhne svého maxima 561 °C až po třech minutách. Teplota následně klesá do 4. min na hodnotu 519 °C, od 4. min pak stabilně narůstá a od 5. min téměř přesně kopíruje průběh normové teplotní křivky. Zatímco průměrný výkon hořáků se ve 3. min, kdy je teplota na maximum, dostává na své minimum 75 kW, v dalších 2 min vzrůstá na hodnotu okolo 116 kW a od 5. min je výkon téměř konstantní až do konce zkoušky, stejně tak je konstantní i mírný nárůst teploty. Časové zpoždění teploty opisující vývoj výkonů hořáků je tedy v prvních 5 min rovno 1,5 min.

Při druhé zkoušce (v grafu tmavě a světle modré křivky) byla pec vychladlá na teplotu cca 100 °C a výkon byl nastaven na konstantních 88 kW. Průměrný výkon dosáhl maxima 183 kW již po 1. minutě zkoušky a na minimum 90 kW, pak klesl za další 1,5 min, tedy za 2,5 min od zahájení zkoušky. Zatímco průměrná teplota pod stropem dosáhla maxima 560 °C až po prvních 3 min, tedy se zpožděním 2 min od chvíle, kdy maxima dosáhl výkon. Následně teplota mírně klesá na hodnotu 550 °C ve 4. min. Od 4. min teplota pozvolna stoupá ve sklonu jen o málo menším, než ve kterém stoupá teplota při první zkoušce.

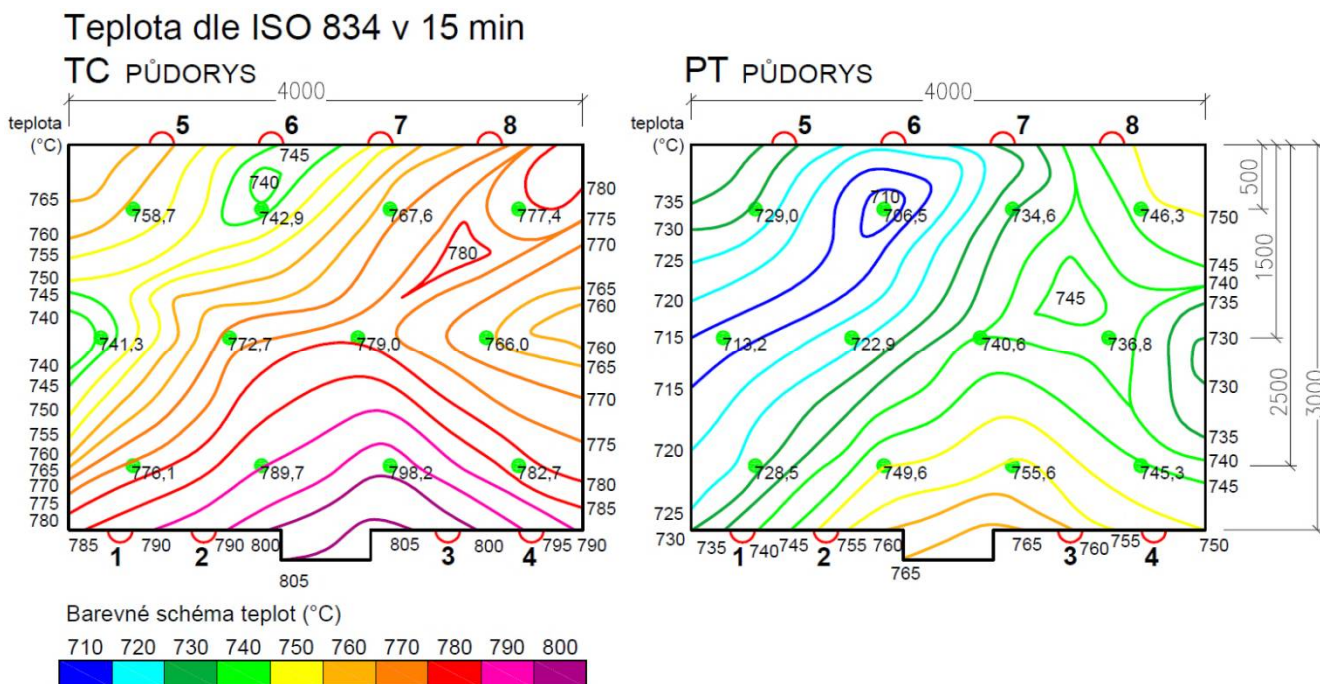
Lze usoudit, že po 5. min není teplota ovlivňována výkonem hořáků, ten je totiž konstantní. Zvyšování teploty je tedy s nejvyšší pravděpodobností ovlivňováno frekvenčním ventilátorem, který odvádí určitou část tepla z pece a udržuje tlak pod stropem okolo 20 Pa. Dále lze předpokládat, že samotná konstrukce pece (vnitřní povrch obložený izolantem) je uzpůsobena k tomu, aby se podmínky v peci po zahřátí vnitřního prostoru na určitou teplotu stabilizovaly a aby při konstantním výkonu hořáků teplota dál mírně narůstala dle ISO 834. Tato teorie se potvrzuje při druhé zkoušce, kdy není nastavena žádná požadovaná teplota a podmínky v peci jsou ovlivněny pouze konstantním výkonem hořáků a frekvenčním ventilátorem udržujícím přetlak 20 Pa pod stropem. Jak je vidět v grafu 7 průměrná teplota v peci (modrá křivka) je při 2. zkoušce o cca 150 °C nižší než při 1. zkoušce, tato teplota po ustálení podmínek (cca od 5. min zkoušky) opět plynule narůstá, přesto že výkony hořáků jsou konstantní.

Hořáky vykazují v prvních 3 min prudký nárůst výkonu až na 245 kW a následné snížení na požadovaný konstantní výkon 88 kW (30%), který je od 3. min stabilní až do konce zkoušky. Při nastavení hořáků na konstantní výkon, pozorujeme tedy stejné počáteční nestability jako v případě nastavení pro teplotu dle křivky ISO 834, kdy jsme prudký nárůst výkonu v počátku zkoušky přisuzovali potřebě prudkého nárůstu teploty. Při druhé zkoušce, kdy nejsou výkony hořáků závislé na naměřených teplotách, se ukazuje, že tato výchylka není zcela závislá na požadované teplotě v peci, ale že je z části způsobena také uvedením hořáků do provozu a tedy závisí na systému vytápění a konstrukci pece. Můžeme tedy předpokládat, že i hořáky samotné mají v prvních 3 min od spuštění jistou nestabilitu a chvíli trvá, než se jejich výkon ustálí na nastavených hodnotách. Lze tedy předpokládat, že tato nestabilita se bude lišit podle konstrukce a typu hořáků. Stejně tak se bude lišit maximální a minimální hodnota výkonů hořáků a také čas, za který se hořáky a podmínky v peci ustálí. Nastavení hořáků pro každý typ pece je tedy nutné konzultovat s dodavatelem pece. V případě zkoušek provedených v rámci této práce byla funkčnost hořáků konzultována se zaměstnanci PAVUS a.s., kteří byli informováni dodavatelem pece.

### 3.4.3 Rozložení teplot v peci

Tato kapitola je zaměřena na rozdílné teploty naměřené v průběhu zkoušek deskovými snímači teploty (PT) a plášťovými termočlánky (TC).

#### 3.4.3.1 Normová teplotní křivka – teploty pod stropem pece



Obr. 32: Teplotní mapa – teploty naměřené v 15. minutě, 100 mm pod stropem TC a PT při průběhu zkoušky dle ISO 834

Na obr. 32 je znázorněna pomocí izoterm<sup>2</sup> teplotní mapa vykreslující rozložení teplot 100 mm pod stropem naměřených v 15. min při scénáři dle křivky ISO 834, jejíž hodnota v 15. min dosahuje 739 °C. Zelenými body jsou označena místa, kde byly umístěny TC a PT včetně naměřených hodnot v 15. min. Izotermy protínají místa, kde byla naměřena v 15. min stejná teplota, zvolený krok mezi izotermami je 5 °C. Na první pohled je jasně patrné, že teploty naměřené pomocí PT jsou nižší než teploty naměřené na TC. Půdorysné rozložení maximálních a minimálních teplot je ale téměř shodné pro oba typy měřidel.

Z tab. 9, kde jsou vypsány průměrné, maximální a minimální teploty naměřené PT a TC 100 mm pod stropem, lze vyčíst, že nejnižší průměrnou teplotu naměřil PT\_21 a to 669,1 °C, ve stejném místě naměřil TC\_41 723,4 °C. V případě plášťových termočlánků byla nejnižší průměrná teplota naměřena na TC\_48 a to 714,1 °C. Z důvodu porovnávání teplot mezi PT a TC, jsou vybrány teploty ve stejném místě, viz obr. 33. Nejvyšší průměrnou teplotu 763,8 °C naměřil TC\_59, ve stejném místě naměřil také nejvyšší teplotu PT\_33 a to 709,4 °C viz tab. 9. Rozdíl

<sup>2</sup> Izotermy jsou druhem liniových mapových značek. Jedná se o čáry spojující místa se stejnou teplotou vzduchu, nemohou se křížit a jejich vzdálenosti jsou nepřímo úměrné gradientu, s nímž teplota vzrůstá či klesá.

mezi maximálními a minimálními teplotami je tedy pro PT = 709,4 - 669,1 = **40,3 °C** a TC = 723,4 - 663,8 = **40,4 °C**.

Vzhledem k vysokým teplotám a proudění horkých plynů uvnitř pece poukazuje relativně malý rozdíl mezi teplotami v měřících místech a průměrnou teplotou: TC -27,3 až +22,4 = 49,7 °C a PT -21,7 až +18,6 = 40,3 °C, rovnoměrné rozložení teploty po půdorysu pece. Což je vidět i na obr. 32, kde jsou rozdíly mezi nechladnějšími a nejteplejšími místy pro TC = 798,2-741,3 = 56,9 °C a pro PT = 755,6-706,5 = 49,1 °C.

Tab. 9: Přehled teplot naměřených pomocí PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834

TERMOČLÁNKY	20 PT	21 PT	22 PT	23 PT	25 PT	26 PT	27 PT	28 PT	31 PT	32 PT	33 PT	34 PT	Ø PT
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ø průměrná	686,8	669,1	693,5	702,3	670,4	681,8	696,7	694,1	685,1	704,6	709,4	695,8	690,8
maximální	854,9	827,3	851,5	862,8	838,5	845,2	853,7	848,3	846,7	860,3	862,0	852,4	850,3
minimální	21,8	21,6	21,8	21,9	22,2	22,4	22,4	22,2	23,4	23,2	24,8	22,8	22,5
rozdíl od ø teploty	-4,0	-21,7	2,7	11,5	-20,4	-9,0	5,9	3,3	-5,7	13,8	18,6	5,0	/
teplota v 15.min	729,0	706,5	734,6	746,3	713,2	722,9	740,6	736,8	728,5	749,6	755,6	745,3	734,1

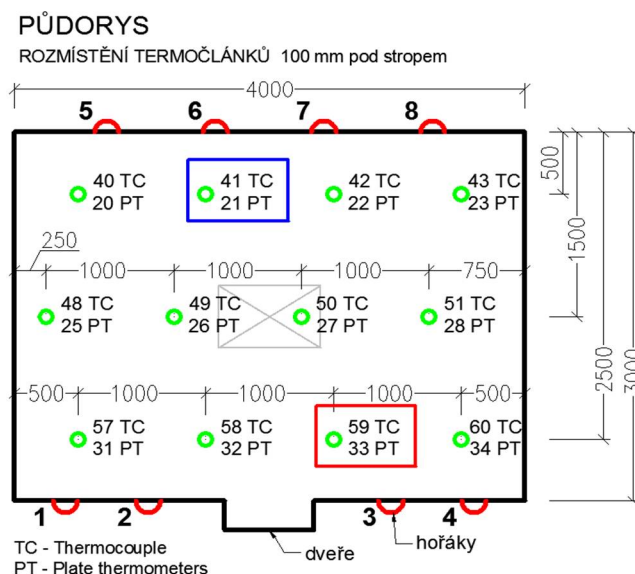
  

TERMOČLÁNKY	40 TC	41 TC	42 TC	43 TC	48 TC	49 TC	50 TC	51 TC	57 TC	58 TC	59 TC	60 TC	Ø TC
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ø průměrná	730,7	723,4	740,4	747,9	714,1	737,7	747,0	740,8	743,9	759,0	763,8	748,2	741,4
maximální	876,9	866,5	868,6	883,2	859,0	878,3	877,8	870,0	878,8	888,9	891,3	870,7	875,3
minimální	125,9	141,8	133,7	129,0	161,1	191,9	204,6	221,6	244,1	263,9	264,5	240,9	193,6
rozdíl od ø teploty	-10,7	-18,0	-1,0	6,5	-27,3	-3,7	5,5	-0,6	2,5	17,6	22,4	6,8	/
teplota v 15.min	758,7	742,9	767,6	777,4	741,3	772,7	779,0	766,0	776,1	789,7	798,2	782,7	771,0

rozdíl mezi ø PT a TC	43,934	54,314	46,916	45,631	43,729	55,9	50,243	46,7	58,811	54,406	54,36	52,397	50,612
-----------------------	--------	--------	--------	--------	--------	------	--------	------	--------	--------	-------	--------	--------

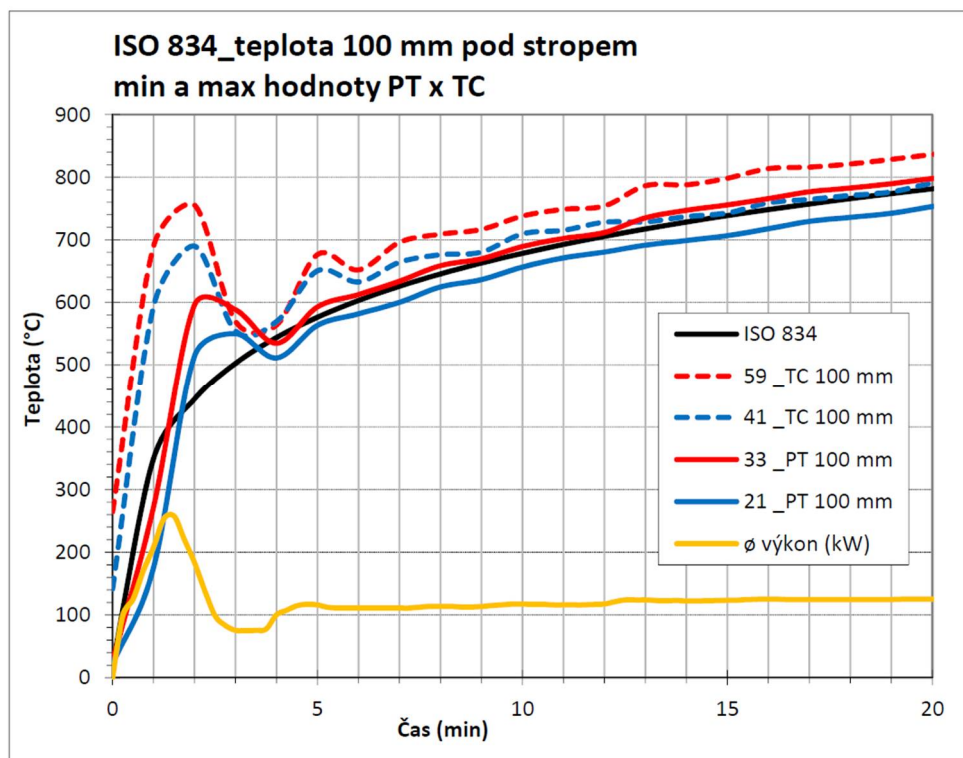
Pro přehlednost je na obr. 33 znázorněn zjednodušený půdorys pece s vyznačením míst, kde a kterými termočláanky jsou naměřeny max. a min. teploty, červený obdélník vyznačuje místo s nejvyšší naměřenou teplotou (33\_PT, 59\_TC) a modrý naopak s nejnižší teplotou (21\_PT, 41\_TC).



Obr. 33: Půdorysné rozmístění TC a PT 100 mm pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník) při 1. zkoušce.



Z tab. 9 lze také vyčíst, že průměrné teploty naměřené PT jsou nižší a to v průměru o 43,7 až 58,8 °C, než teploty měřené pomocí TC. Dále jsou v tabulkách uvedeny teploty v 15. min, která má být podle normové teplotní křivky 739 °C, průměrná teplota PT je 734,1 °C, což je pouze o 5 °C méně než je požadovaná hodnota. Na rozdíl od toho průměrná teplota naměřená TC je 771 °C, takže rozdíl je 39 °C. Tento výraznější rozdíl je jasně patrný i v grafu 8, kde jsou zakresleny maximální naměřené teploty červenými a minimální modrými křivkami, pro porovnání je v grafu znázorněn i průběh ISO 834 (černá křivka). V grafu 8 je jasně vidět, že křivky TC mají mnohem větší spád a vykazují méně stabilní průběh než křivky PT. To je způsobeno konstrukcí samotného měřicího zařízení. Měřicí spoj TC je chráněn pouze tenkým pláštěm, reagují tedy mnohem citlivěji než PT, u nichž je měřicí spoj vložen do kovové desky a zaizolován minerální izolací tl. 10 mm, viz kapitolu 2.3.3. Vysoká citlivost TC, které měří teplotu plynů, je jasně zřetelná také na teplotách naměřených při zahájení zkoušky, kdy okamžitě po zážehu hořáků (čas 0 min) ukazují teploty v rozmezí od 126 °C (TC\_40) do 264,5 °C (TC\_59). Zatímco na PT jsou teploty při spuštění zkoušky na hodnotách okolo 23 °C a teplot okolo 200 °C dosahují až po 1. minutě.

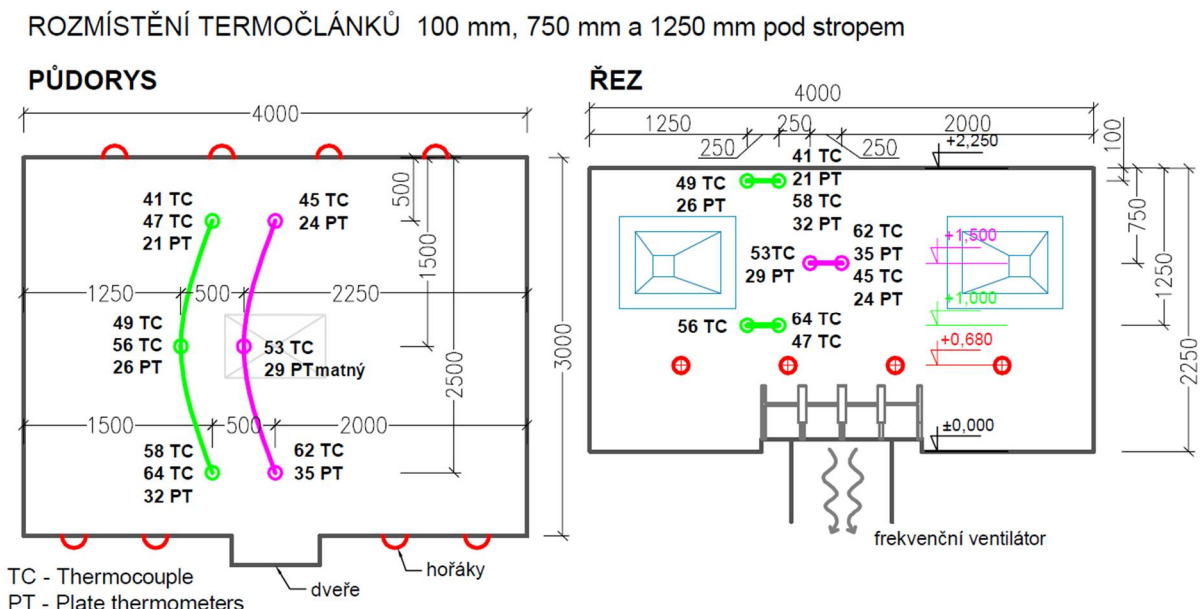


Graf 8: Průběh maximálních a minimálních teplot naměřených PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834

### 3.4.3.2 Normová teplotní křivka - teploty po výšce

Na obr. 34 jsou vyznačeny vybrané termočlánky pro zjištění rozložení teploty po výšce pece. Teplotní průměr je počítán vždy ze tří TC nebo PT v jedné výškové linii, jak je vidět na půdorysu pece. Zelenou barvou jsou spojeny termočlánky umístěné 100 mm a 1250 mm pod stropem a růžová křivka spojuje linii termočlánků 750 mm pod stropem. Jak je vidět v řezu, měřicí linie 100 mm a 1250 mm se nacházejí přímo nad sebou a linie 750 mm je půdorysně

posunuta o 250 mm blíž ke středu pece, výškový rozdíl mezi liniemi je pak okolo 0,5 m. Vybrané měřicí body se nacházejí téměř nad sebou a tvoří tedy řezovou rovinu po výšce pece, v níž je možné adekvátně srovnávat průměrné teploty. Průměr na PT je počítán pouze ve výšce 100 mm a 750 mm, zatímco TC se nacházejí ve všech třech výškových úrovních. Číslování TC a PT opět ctí číslování používané zkušebnou PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí při zkoušce.



Obr. 34: Vybrané TC a PT pro srovnání průměrné teploty po výšce pece 1. zkouška

Z grafu 9 lze vyčíst, že teploty klesají s narůstající vzdáleností od hořáků. To znamená, že nejvyšší teploty jsou naměřeny v nejnižší rovině 1250 mm pod stropem, což je pouze 320 mm nad hořáky. Střední rovina (750 mm pod stropem) je o 0,5 m výše, takže se nachází 820 mm nad hořáky a nejvyšší rovina (100 mm pod stropem) je o dalších 0,65 m výše, takže 1470 mm nad hořáky, viz obr. 34.

V grafu 9 můžeme vidět v prvních 5 min od začátku zkoušky velké teplotní výkyvy. Tato problematika a zdůvodnění vysokých odchylek je podrobněji rozebráno v kapitole 3.4.2. Z důvodu velkých výkyvů teplot v prvních 5 min a následného ustálení průběhu je průměr teplot počítán z hodnot naměřených až od 5. min viz tab. 10.

Nejvyšší teploty TC jsou naměřeny 1250 mm pod stropem, což je 1,0 m nad podlahou, zde jsou teploty průměrně o 51,4 °C vyšší než pod stropem ve výšce 2,15 m. Střední měřicí rovina je 1,5 m nad podlahou (820 mm nad hořáky), kde je teplota průměrně o 33,2 °C nižší než ve spodní rovině, která se nachází o 0,5 m níž a o 18,3 °C vyšší než v horní rovině, která je o 0,65 m výše. Z průběhů teplot na TC v grafu 9 je patrné, že se teplota v celém prostoru pece postupem času vyrovnává a rozdíl po výšce s časem pomalu klesá a křivky se k sobě přibližují, takže můžeme předpokládat, že po delší době (např. 60 min) by byly průběhy teplot shodné. Což potvrzují i hodnoty rozdílů v tab. 10, které jsou s postupem času nižší. Nejvýrazněji je to vidět mezi výškovou úrovní 100 mm a 750 mm pod stropem, kde je rozdíl teplot ve 20 min 13,0 °C a ve 30 min už pouze 7,1 °C.

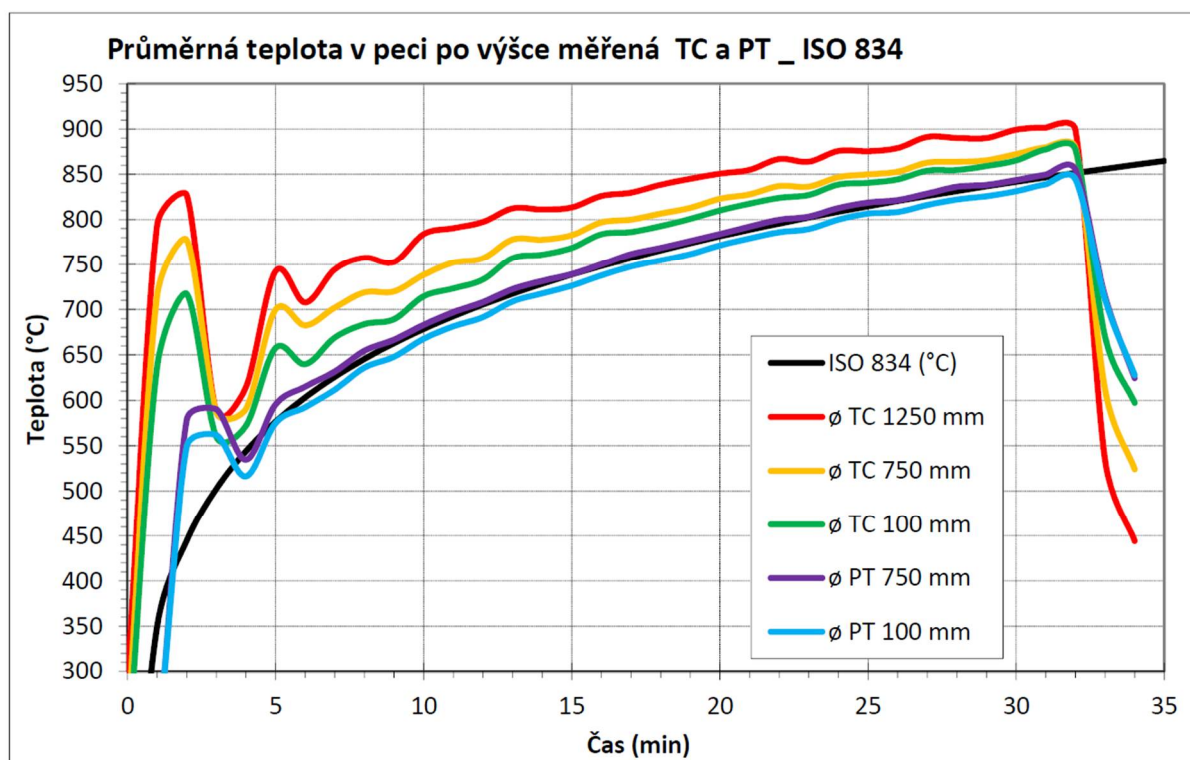
V případě PT jsou teploty v úrovni 1,5 m, tedy ve střední rovině, také vyšší než v horní rovině a to průměrně o 14,3 °C. Můžeme stejně jako u TC pozorovat s časem snižující se rozdíl teplot mezi výškovými úrovněmi, ale tentokrát je pokles mnohem mírnější, není v řádu °C, ale pouze v desetinách stupňů. V tab. 10 je vidět, že je pokles velmi mírný a to od 15. min, kdy je rozdíl mezi naměřenými teplotami pouhých 12,8 °C a ve 30. min rozdíl klesl na 12,4 °C, tedy za 15 minut zkoušky pouze o 0,4 °C. Na rozdíl od TC, kdy je tento rozdíl ve stejném časovém úseku a výškových úrovních 7,1 °C (15. min= 14,2 °C a 30 min = 7,1 °C).

Tab. 10: Přehled rozdílů teplot po výšce naměřených TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834.

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	∅ od 5.min
∅ TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
TC 100 mm	199,2	636,0	<b>717,2</b>	560,0	572,0	657,5	714,5	768,4	810,0	840,6	865,3	---
TC 750 mm	235,1	714,6	<b>777,4</b>	587,5	590,5	699,7	738,3	782,6	823,0	849,9	872,4	---
TC 1250 mm	288,3	793,1	<b>827,3</b>	587,8	614,4	742,1	783,7	813,4	850,7	875,6	899,2	---
rozdíl TC 100x750	35,9	<b>78,6</b>	60,3	27,5	18,5	42,2	23,8	14,2	13,0	9,3	7,1	<b>18,3</b>
rozdíl TC 750x1250	53,3	<b>78,5</b>	49,9	0,3	23,9	42,4	45,4	30,8	27,7	25,7	26,9	<b>33,2</b>
rozdíl TC 100x1250	89,1	<b>157,1</b>	110,1	27,8	42,5	84,7	69,2	45,0	40,7	35,0	33,9	<b>51,4</b>
PT 100 mm	22,4	216,5	548,7	<b>561,8</b>	516,3	574,8	667,6	726,3	771,2	806,6	831,3	---
PT 750 mm	22,3	211,3	578,2	<b>590,1</b>	534,7	595,3	683,1	739,1	783,9	818,8	843,6	---
rozdíl PT 100x750	-0,1	-5,1	<b>29,5</b>	28,4	18,4	20,6	15,4	12,8	12,7	12,2	12,4	<b>14,3</b>

Na TC, kterými je měřena teplota plynů, jsou nejextrémnější hodnoty ve 2. min, kdy teplota v horní rovině dosahuje 717,2 °C, ve střední rovině 777,4 °C a ve spodní rovině (1250 mm pod stropem) až 827,3 °C. V další minutě teploty prudce klesají a to tak, že v horní rovině o -157,2 °C (na 560,0 °C), ve střední o -189,9 °C (na 587,5 °C) a ve spodní o -239,5 °C (na 587,8 °C) viz tab. 10. Na TC ve spodní rovině jsou v teplotách naměřeny nejextrémnější výkyvy, na čemž je vidět, jak citlivě reagují na změnu výkonů hořáků. Zatímco pod stropem se teploty mění až po zahřátí celého prostoru pece, tedy pomaleji než v nižších úrovních, proto zde hodnoty naměřené TC vykazují stabilnější průběh.

Díky vhodné konstrukci PT, které jsou vrstvou izolace chráněny před prudkými výkyvy tepelného toku přenášeného prouděním, jsou nejextrémnější teploty naměřeny až ve 3. min výkyvy jsou mnohem menší, což je vidět na plynulejším průběhu, viz grafu 9. Teplota v horní rovině dosahuje 561,8 °C, ve střední rovině 590,1 °C. V další minutě teploty prudce klesají a to tak, že v horní rovině o -45,5 °C (na 516,3 °C), ve střední o -55,4 °C (na 534,7 °C) viz tab. 10. I v případě PT je vidět vyšší teplotní výkyv v rovině bližší hořákům (750 mm pod stropem), ale zdaleka není tak extrémní jako v případě TC.



Graf 9: Průběh teplot naměřených TC a PT po výšce pece – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834.

Tab. 11: Rozdíl teplot naměřených 100 mm pod stropem při 1. zkoušce a křivky ISO 834

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	ø od 5.min
ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ISO 834	20,0	349,2	444,5	502,3	543,9	576,4	678,4	738,6	781,4	814,6	841,8	---
TC 100 mm	199,2	636,0	717,2	560,0	572,0	657,5	714,5	768,4	810,0	840,6	865,3	---
rozdíl TC od ISO	179,2	286,8	272,7	57,7	28,1	81,1	36,1	29,9	28,6	26,0	23,5	37,5
PT 100 mm	22,4	216,5	548,7	561,8	516,3	574,8	667,6	726,3	771,2	806,6	831,3	---
rozdíl PT od ISO	2,4	-132,7	104,2	59,5	-27,6	-1,6	-10,8	-12,2	-10,1	-8,0	-10,5	-8,9
rozdíl TC x PT	176,8	419,5	168,5	-1,8	55,7	82,7	46,9	42,1	38,8	34,0	34,0	46,4

Neboť byl průběh teplot při této zkoušce řízen podle normové teplotní křivky, je zajímavé srovnání dosažených teplot s jejím průběhem, které je provedeno v horní rovině (100 mm pod stropem), kde je požadován průběh teplot podle této křivky, viz tab. 11.

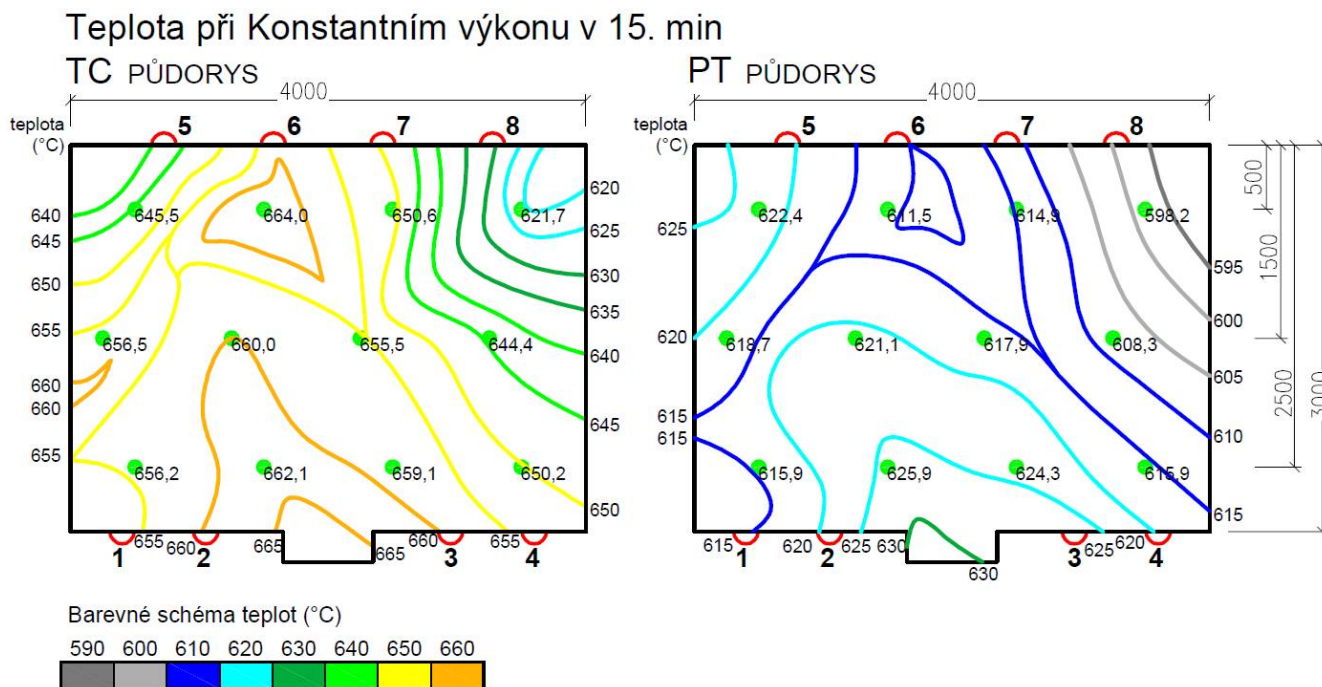
Na průběhu teplot (viz graf 9) je jasně patrné, že teploty naměřené na PT v horní výškové úrovni jsou téměř shodné s teplotami normové teplotní křivky, což je vidět i v tab. 11 na nízkých hodnotách rozdílů, kdy je teplota na PT průměrně od 5. minuty o 8,9 °C nižší. Zatímco v 1. minutě je nižší o 132,7 °C a hned ve 2. min je teplota o 104,2 °C vyšší, jak již bylo řečeno výše, je tato extrémní odchylka způsobena nestabilitou výkonů hořáků v prvních minutách zkoušky.

V případě TC jsou dle očekávání rozdíly oproti normové teplotní křivce vyšší a to v průměru od 5. min o 37,5 °C. Nejvyšší rozdíly jsou opět v začátku zkoušky a to konkrétně 286,8 °C v 1. min. Nejvyšší rozdíl je ovšem nakonec mezi hodnotami naměřenými na TC a PT. Průměrný rozdíl od 5. min je 46,4 °C, od 25. min se dokonce rozdíl ustaluje na 34,0 °C, zatímco v 1. min je 419,5 °C, kdy je nejpatrnější zpoždění měřených teplot, díky konstrukci PT. V tomto



okamžiku je nejlépe patrné, že teplota plynů je již na maximu, zatímco konstrukce (jejíž teplotu měří PT) se ještě nezačala nahřívat.

### 3.4.3.3 Konstantní výkon – teploty pod stropem pece



Obr. 35: Teplotní mapa – teploty naměřené v 15. minutě, 100 mm pod stropem TC a PT při průběhu zkoušky s Konstantním výkonem hořáků

Na obr. 35 je znázorněna pomocí izoterm teplotní mapa vykreslující rozložení teplot 100 mm pod stropem naměřených v 15. min při nastavení hořáků na konstantní výkon. Zelenými body jsou označena místa, kde byly umístěny TC a PT včetně naměřených hodnot v 15. min. Izotermy protínají místa, kde byla naměřena v 15. min stejná teplota, zvolený krok mezi izotermami je 5 °C.

Na první pohled je jasně patrné, že teploty naměřené pomocí PT jsou dle předpokladu nižší než teploty naměřené na TC. Z podobnosti půdorysného rozložení maximálních a minimálních teplot pro TC a PT je možné zjistit, jak vrstva horkých plynů (půdorys TC) ovlivňuje teplotu konstrukce (půdorys PT) nad ní. V případě teplotní mapy tvořené z hodnot na PT jsou jasně patrné větší vzdálenosti izoterm, což svědčí o menším teplotním spádu a tedy rovnoměrnějším rozložení teplot v řezové rovině. Na teplotních mapách tedy vidíme, s jakým zpožděním se zvyšuje teplota konstrukce podle teploty plynů pod ní.

Z tab. 12, kde jsou vypsané průměrné, maximální a minimální teploty naměřené PT a TC 100 mm pod stropem, lze vyčíst, že nejnižší průměrnou teplotu naměřil PT\_23 a to 584,7 °C, ve stejném místě naměřil TC\_43 616,9 °C. Nejvyšší průměrnou teplotu 661,5 °C naměřil TC\_58, ve stejném místě naměřil teplotu PT\_32 a to 609,3 °C, viz tab. 9. V případě PT byla nejvyšší průměrná teplota naměřena na TC\_33 a to 609,9 °C. Z důvodu porovnávání teplot mezi PT a TC jsou vybrány teploty ve stejném místě, viz obr. 36. Rozdíl mezi max. a min. teplotami je tedy pro PT = 609,3 – 584,7 = 24,6 °C a TC = 661,5 – 616,9 = 44,6 °C. Vzhledem k tomu, že druhá

zkouška byla spuštěna při vychladnutí pece na cca 100 °C, byla konstrukce pece již zahřátá a tepelný tok na počátku zkoušky je díky tomu stabilnější (menší rozdíl na PT = 24,6 °C). Zatímco teplota plynů má stejně jako při první zkoušce odchylku okolo 40 °C. Stabilnější průběh teploty na konstrukci stropu je patrný i na obr. 35, kde jsou rozdíly mezi nechladnějšími a nejteplejšími místy pro PT = 625,9-598,2 = 27,7 °C, zatímco pro teplotu plynů TC = 664,0-621,7 = 42,3 °C.

Tab. 12: Přehled teplot naměřených pomocí PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce s Konst. výkonem

TERMOČLÁNKY	20 PT	21 PT	22 PT	23 PT	25 PT	26 PT	27 PT	28 PT	31 PT	32 PT	33 PT	34 PT	Ø PT
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
průměrná	597,2	589,2	596,5	584,7	593,5	600,9	603,1	593,3	597,9	609,3	609,9	598,4	597,8
maximální	682,5	668,8	678,9	667,1	680,0	682,0	683,5	673,5	680,1	689,9	687,6	680,8	679,5
minimální	116,1	116,8	119,8	115,2	113,5	118,1	121,4	120,1	113,7	117,5	121,3	121,7	117,9
rozdíl od ø teploty	-0,6	-8,6	-1,4	-13,1	-4,3	3,0	5,3	-4,5	0,1	11,5	12,1	0,5	/
teplota v 15.min	622,4	611,5	614,9	598,2	618,7	621,1	617,9	608,3	615,9	625,9	624,3	615,9	616,3

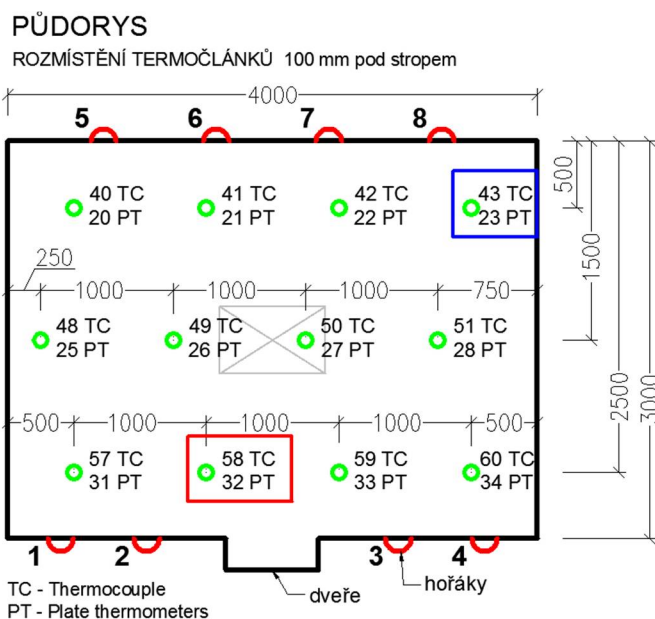
  

TERMOČLÁNKY	40 TC	41 TC	42 TC	43 TC	48 TC	49 TC	50 TC	51 TC	57 TC	58 TC	59 TC	60 TC	Ø TC
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
průměrná	638,3	648,5	638,8	616,9	642,2	653,8	650,0	638,8	651,3	661,5	658,5	648,2	645,6
maximální	703,1	711,0	701,1	687,7	709,6	730,7	739,8	697,4	723,7	744,5	723,3	713,3	706,4
minimální	188,9	204,7	189,3	189,8	214,7	247,4	245,8	262,5	279,7	307,3	298,0	311,7	245,0
rozdíl od ø teploty	-7,2	2,9	-6,8	-28,7	-3,4	8,2	4,5	-6,8	5,8	15,9	13,0	2,6	/
teplota v 15.min	645,5	664,0	650,6	621,7	656,5	660,0	655,5	644,4	656,2	662,1	659,1	650,2	652,2

rozdíl mezi ø PT a TC	41,1	59,3	42,3	32,2	48,7	52,9	46,9	45,5	53,5	52,1	48,7	49,8	47,8
-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Pro přehlednost je na obr. 36 znázorněn zjednodušený půdorys pece s vyznačením míst, kde a kterými termočlánky jsou naměřeny max. a min. teploty, červený obdélník vyznačuje místo s nejvyšší naměřenou teplotou (32\_PT, 58\_TC) a modrý naopak s nejnižší teplotou (23\_PT, 43\_TC).



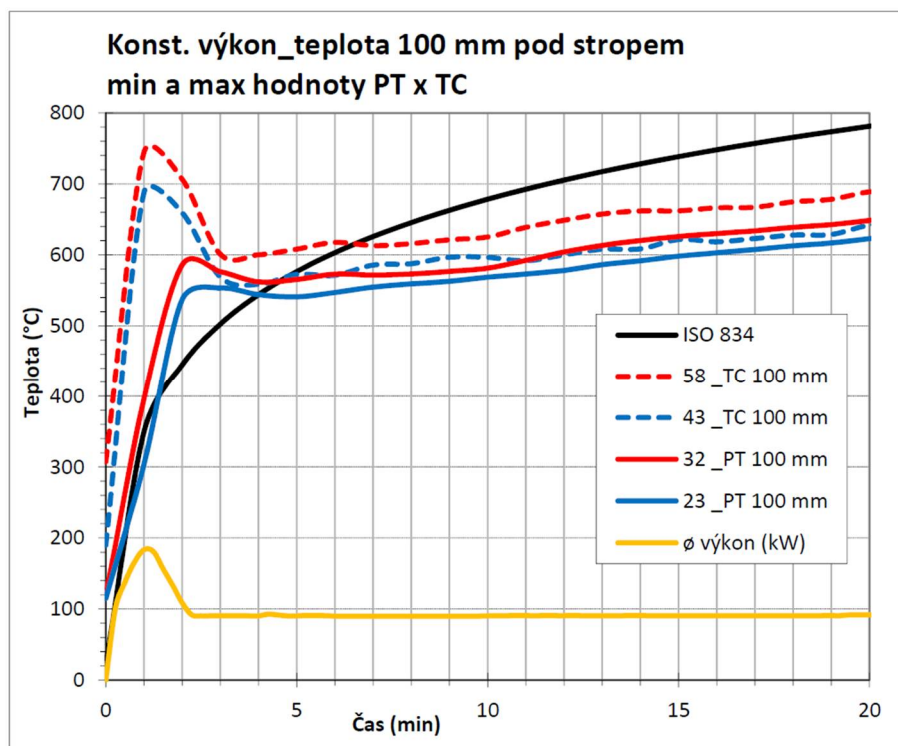
Obr. 36: Půdorysné rozmístění TC a PT 100 mm pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník) při 2. zkoušce.

Z tab. 12 lze také vyčíst, že průměrné teploty naměřené pomocí PT jsou nižší a to v průměru o 32,2 až 59,3 °C, než teploty měřené pomocí TC. Dále jsou v tabulkách uvedeny

teploty v 15. min, která má být 739 °C dle normové teplotní křivky. Průměrná teplota naměřená TC je 652,2 °C, což je o 86,8 °C méně než je hodnota normové teplotní křivky a průměrná teplota PT je 616,3 °C, takže rozdíl je 122,7 °C. To znamená, že při 30% výkonu hořáků není v peci zdaleka dosahováno teplot normové teplotní křivky, což je vidět i na grafu 10, kde jsou zakresleny maximální naměřené teploty červenými a minimální modrými křivkami, pro porovnání je v grafu znázorněn i průběh normové teplotní křivky (černá křivka). V grafu je také vidět, že teploty na TC (přerušované křivky) mají v prvních minutách mnohem větší spád než křivky PT (plné křivky), ve 4. min se, ale teploty vyrovnávají a dál křivky stoupají souběžně. Křivky nejteplejšího místa PT\_32 a nejchladnějšího TC\_43 se od 4. min dokonce překrývají, což je patrné i z nízké hodnoty 7,6 °C rozdílu průměrných teplot PT\_32 = 609,3 °C a TC\_43 = 616,9 °C, viz tab. 12.

Stejně tak jako v grafu 8 jsou i v grafu 10 průběhy křivek PT plynulejší než křivek TC, což je způsobeno konstrukcí samotného měřícího zařízení, jak bylo vysvětleno dříve, viz kapitolu 3.4.3.1.

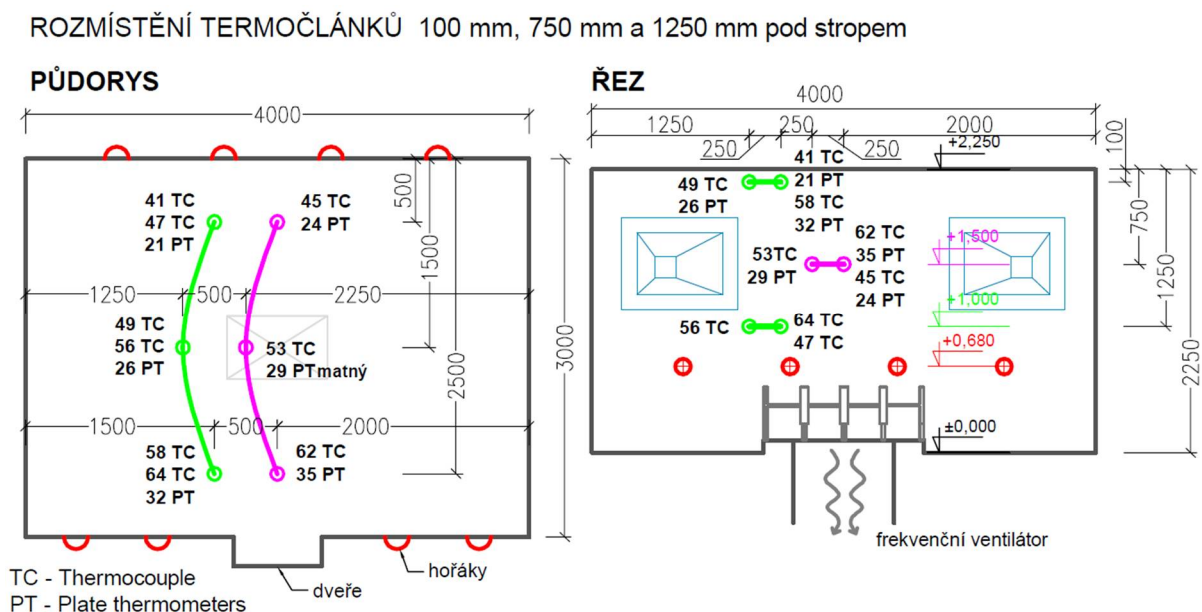
Při spuštění 1. zkoušky je uvnitř pece teplota okolního prostředí tedy okolo 20 °C a rozdíl mezi průměrnými teplotami na PT a TC = 22,5 - 193,6 = **171,1 °C**. Zatímco při zahájení 2. zkoušky je pec vychladlá po 1. zkoušce na teplotu okolo 100 °C a rozdíl mezi průměrnými teplotami na PT a TC = 117,9 - 245,0 = **127,1 °C**. V porovnání s 1. zkouškou je tedy při 2. zkoušce teplota uvnitř pece při zahájení o cca 95 °C vyšší a rozdíl mezi teplotami na PT a TC je o **44 °C** nižší. Lze tedy říct, že má počáteční teplota vliv na citlivost TC, jejichž výsledky měření se s vyšší počáteční teplotou blíží více k výsledkům na PT.



Graf 10: Průběh maximálních a minimálních teplot naměřených PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce s Konstantním výkonem hořáků

### 3.4.3.4 Konstantní výkon - teploty po výšce

Na následujícím obr. 37 jsou vyznačeny vybrané termočlánky pro zjištění rozložení teploty po výšce pece. Teplotní průměr je počítán, stejně jako v kapitole 3.4.3.2, ze tří TC nebo PT v jedné výškové linii, jak je vidět na půdorysu pece. Zelenou barvou jsou spojeny termočlánky umístěné 100 mm a 1250 mm pod stropem a růžová křivka spojuje linii termočláneků 750 mm pod stropem. Jak je vidět v řezu měřící linie 100 mm a 1250 mm se nacházejí přímo nad sebou a linie 750 mm je půdorysně posunuta o 250 mm blíž ke středu pece, výškový rozdíl mezi liniemi je pak okolo 0,5 m. Vybrané měřící body se nacházejí téměř nad sebou a tvoří tedy řezovou rovinu po výšce pece, v níž je možné adekvátně srovnávat průměrné teploty. Průměr na PT je počítán pouze ve výšce 100 mm a 750 mm, zatímco TC se nacházejí ve všech třech výškových úrovních. Číslování TC a PT opět ctí číslování používané zkušebnou PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí při zkoušce.



Obr. 37: Vybrané TC a PT pro srovnání průměrné teploty po výšce pece 2.zkouška.

Z grafu 11 lze vyčíst, že teploty klesají s narůstající vzdáleností od hořáků. To znamená, že nejvyšší teploty jsou naměřeny v nejnižší rovině 1250 mm pod stropem, což je pouze 320 mm nad hořáky. Střední rovina (750 mm pod stropem) je o 0,5 m výše, takže se nachází 820 mm nad hořáky a nejvyšší rovina (100 mm pod stropem) je o dalších 0,65 m výše, takže 1470 mm nad hořáky, viz obr. 34.

V grafu 11 je možné vidět v prvních 4 min od začátku zkoušky velké teplotní výkyvy, tato problematika a zdůvodnění vysokých odchylek je podrobněji rozebráno v kapitole 3.4.2. Z důvodu velkých výkyvů teplot v prvních 5 minutách a následného ustálení průběhu je průměr teplot počítán z hodnot naměřených až od 4. min, viz tab. 13.

Nejvyšší teploty TC jsou naměřeny 1250 mm pod stropem, což je 1,0 m nad podlahou, zde jsou teploty průměrně o 26,1 °C vyšší než pod stropem ve výšce 2,15 m. Střední měřící rovina je



1,5 m nad podlahou (820 mm nad hořáky), kde je teplota průměrně o 4,7 °C nižší než ve spodní rovině, která se nachází o 0,5 m níž a o 21,3 °C vyšší než v horní rovině, která je o 0,65 m výše.

V případě PT jsou teploty v úrovni 1,5 m, tedy ve střední rovině, také vyšší než v horní rovině a to průměrně od 4. minuty o 9,1 °C, ale v prvních 2. minutách jsou teploty v horní úrovni vyšší než ve střední úrovni, která je blíže hořákům a to o 5,7 °C v čase 0 min; o 19,4 °C v 1. min a o 9,6 °C ve 2. min. Důvodem této abnormality v začátku zkoušky může být to, že konstrukce pece byla již zahřátá na teplotu okolo 100 °C, jak je vidět v tab. 13, kdy v čase 0 min průměrná teplota PT v horní úrovni dosahovala 117,2 °C a hodnoty teplot na PT v horní úrovni byly v prvních 2. min, tedy kromě tepla z hořáků, navíc ovlivňovány = zvyšovány rozežhátou konstrukcí stropu. Na rozdíl od PT ve vzdálenosti 750 mm pod stropem, které byly ovlivněny pouze výkonem hořáků. Tento efekt trvá pouze krátkou dobu, protože teplo z hořáků rychle převyší příspěvek tepla z nahřáté konstrukce.

Z velice nízké hodnoty průměrného rozdílu teplot TC mezi úrovní 1250 a 750 mm a z průběhů teplot na TC v grafu 11 je patrné, že ve spodních úrovních je teplota plynů téměř vyrovnaná, ani rozdíl s teplotou v horní úrovni není nijak vysoký. Při 1. zkoušce byly průměrné rozdíly teplot plynů mezi výškovými úrovněmi mnohem vyšší a postupně, jak se pec zahřívala, docházelo k jejich vyrovnání po výšce. V případě 2. zkoušky ale tento jev nenastává, naopak v grafu 11 je vidět, že se rozdíly teplot nesnižují, ale kolísají okolo průměrných hodnot až do konce zkoušky.

Důvodem nestability teplotních rozdílů je složitý systém konstrukce pece, který se navzájem ovlivňuje s výkonem hořáků. Pec je dimenzována na teploty normové teplotní křivky, které jak je vidět v grafu 11, jsou mnohem vyšší než teploty dosažené při konstantním výkonu hořáků 88 kW. Můžeme předpokládat, že prostor pece se tedy nenahřeje natolik, aby se teplota vyrovnala po výšce pece, tak jako v případě 1. zkoušky, kdy se průměrné teploty na TC drží po celou dobu nad křivkou ISO 834 a PT ji téměř kopírují. Zatímco při 2. zkoušce jsou teploty na PT od 4. min a na TC od 7. min výrazně nižší než teploty normové teplotní křivky.

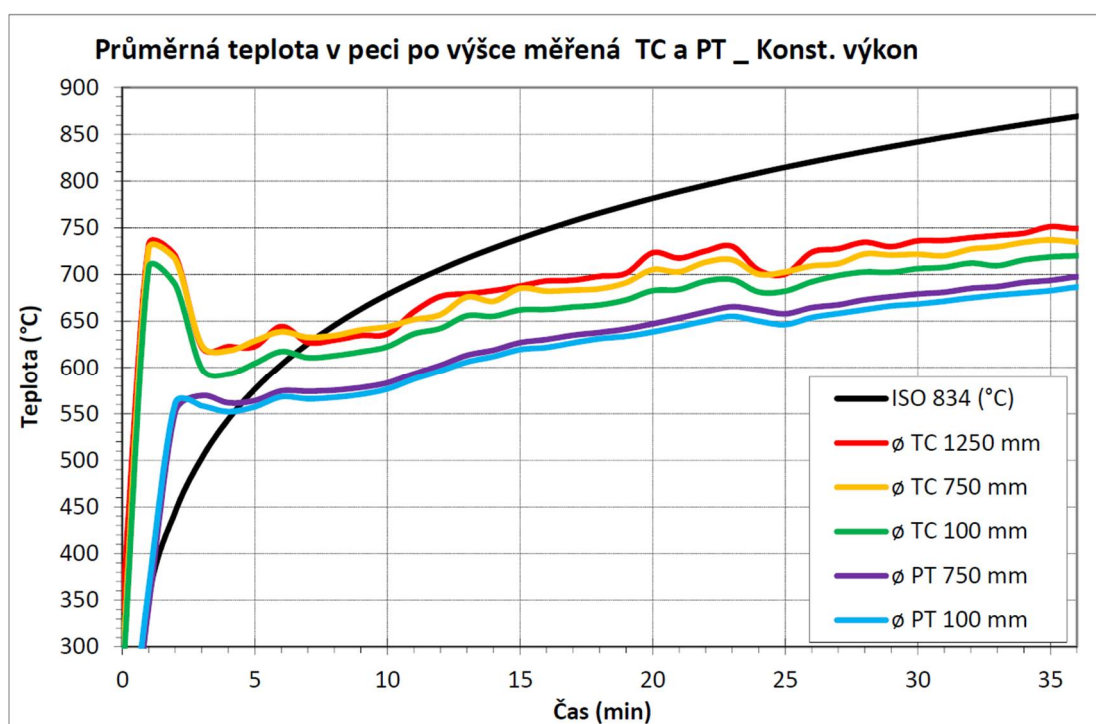
Tab. 13: Přehled rozdílů teplot po výšce naměřených TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce s Konstantním výkonem hořáků.

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	Ø od 4.min
Ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
TC 100 mm	253,1	<b>706,8</b>	689,2	598,9	<b>592,9</b>	604,5	622,6	662,0	682,7	682,2	706,2	718,8	---
TC 750 mm	274,0	<b>727,0</b>	716,3	624,4	<b>618,1</b>	628,9	644,1	685,0	705,2	702,8	721,6	737,0	---
TC 1250 mm	339,6	<b>731,7</b>	720,1	<b>622,3</b>	<b>622,7</b>	622,9	636,4	687,6	723,2	700,4	736,1	751,2	---
rozdíl TC 100x750	20,8	20,2	27,1	25,5	25,2	24,4	21,5	22,9	22,5	20,6	15,4	18,2	<b>21,3</b>
rozdíl TC 750x1250	65,7	4,7	3,8	-2,1	4,6	-6,0	-7,7	2,7	18,0	-2,4	14,5	14,2	<b>4,7</b>
rozdíl TC 100x1250	86,5	24,9	30,9	23,5	29,7	18,4	13,8	25,6	40,5	18,2	29,9	32,4	<b>26,1</b>
PT 100 mm	117,5	362,9	<b>561,4</b>	558,5	<b>552,2</b>	557,4	576,7	619,5	638,4	646,4	668,4	682,7	---
PT 750 mm	111,7	343,6	551,8	<b>569,6</b>	<b>561,8</b>	564,2	583,3	626,9	647,2	657,9	679,1	693,7	---
rozdíl PT 100x750	-5,7	-19,4	-9,6	11,1	9,7	6,7	6,7	7,4	8,8	11,5	10,8	11,1	<b>9,1</b>

Na TC, kterými je měřena teplota plynů, jsou nejextrémnější hodnoty v 1. min, kdy teplota v horní rovině dosahuje 706,8 °C, ve střední rovině 727,0 °C a ve spodní rovině (1250 mm pod stropem) až 731,7 °C. V dalších třech minutách teploty rychle klesají a to tak, že v horní rovině o

-113,9 °C (na 592,9 °C), ve střední o -108,9 °C (na 618,1 °C) a ve spodní o 109,0 °C (na 622,7 °C), viz tab. 13. Průběhy teplot ve spodní a střední úrovni stejně tak jako nejvyšší a nejnižší dosažené teploty se téměř shodují, což je vidět i v grafu 11. V horní úrovni je dosahováno o něco nižších teplot, ale odchylka od střední úrovně je od 4. min do konce zkoušky relativně stabilní, pohybuje se v rozmezí 15,4 – 22,9 °C.

Protože PT simulují teplotu povrchů, kdy nějakou dobu trvá, než se okolní stěny nahřejí, jsou nejextrémnější teploty naměřeny až ve 2. min v úrovni 100 mm pod stropem, kde teplota dosahuje 651,4 °C a ve 3. min ve střední úrovni, kde je 569,6 °C. Výkyvy jsou mnohem menší, což je vidět na plynulejším průběhu křivek, viz graf 11. Do 4. min teploty mírně klesají a to tak, že v horní rovině o -9,2 °C (na 552,2 °C), ve střední o -7,8 °C (na 561,8 °C), viz tab. 13.



Graf 11: Průběh teplot naměřených TC a PT po výšce pece – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce s Konstantním výkonem hořáků

Tab. 14: Rozdíl teplot naměřených 100 mm pod stropem při 2.zkoušce a křivky ISO 834

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	ø od 4.min
ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ISO 834	20,0	349,2	444,5	502,3	543,9	576,4	678,4	738,6	781,4	814,6	841,8	864,8	---
TC 100 mm	253,1	706,8	689,2	598,9	592,9	604,5	622,6	662,0	682,7	682,2	706,2	718,8	---
rozdíl TC od ISO	233,1	357,6	244,7	96,6	49,0	28,1	-55,8	-76,5	-98,7	-132,4	-135,6	-146,0	-71,0
PT 100 mm	117,5	362,9	561,4	558,5	552,2	557,4	576,7	619,5	638,4	646,4	668,4	682,7	---
rozdíl PT od ISO	97,5	13,7	116,9	56,2	8,3	-19,0	-101,8	-119,1	-142,9	-168,2	-173,4	-182,1	-112,3
rozdíl TC x PT	135,7	343,9	127,8	40,4	40,8	47,1	45,9	42,5	44,3	35,8	37,8	36,1	41,3

Jak již bylo řečeno výše, je možné, že nedošlo k vyrovnání teploty po výšce pece, právě díky nízkým hodnotám teplot, kterých je dosaženo při nastavení hořáků na konstantní výkon, a které se po celou dobu pohybují pod hodnotami normové teplotní křivky. Proto je zajímavé srovnání dosažených teplot s jejím průběhem, které je provedeno v horní rovině (100 mm pod

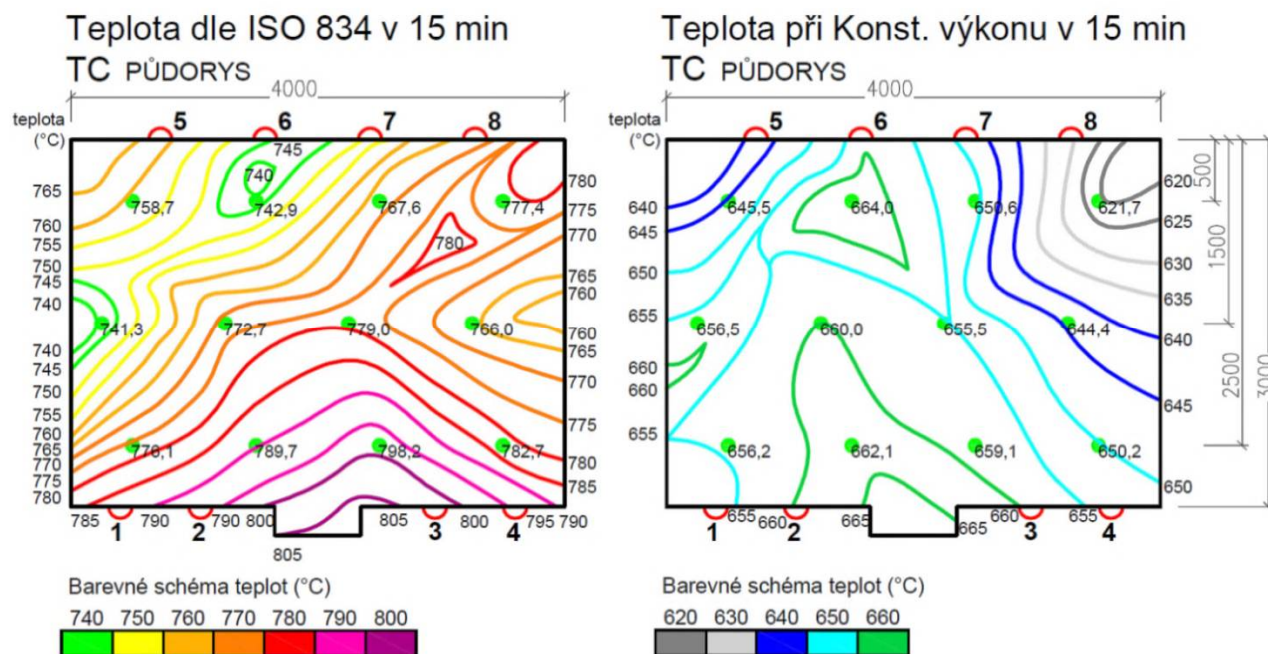
stropem), kde je požadován průběh teplot při běžných zkouškách právě podle ISO 834, viz tab. 14.

Na průběhu teplot (viz graf 11) je jasně patrné, že teploty naměřené na PT v horní výškové úrovni jsou shodné s teplotami ISO 834 pouze v 1. min, což je vidět i v tab. 14 na nízké hodnotě rozdílu 13,7 °C. Teplota na PT strmě vzrůstá až do 2. min na hodnotu 561,4 °C, což je o 116,9 °C více než má ve stejný okamžik ISO 834. V dalších minutách, ale teplota dál nevzrůstá a od 5. min až do konce zkoušky je nižší než ISO 834, ve 35. min dosáhne hodnota rozdílu 182,1 °C.

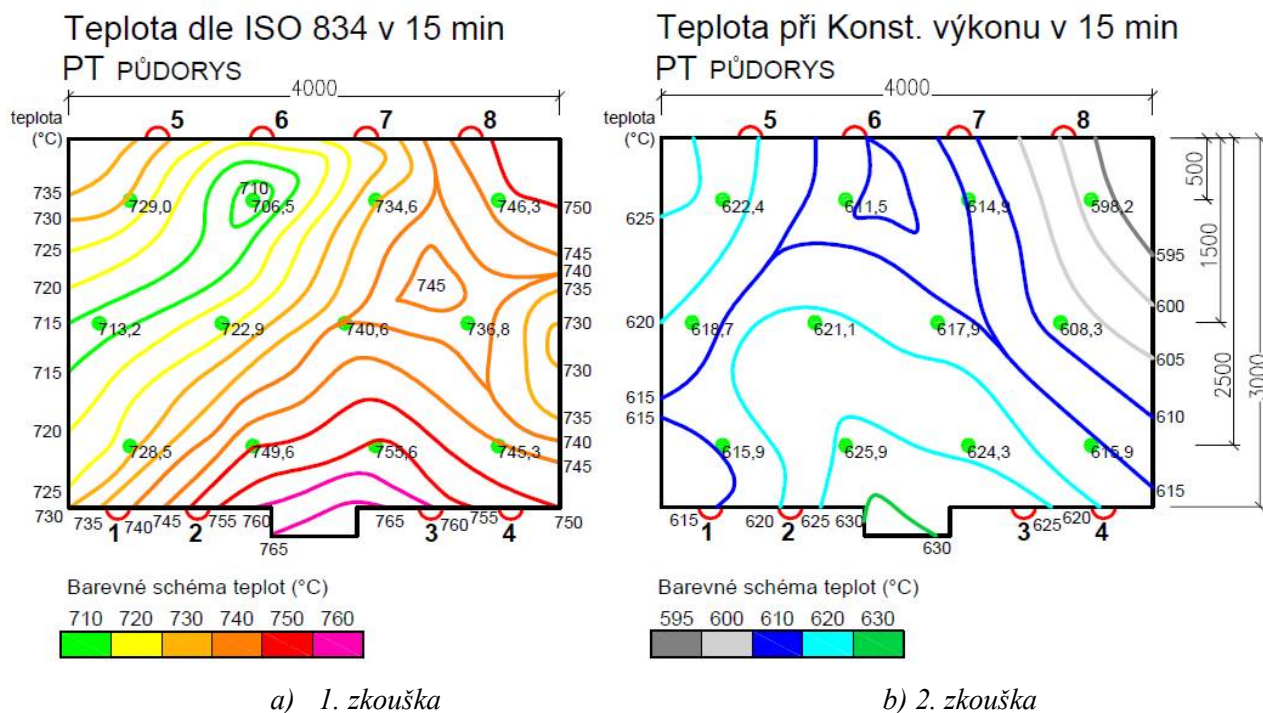
V případě TC jsou naměřené hodnoty do 7. min vyšší než ISO 834, viz graf 11, ale již v 10. min jsou teploty na TC nižší a to o -55,8 °C. Tento rozdíl se zvyšuje až do konce zkoušky a to na -146,0 °C ve 35. min. Zatímco rozdíl mezi TC a PT je maximální v prvních 2. min a to až 343,9 °C v 1. min. Tento extrémní výkyv je způsoben citlivostí TC, které okamžitě reagují na zvyšování teploty po zážehu hořáků, na rozdíl od PT, které dosahují vyšších teplot až v dalších minutách. Od 3. min až do konce zkoušky se rozdíl mezi TC a PT ustálí a pohybuje se okolo průměrné hodnoty 41,3 °C.

### 3.4.3.5 Srovnání

Na teplotních mapách (obr. 38) je jasně vidět, že při 2. zkoušce s konstantním výkonem hořáků byla teplota nižší a rovnoměrněji rozložená než při 1. zkoušce, kdy se teplota zvyšovala dle normové teplotní křivky.







Obr. 38: Teplotní mapa – teploty naměřené v 15. minutě, 100 mm pod stropem TC a PT při průběhu zkoušky dle ISO 834 (1.zkouška) a s konstantním výkonem hořáků (2.zkouška)

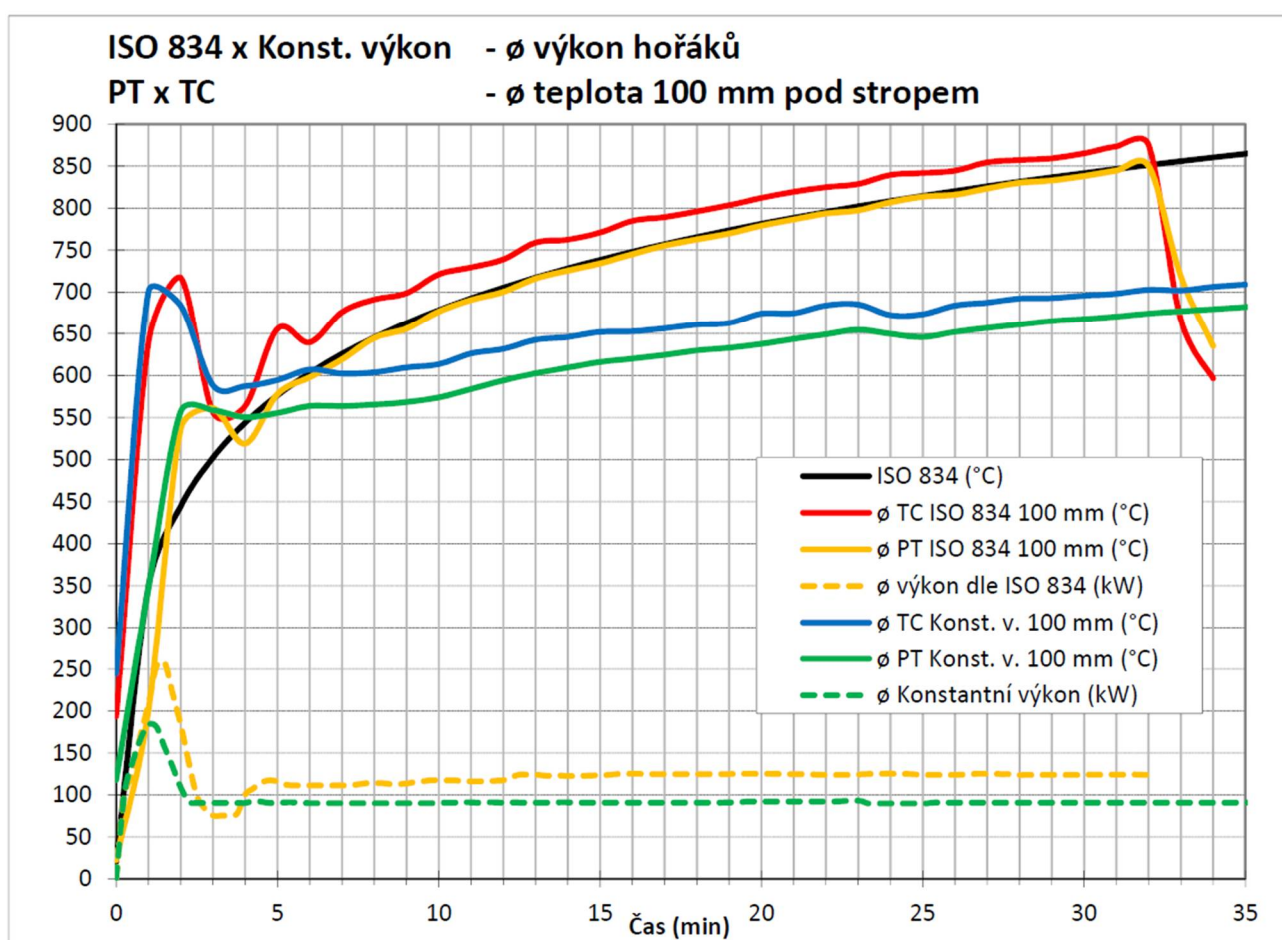
Na obr. 38 jsou zobrazeny teplotní mapy v 15. min. Rovnoměrnější rozložení teplot je možné vyčíst z větších vzdáleností izoterm a z menšího rozptylu naměřených teplot. Při 1. zkoušce byl naměřený rozptyl teplot na TC = 740 až 805 °C = 65 °C a na PT = 710 až 765 °C = 55 °C, zatímco při 2. zkoušce to bylo na TC = 620 až 665 °C = 45 °C a na PT = 595 až 630 °C = 35 °C. Při obou zkouškách je rozdíl mezi rozptylem teplot naměřených na TC a PT = 65-55 (45-35) = 10 °C, větší hodnoty rozptylu na TC poukazují na jejich vysokou citlivost. V případě 1. zkoušky je rozptyl na TC 65 °C, zatímco při druhé pouze 45 °C, což svědčí o rovnoměrnějším rozložení teplot při 2. zkoušce. Dále bylo při první zkoušce dosaženo na TC teplot nad 740 °C při výkonu okolo 120 kW a při 2. zkoušce při výkonu okolo 90 kW teplot na TC nad 620 °C viz tab. 15, což je rozdíl 120 °C na 30 kW výkonu hořáků.

Pokud srovnáme průběh průměrných teplot naměřených 100 mm pod stropem a výkonů hořáků při 1. zkoušce a 2. zkoušce (viz tab. 15), lze jasně vidět, že při 2. zkoušce dosahovaly teploty v peci mnohem nižších hodnot. Přestože byla v peci při začátku 2. zkoušky zhruba o 100 °C vyšší teplota než při začátku první zkoušky. V případě 1. zkoušky došlo k ustálení průměrného výkonu hořáků na hodnotě okolo 120 kW až po 5. min a ve 20. min hodnota ještě stoupla na 125 kW, na rozdíl od toho při druhé zkoušce se výkon ustálil na průměrné hodnotě 90 kW již po 3. min. Rozdíl výkonů při zkouškách je patrný i na úhlu, pod kterým narůstají teploty, viz graf 12, kdy při druhé zkoušce a tedy nižším výkonu stoupají mírněji. Z tabulky můžeme vyčíst, že od 5. min, tedy od ustálení výkonu při první zkoušce, vzrůstá rozdíl mezi teplotami 1. a 2. zkoušky a to až do 30. min na hodnotu TC = 169,6 °C a PT = 170,5 °C. Od 5. min jsou rozdíly na PT a TC přibližně stejné.



Tab. 15: Přehled teplot naměřených TC a PT 100 mm pod stropem při 1.zkoušce a 2.zkoušce

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1.ZK TC 100 mm	193,6	639,7	717,2	556,4	563,8	656,0	721,1	771,0	812,2	841,9	865,3
2.ZK TC 100 mm	245,0	700,4	684,0	588,4	587,4	594,7	613,6	652,2	674,2	673,5	695,8
rozdíl TC	51,4	60,8	-33,2	31,9	23,6	-61,2	-107,5	-118,9	-138,0	-168,3	-169,6
1.ZK PT 100 mm	22,5	200,6	536,7	561,1	519,0	578,1	676,5	734,1	779,1	813,5	838,2
2.ZK PT 100 mm	117,9	347,1	557,0	558,7	550,5	555,5	574,0	616,3	637,9	646,0	667,7
rozdíl PT	95,4	146,5	20,3	-2,5	31,4	-22,6	-102,5	-117,8	-141,3	-167,6	-170,5
Ø VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
1.ZK výkon - ISO 834	0,0	208,2	183,4	75,5	100,2	116,1	117,4	123,3	125,0	123,7	123,7
2.ZK Konst. výkon	0,0	183,4	108,8	90,3	90,3	90,3	90,7	90,7	92,0	89,7	90,7
rozdíl výkonů	0,0	-24,8	-74,6	14,9	-9,9	-25,7	-26,7	-32,7	-33,0	-34,0	-33,0

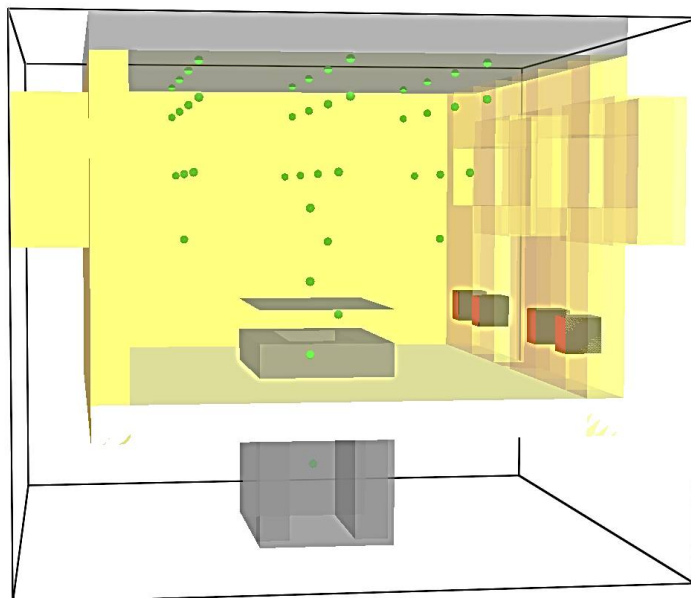


Graf 12: Průběh teplot naměřených TC a PT 100 mm pod stropem při 1.zkoušce – podle ISO 834 a 2.zkoušce – s Konstantním výkonem hořáků

Na grafu 12 je znázorněn průběh průměrných teplot 100 mm pod stropem na TC a PT a průměrné výkony hořáků (čárkované křivky) při obou zkouškách. Z průběhu je jasně patrné, jak křivky teplot v peci kopírují výkon hořáků. Zatímco při 2. zkoušce je výkon hořáků již od 3. min ustálený a teploty také plynule stoupají, dochází při 1. zkoušce ve 3. min k prudkému poklesu výkonu na hodnotu 75,5 kW a teplota na TC tento trend přesně kopíruje, kdy ve 3. min klesá ze 717,2 °C na 556,4 °C, v případě PT je pokles mírnější a dochází k němu až ve 4. min, viz graf 12 žlutá křivka.

## 4 CFD model

Tato kapitola se zabývá modelováním vodorovné zkušební pece H<sub>2</sub> používané v požární zkušebně PAVUS a.s. metodou CFD (Computational Fluid Dynamics) a způsoby měření teploty plynů a konstrukcí v tomto modelu. Model (viz obr. 39) je vytvářen v programu FDS (Fire Dynamics Simulator) verze 6.4.0 vyvinutým v NIST (National Institute of Standards and Technology) [17].



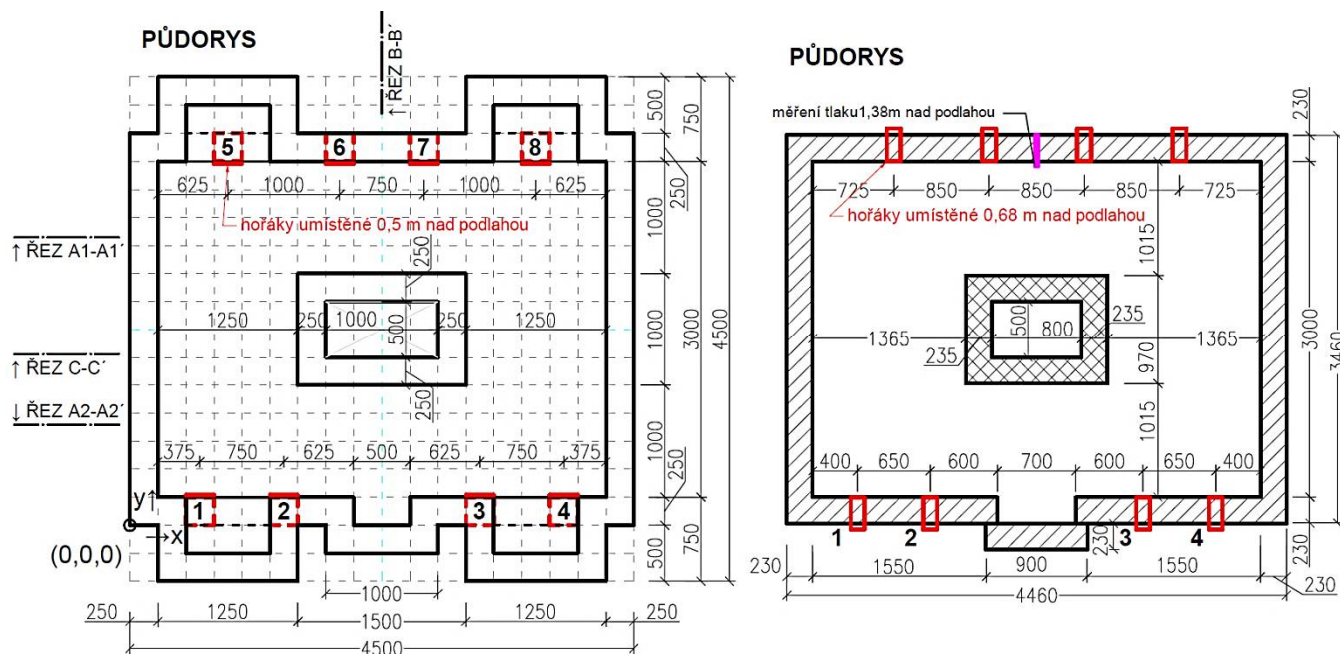
Obr. 39: CFD model vodorovné pece

### 4.1 Popis CFD modelu vodorovné pece

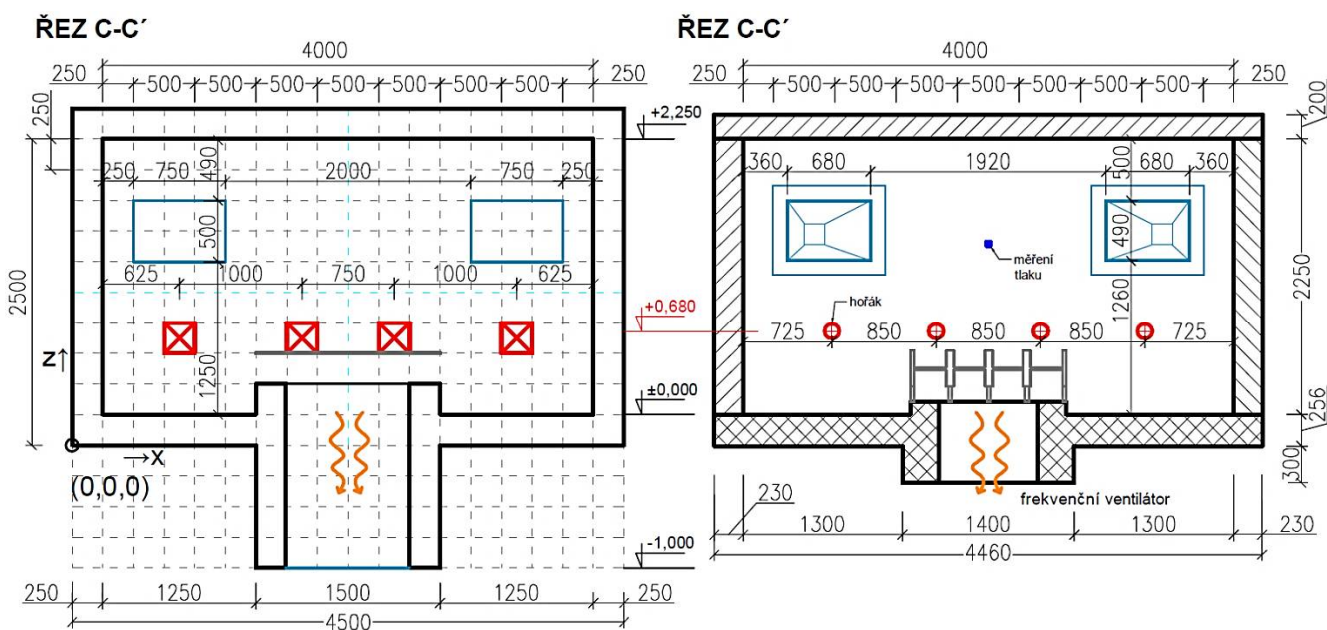
Model pece je vytvořen pomocí zdrojového kódu, viz Příloha 3, výpočet byl proveden v softwaru FDS verze 6.4.0. a pro znázornění vytvořeného modelu pece (viz obr. 39) byl použit program SMV (Smokeview) verze 6.3.6.

Vzhledem ke skutečným rozměrům pece byla zvolena síť modelu 250 x 250 mm, čímž je zajištěna dostačující podobnost mezi skutečnou a virtuální pecí, viz obr. 40; obr. 41 a obr. 43. Pro zjištění teplot v peci je hrubost této sítě dostačující. V případě potřeby simulace těles uvnitř pece, například nosníků, je možné vkládat do prostoru další jemnější síť s hrubostí, která je násobkem sítě původní, například 50 x 50 mm nebo 25 x 25 mm, jejichž hrany budou v případě tokového zjemnění navazovat na hrubší síť pece. Způsobem ovlivní vložené sítě dobu výpočtu a výsledky samotné není, předmětem této studie. Celou síť pece je možné snadno zjemnit na hrubost buněk například 50 x 50 mm, bez nutnosti přepisování zdrojového kódu, pouze postačí znásobit počet dílků na stranách výpočetní oblasti v příkazu MASH. Nicméně takové zjemnění prodlouží několikanásobně dobu výpočtu a v případě prázdné pece dává dostačující přehled o teplotách hrubá síť, proto je v této práci počítáno se sítí 250 x 250 mm. Z důvodu potřeby

prostoru pro umístění ventilátoru odvádějícího spaliny z pece je MESH prodloužen do mínusové úrovně o 1,0 m, viz obr. 41 a obr. 43.

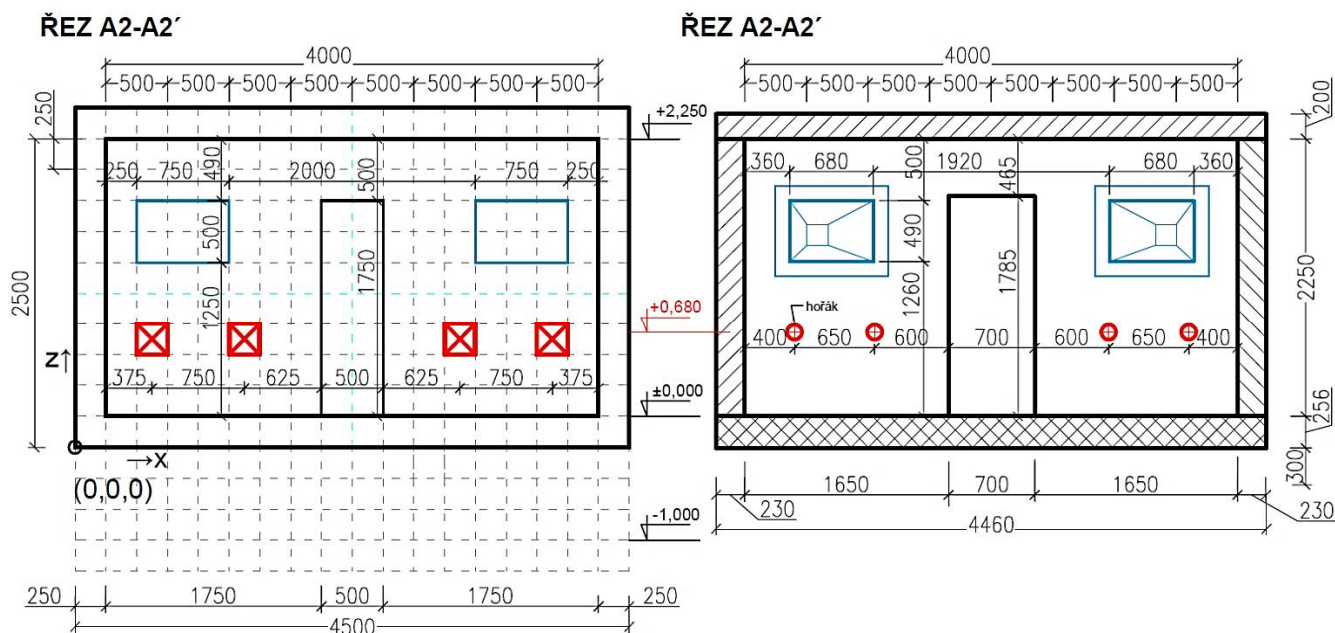


Obr. 40: Rozměrové srovnání virtuální pece s reálnou – Půdorys: síť 250 x 250 mm

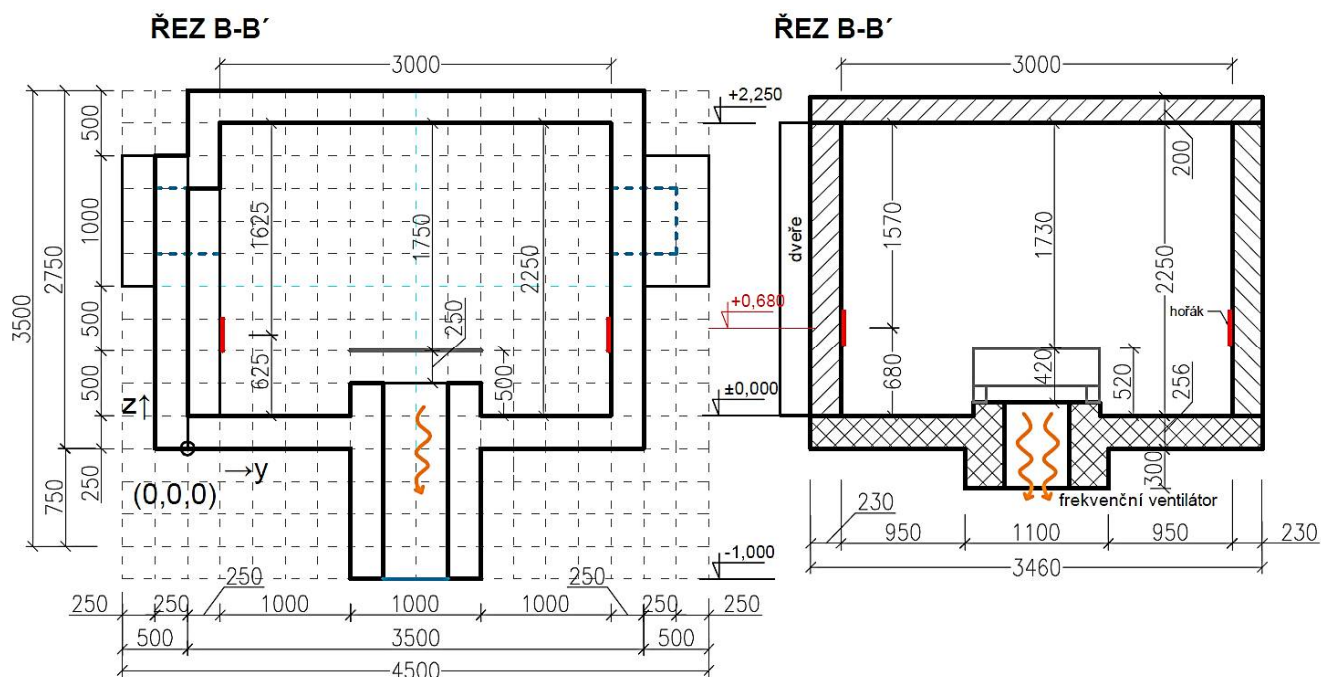


Obr. 41: Rozměrové srovnání virtuální a reálné pece – ŘEZ C-C': síť 250 x 250 mm





Obr. 42: Rozměrové srovnání virtuální a reálné pece – ŘEZ A2-A2': síť 250 x 250 mm



Obr. 43: Rozměrové srovnání virtuální a reálné pece – ŘEZ B-B': síť 250 x 250 mm

Na nákresech pece je možné vidět, že vnitřní rozměry virtuální a reálné pece 3 m x 4 m x 2,25 m se shodují. Hořáky jsou umístěny osově 0,625 m nad podlahou modelu, viz obr. 43, což je pouze o 5,5 cm níže než ve skutečnosti. Stejně tak se půdorysné rozmístění hořáků liší pouze v řádu centimetrů, což lze vidět na obr. 40. Na půdorysu pece je vidět odtahový otvor, který je umístěn ve středu pece. V modelu má vnitřní rozměry 1 m x 0,5 m a v reálné peci pak 0,8 m x 0,5 m, otvor je v reálném případě chráněn svařovanou ocelovou konstrukcí 0,97 m x 1,27 m, kterou v modelu simuluje ocelová deska 1 m x 1,5 m umístěná 250 mm nad otvorem, viz obr. 41. V modelu je dále simulován výklenek (dveří 0,5 m x 1,75 m) a čtyři průzory, viz obr. 42. Průzory mají rozměry 0,75 m x 0,5 m a hloubkou 0,5 m a jsou umístěny

vždy dva na delších stranách pece ve výšce 1,25 m, viz obr. 41. V reálné peci mají rozměry 0,68 m x 0,49 m a hloubku 0,4 m a jsou umístěny 1,26 m nad podlahou. Všechny výše popsané části pece jsou v modelu upraveny z toho důvodu, aby rozměrově odpovídaly buňkám výpočetní sítě.

#### 4.1.1 Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti obvodových konstrukcí jsou převzaty z technických listů výrobců, viz Příloha 2. Pro ověření těchto hodnot budou materiálové vlastnosti vyzdívky pece, tvořené modulovými bloky Fibratex HPS 1260 z keramických vláken, viz obr. 21, laboratorně ověřeny a následně nahradí hodnoty z technických listů.

Jedná se zejména o vlastnosti:

- Objemová hmotnost materiálu  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Měrná tepelná kapacita materiálu  $c$  [kJ/kg·K]
- Tepelná vodivost materiálu  $\lambda$  [W/m·K]

Skladba podlahy tl. 250 mm:

- 1) Vysocehlinité cihly TRIAL AT 60A tl. 100 mm –  $\rho = 2450 \text{ kg/m}^3$ ;  $c = 1,0 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ;  
 $\lambda = 0,92 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- 2) Tepelně izolační cihly TRIZOL HB 11 tl. 50 mm –  $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$ ;  $c = 0,83 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ;  
 $\lambda = 0,51 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- 3) Kalcium-silikátové desky KERASIL 1000 tl. 100 mm –  $\rho = 240 \text{ kg/m}^3$ ;  $c = 1,3 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ;  
 $\lambda = 0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Zjednodušená skladba stěn a stropu tl. 250 mm:

- 1) Bloky FIBRATEC HPS 1260 tl. 245 mm –  $\rho = 160\text{-}220 \text{ (200) kg/m}^3$ ;  $c = 1,13 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ;  
 $\lambda = 0,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- 2) OCEL tl. 5 mm -  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;  $c = 0,46 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ;  $\lambda = 45,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Stěny odtahu pece tl. 250 mm:

- 3) Izolační žárobeton (perlit) IZOBET 1400/0,9 tl. 250 mm –  $\rho = 900\text{-}960 \text{ (940) kg/m}^3$ ;  
 $c = 1,15 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ;  $\lambda = 0,27 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (pro 600 °C)

V modelu je skladba stěn, stropu zjednodušená a tloušťky jsou upraveny, tak aby odpovídaly hrubosti sítě 250 mm.

### 4.1.2 Palivo

Palivo v peci tvoří v reálném případě směs vzduchu a zemního plynu, stejně tak je tomu i v případě virtuální pece, kde je předepsána rovnice hoření této směsi.

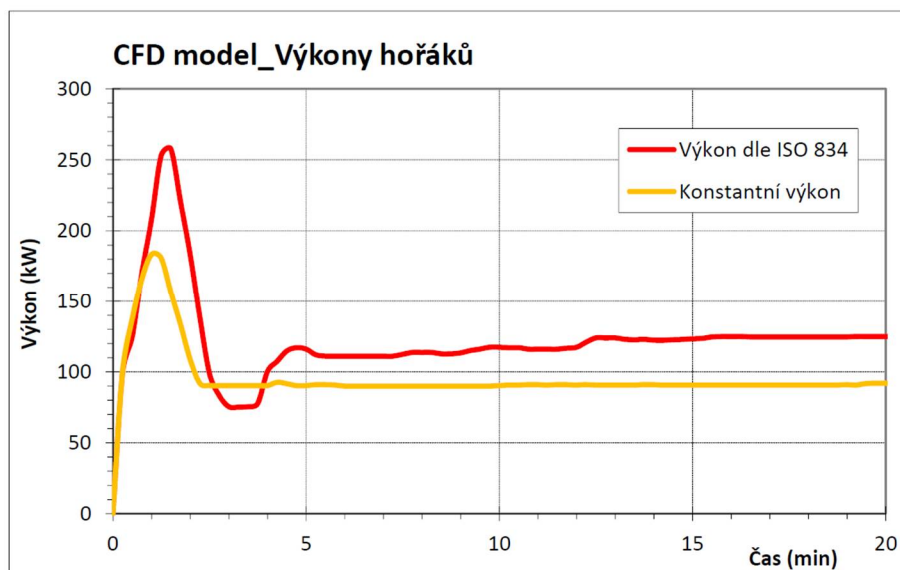
Hořáky jsou simulovány osmi čtvercovými plochami o rozměrech 250 mm x 250 mm, které jsou umístěny 0,5 m nad podlahou, v řadě po čtyřech na delších stranách virtuální pece. Výkon hořáků se postupně zvyšuje v závislosti na čase a to podle výkonů naměřených při 1. a 2. zkoušce provedené 29.7.2016 ve vodorovné zkušební peci H2 v požární zkušebně PAVUS a.s. viz kapitola 3.3. Výkon hořáků je vždy počítán jako podíl z maximálního průměrného výkonu naměřeného při experimentu v daném časovém kroku. Maximální průměrný výkon hořáků byl při 1. zkoušce 258 kW a při 2. zkoušce 183 kW, viz tab. 16, tato hodnota je podělena plochou hořáku  $0,25^2 \text{ m}^2$  a přiřazena ke každému z nich. To znamená, že pro 1. zkoušku je výchozí hodnota  $258/0,25^2 = 4128 \text{ kW/m}^2$  a pro 2. zkoušku  $183/0,25^2 = 2928 \text{ kW/m}^2$ . Výkony všech osmi virtuálních hořáků jsou nastaveny stejně.

Tab. 16 Zvyšování výkonu ploch hořáků v závislosti na čase dle 1. a 2. zkoušky provedené 29.7.2016 ve vodorovné zkušební peci H2 v požární zkušebně PAVUS a.s.

ČAS	0 min	1 min	1,5 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Ø VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
1.ZK výkon - ISO 834	0	208,15	257,7	183,4	75,49	100,24	116,08	117,4	123,34	124,99	123,67	123,67
podíl z maxima=258kW	0,00	0,81	1,00	0,71	0,29	0,39	0,45	0,46	0,48	0,49	0,48	0,48
výkon na plochu hořáku	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )
0,0625m <sup>2</sup>	0,0	3334,9	4128,0	2938,4	1209,5	1606,0	1859,8	1881,0	1976,1	2002,6	1981,4	1981,4
2.ZK Konst. výkon	0	183,4	156,7	108,82	90,34	90,34	90,34	90,67	90,67	91,99	89,68	90,67
podíl z maxima=183kW	0,00	1,00	0,85	0,59	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,50	0,49	0,49
výkon na plochu hořáku	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )
0,0625m <sup>2</sup>	0,0	2928,0	2501,3	1737,3	1442,3	1442,3	1442,3	1447,6	1447,6	1468,6	1431,8	1447,6

Při reálných požárních zkouškách je teplota zvyšována tak, aby sledovala průběh normové teplotní křivky, viz rovnice (19). Proběhlé experimenty, zejména druhý s konstantním výkonem hořáku, byl proveden s cílem vytvoření jasné představy o tom, jak nastavit výkon hořáků ve virtuálním modelu.





Graf 13: Průběh výkonů hořáků v CFD modelu vodorovné pece

### 4.1.3 Ventilace

Dalším normovým požadavkem je udržení přetlaku 20 Pa 100 mm pod stropem, viz kapitolu 3.1.

Odtah spalin je v reálné peci prováděn pomocí frekvenčního ventilátoru umístěného v potrubí, které je připojeno k otvoru (0,5 m x 0,8 m) v podlaze pece a přetlak je kontrolován pomocí čidla umístěného na vnitřní stěně pece ve výšce 1,38 m přímo naproti dveřím, dále je nad otvorem umístěna svařovaná ocelová konstrukce výšky 420 mm bránící průniku odpadávajících částí zkoušených konstrukcí do otvoru v podlaze, viz obr. 40.

V případě virtuální pece je otvor v podlaze umístěn, také ve středu pece a jeho vnitřní rozměry jsou 0,5 m x 1,0 m, otvor je obestavěn límcem výšky 250 mm, provedeným z žárobetonu IZOBET 1400/0,9 a ústí do mínusové oblasti MESH do potrubí tvořeného čtyřmi stěnami tl. 250 mm, tyto stěny jsou ze stejného materiálu jako límec okolo otvoru. Hranice MESH na konci potrubí (-1,0 m) je otevřená plocha a spaliny z pece jsou tedy přirozeně odváděny.

### 4.1.4 Měření teploty v peci - nastavení a rozmístění TC a PT

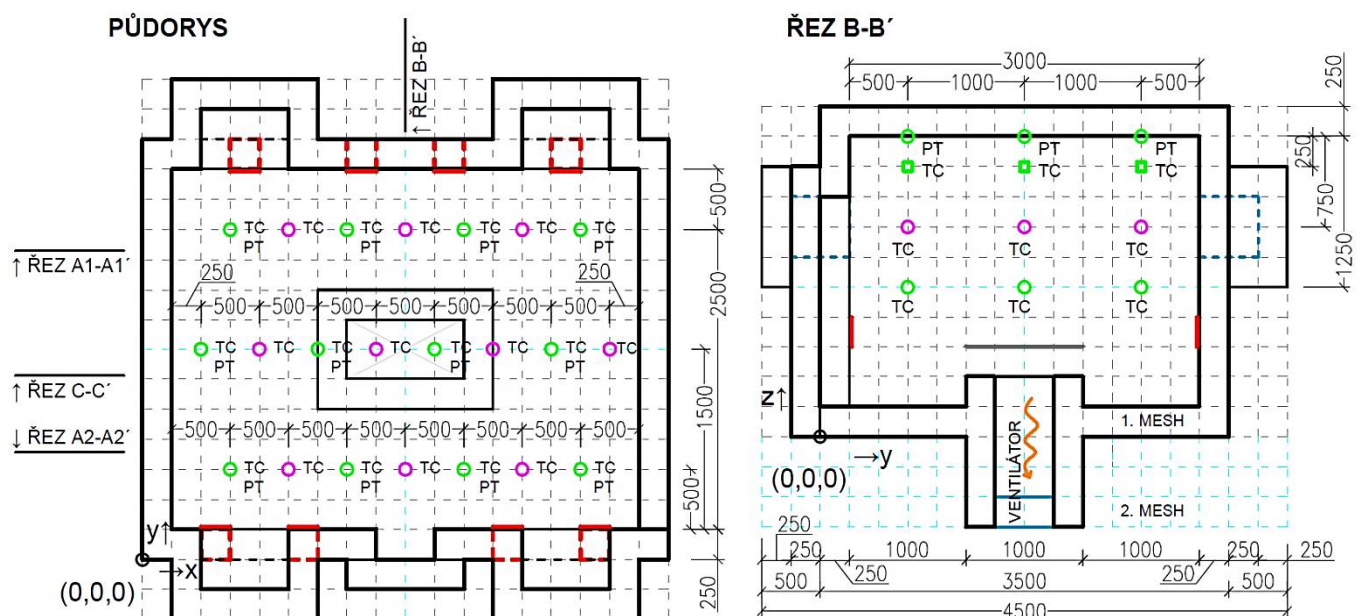
V peci jsou používány dva typy snímačů teploty a to **plášťové termočlánky (TC)**, které mají defaultní parametry<sup>3</sup>: průměr = 1 mm; materiál Ni; emisivita povrchu  $\varepsilon = 0,85$ ; objemová hmotnost  $\rho = 8908 \text{ kg/m}^3$ ; měrná tepelná kapacita  $c = 0,44 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ . Tyto hodnoty jsou upraveny podle skutečně použitých termočlánků během experimentů: průměr 2 mm; objemová hmotnost  $\rho = 8470 \text{ kg/m}^3$ ; měrná tepelná kapacita  $c = 0,444 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ . Druhým typem měřidel jsou **deskové snímače teploty (PT)**, které jsou simulovány měřením **adiabatické teploty povrchu**

<sup>3</sup> Defaultní parametry jsou přednastavené hodnoty, s nimiž FDS počítá, pokud nejsou uživatelem definovány jinak.

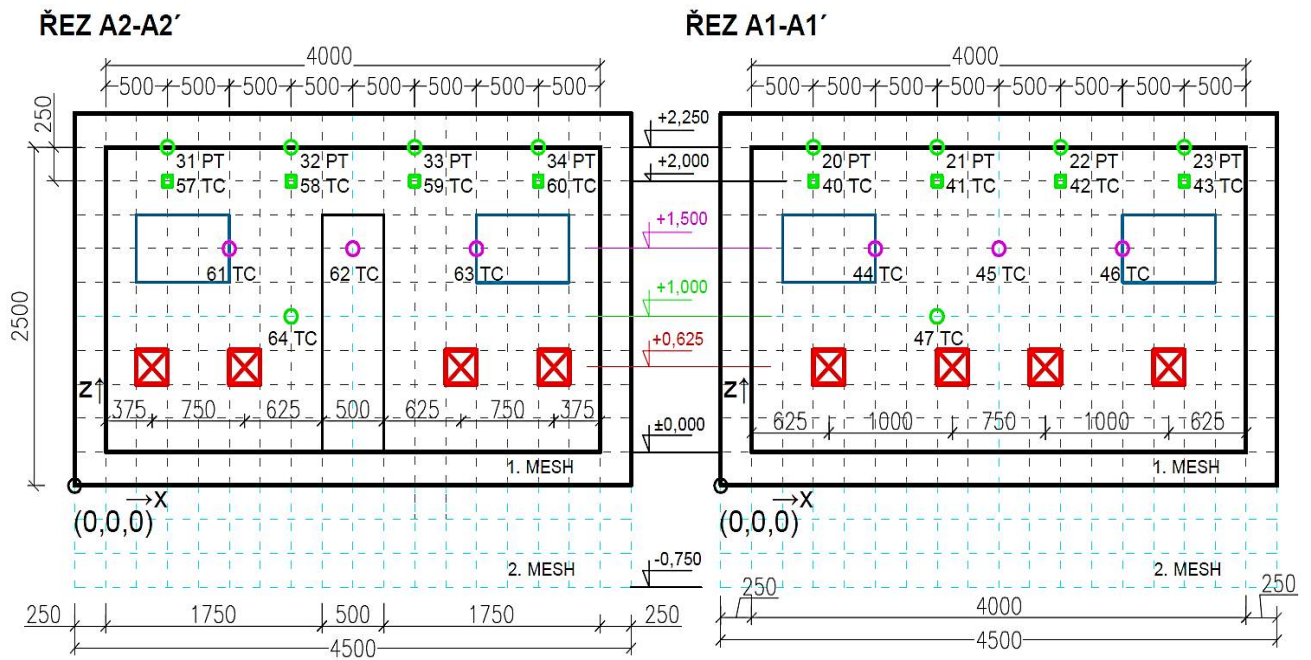
(AST), jejíž defaultní parametry jsou: emisivita povrchu  $\varepsilon = 1,0$  a čistý tepelný tok  $h_{\text{tot}} = 0 \text{ W/m}^2$  [17]. Tyto parametry jsou upraveny podle skutečně použitých PT: emisivita povrchu  $\varepsilon = 0,9$ .

Pozice termočlánků v CFD modelu pece jsou shodné s jejich rozmístěním při experimentu, viz kapitolu 3.2. Což znamená, že měřicí body v CFD modelu pece jsou umístěny půdorysně ve třech řadách souběžných s delší stranou pece, viz obr. 44.

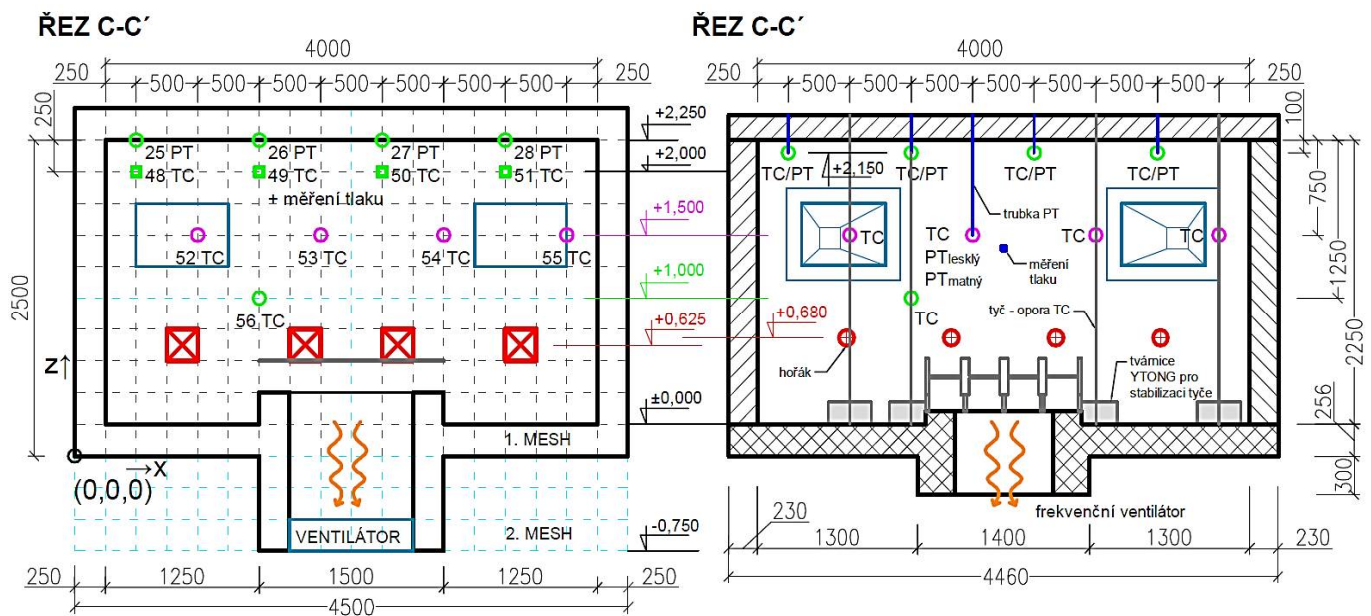
Rozdíl je v úrovni pod stropem, kde se nacházejí dvě řady měřících bodů. Přímou na spodním povrchu stropní konstrukce jsou umístěny body měřící AST a přímo pod nimi jsou ve vzdálenosti 250 mm rozmístěny body TC, viz obr. 45 a obr. 46. Při reálné zkoušce jsou PT a TC umístěny vždy v jednom bodě ve vzdálenosti 100 mm pod stropem, což není možné dodržet díky hrubosti sítě 250 mm. Měřicí body AST simulující PT nelze umístit do prostoru, proto jsou tyto body umístěny přímo na stropní konstrukci, ze stejného důvodu nejsou v modelu umístěny PT v úrovni 750 mm pod stropem.



Obr. 44: Rozmístění termočlánků v CFD modelu pece – PŮDORYS a ŘEZ B-B'



Obr. 45: Rozmístění termočlánků v CFD modelu pece – ŘEZ A1-A1' a ŘEZ A2-A2'



Obr. 46: Rozmístění termočlánků v CFD modelu pece a srovnání s rozmístěním v reálné peci – ŘEZ C-C'

## 4.2 Výsledky z CFD modelu

### 4.2.1 CFD model - tlak

Jak již bylo řečeno výše, spaliny z virtuální pece jsou odváděny přirozeně otvorem v podlaze. Tlak je měřen 250 mm pod stropem zhruba uprostřed pece v měřicím místě TC\_49. Průběh tlaků při scénáři dle normové teplotní křivky (zelenou barvou) a s konstantním výkonem hořáků a počáteční teplotou 118 °C podle 2. zkoušky (modrou barvou) je vidět na grafu 14.

Z grafu je patrná velká podobnost s průběhem výkonů hořáků, viz graf 13, je tedy jasné, že hodnoty tlaku uvnitř pece budou v případě přirozeného odvodu spalin ovlivňovány výkonem hořáků. Zároveň je vidět, že v případě nastavení CFD modelu podle 2. zkoušky je tlak mnohem nižší, což je způsobeno kromě nižšího výkonu nastavením počáteční teploty prostředí na **118 °C**. Velký vliv počáteční teploty na tlak uvnitř virtuální pece je ověřen nastavením počáteční teploty 20 °C v CFD modelu podle 2. zkoušky, průběh tlaku při tomto nastavení je v grafu 14 zobrazen žlutou tečkovanou křivkou a srovnání výsledků je provedeno v tab. 18.

Tab. 17: Výkony hořáků a tlak 250 mm pod stropem v modelu pece

CAS	0 min	1 min	1,5 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
1.ZK podle ISO 834												
Výkon (kW)	0,0	208,2	<b>257,7</b>	183,4	75,5	100,2	116,1	117,4	123,3	125,0	123,7	123,7
Tlak (Pa)	0,0	36,3	<b>44,0</b>	36,5	27,8	27,0	30,1	30,2	31,9	32,9	33,6	33,6
2.ZK s Konst. výkonem												
Výkon (kW)	0,0	<b>183,4</b>	156,7	108,8	90,3	90,3	90,3	90,7	90,7	92,0	89,7	90,7
Tlak (Pa)	0,0	<b>28,9</b>	27,7	22,4	19,9	20,4	19,8	21,4	22,1	22,5	22,5	22,5
rozdíl Výkonů (kW)	0,0	24,8	101,0	74,6	-14,9	9,9	25,7	26,7	32,7	33,0	34,0	22,5
rozdíl Tlaků (Pa)	0,0	7,4	16,3	14,1	7,8	6,7	10,3	8,9	9,9	10,4	11,1	11,0

Při první zkoušce dosáhne výkon svého maxima 257,7 kW po 1,5 min, v této chvíli dosáhne svého maxima 44 Pa i tlak. Po ustálení se výkon pohybuje okolo **120 kW** a tlak okolo **32 Pa**, z hodnot tlaku při 1. zkoušce je patrné, že horní hranice normou požadované hodnoty tlaku 23 Pa je překračována cca o 10 Pa. Při druhé zkoušce dosáhne výkon maxima 183,4 kW již v 1. min, v této chvíli dosáhne maxima 28,9 Pa také tlak. Po ustálení se výkon pohybuje okolo **90 kW** a tlak okolo **22 Pa** (viz tab. 17), z hodnot tlaku při 2. zkoušce je patrné, že je již od 2. min splněna normou požadovaná tolerance 20 Pa ±3 Pa. Lze tedy říct, že na rozdíl 30 kW a 90 °C počáteční teploty připadá rozdíl tlaků přibližně 10 Pa, jak je ale patrné z grafu 14 tlak i po ustálení výkonů stále mírně narůstá.

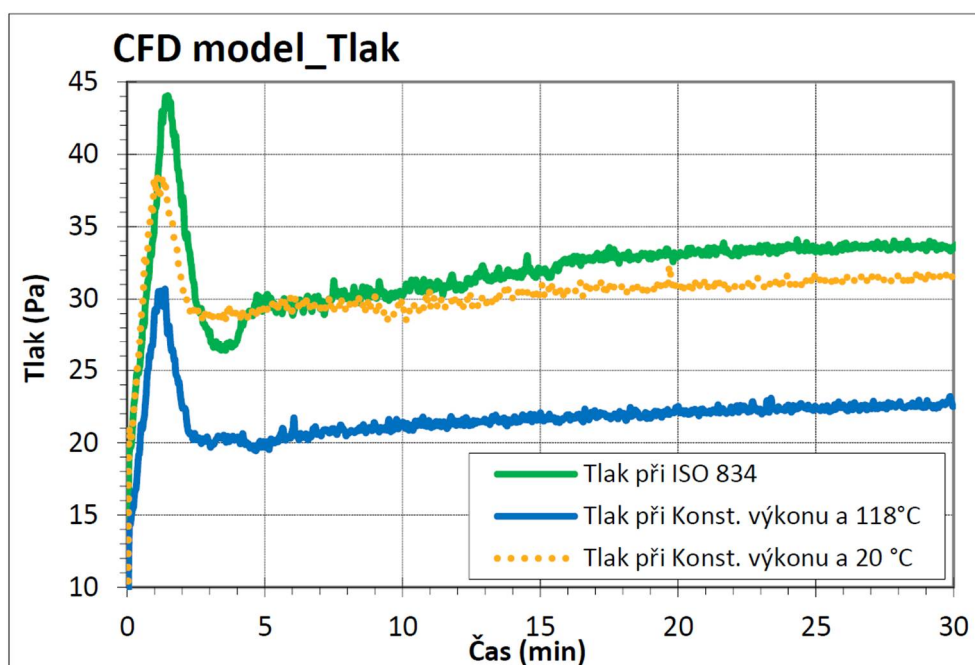
Dále je patrné, že výkon při 1. zkoušce ve 3. min klesl pod výkon při 2. zkoušce, tento pokles kopíruje i průběh tlaku, ale ten na rozdíl od výkonu neklesne pod hodnotu tlaku naměřenou při 2. zkoušce (kladná hodnota rozdílu v tab. 17).



Tab. 18: Rozdíl tlaku pod stropem při rozdílné počáteční teplotě v modelu pece

ČAS	0 min	1 min	1,5 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
2.ZK s Konst. výkonem a počáteční teplotou 118 °C												
Tlak (Pa)	0,0	28,9	27,7	22,4	19,9	20,4	19,8	21,4	22,1	22,5	22,5	22,5
2.ZK s Konst. výkonem a počáteční teplotou 20 °C												
Tlak (Pa)	0,0	38,5	36,2	31,0	29,2	29,0	29,4	30,0	30,5	31,0	31,4	31,5
Výkon (kW)	0,0	183,4	156,7	108,8	90,3	90,3	90,3	90,7	90,7	92,0	89,7	90,7
rozdíl Tlaků (Pa)	0,0	9,6	8,5	8,6	9,3	8,7	9,6	8,6	8,4	8,5	8,9	9,0

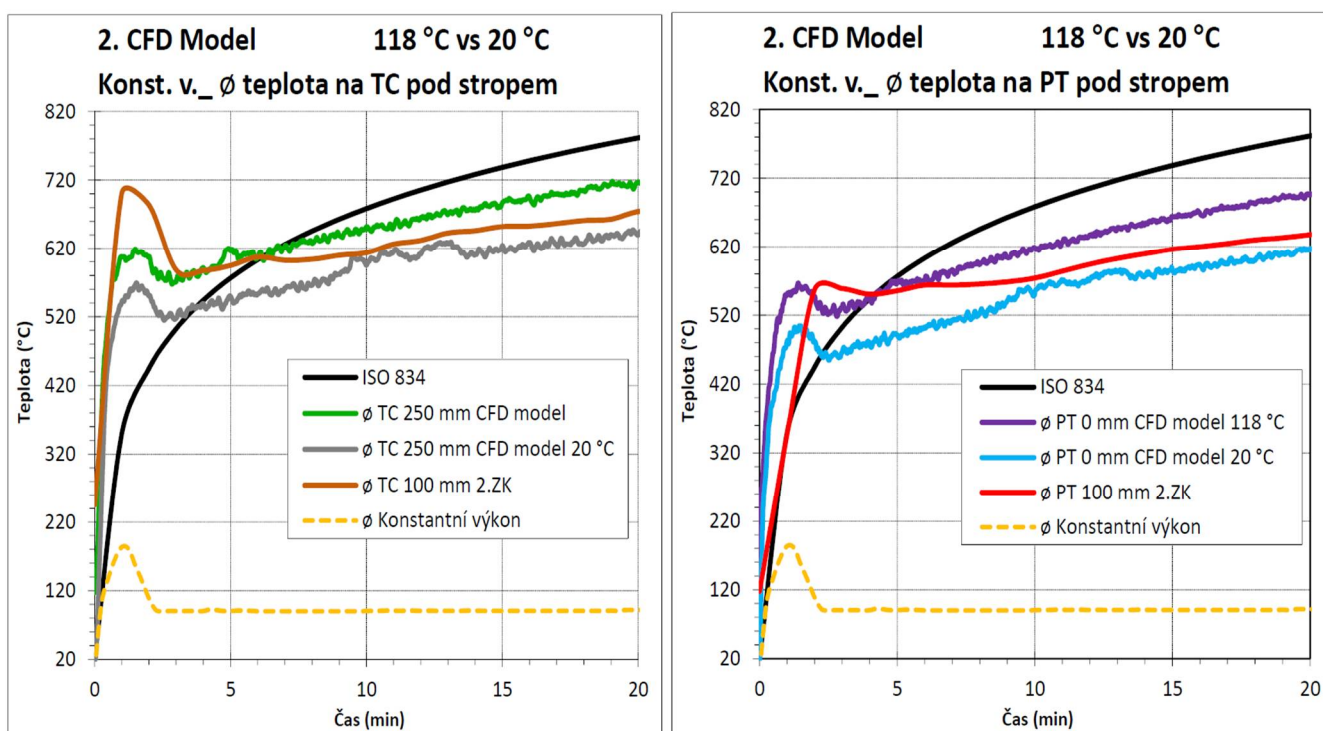
Z tab. 18 je vidět, že počáteční teplota má vliv na tlak uvnitř pece, kdy je při stejném výkonu, ale nižší teplotě na začátku výpočtu dosaženo vyšších hodnot tlaku. Dále je z grafu 14 patrné, že průběh křivek tlaku je v obou případech shodný (křivky jsou rovnoběžné), rozdíl je tedy pouze v hodnotách tlaku nikoliv v jeho vývoji. Lze říct, že při zvýšení počáteční teploty o  $98\text{ °C} = 118\text{ °C} - 20\text{ °C}$  se tlak uvnitř pece sníží zhruba o **9 Pa**.



Graf 14: Tlak v modelu pece 250 mm pod stropem

Dále je na grafu 15 jasně vidět, že rozdílná počáteční teplota má výrazný vliv také na teploty dosažené při výpočtu. Průběh průměrných teplot pod stropem na PT je vykreslen v grafu 15 b), kde je fialovou barvou zobrazen průběh vypočítaný v CFD modelu při počáteční teplotě 20 °C a modrou barvou při 118 °C, červenou barvou je vykreslen průběh průměrné teploty naměřené na PT při 2. zkoušce. Průběh průměrných teplot pod stropem na TC je vykreslen v grafu 15 a), kde je zelenou barvou zobrazen průběh vypočítaný v CFD modelu při počáteční teplotě 20 °C a šedou barvou při 118 °C, hnědou barvou je vykreslen průběh průměrné teploty naměřené na TC při 2. zkoušce. V obou grafech je pro srovnání zakreslena černou barvou normová teplotní křivka a žlutou čárkovanou křivkou průměrný výkon při 2. zkoušce.

V případě nastavení počáteční teploty 20 °C (tedy o 98 °C nižší) se tlak uvnitř pece zvýší a vypočítané teploty se sníží. Průměrná teplota pod stropem je při počáteční teplotě 20 °C na TC = 607,7 °C a na PT = 571,8 °C (rozdíl TC-PT = 35,9 °C), zatímco při 118 °C na TC = 673,2 °C a na PT = 646,2 °C (rozdíl TC-PT = 27 °C). Z rozdílů na TC a PT je patrné, že při nastavení vyšší počáteční teploty se snižují. Lze říct, že při teplotě o 98 °C vyšší je rozdíl mezi TC a PT o 35,9 – 27 °C = 8,9 °C nižší. Rozdíl mezi průměrnými hodnotami na PT = 646,2 – 571,8 = 74,4 °C a na TC = 673,2 – 607,7 = 65,5 °C. To znamená, že při zvýšení počáteční teploty o 98 °C se uvnitř virtuální pece při průměrném výkonu 94 kW sníží tlak o cca 9 Pa a zvýší se průměrná teplota pod stropem na PT o 74,4 °C a na TC o 65,5 °C.

a)  $\varnothing$  teploty na TC pod stropemb)  $\varnothing$  teploty na PT pod stropem

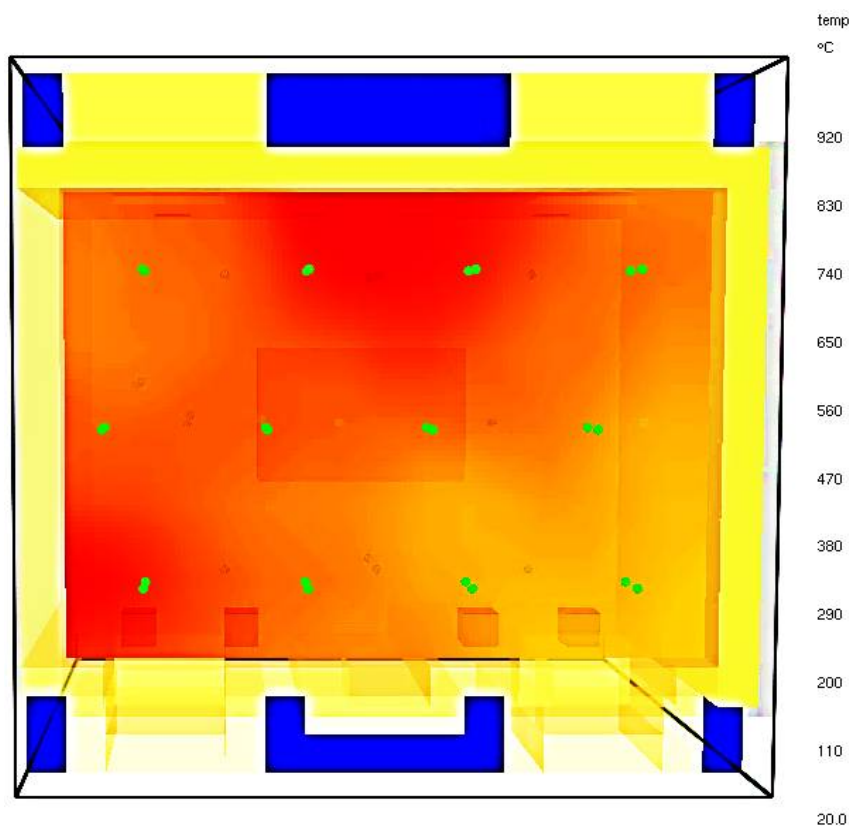
Graf 15: Průběh průměrných teplot na TC a PT pod stropem při rozdílné počáteční teplotě, 2.zkouška

Normovým požadavkem je udržení tlaku pod stropem na hodnotě 20 Pa  $\pm$ 3 Pa. V grafu 14 je vidět, že tento limit není v případě přirozeného odvodu spalin a počáteční teplotě prostředí okolo 20 °C splněn. Z tohoto důvodu je nutné do modelu pece přidat systém ventilace, který bude otvorem v podlaze nuceně odvádět spaliny a tím udržovat požadovaný tlak nezávisle na výkonu hořáků a teplotě prostředí, tak jak je to i u skutečné pece.



## 4.2.2 CFD model - rozložení teploty

### 4.2.2.1 Normová teplotní křivka – teploty pod stropem modelu



Obr. 47: Půdorys CFD modelu – teploty vypočítané na TC pod stropem v 15. min, nastavení podle 1. zkoušky

Na obr. 47 je znázorněn půdorys virtuálního modelu pece a teploty v 15. min, vypočítané na TC umístěných 250 mm pod stropní konstrukcí při nastavení podle 1. zkoušky, která probíhala podle normové teplotní křivky, jejíž hodnota v 15. minutě vychází 739 °C.

Z tab. 19, kde jsou vypsány průměrné, maximální a minimální teploty vypočítané na PT (AST na stropě) a TC 250 mm pod stropem, lze vyčíst, že nejnižší průměrná teplota byla vypočítána na **PT\_34** a to **724,8 °C**, ve stejném místě bylo vypočítáno na **TC\_60** a to **743,9 °C**. Nejvyšší průměrnou teplotu **777,7 °C** software vypočítal na **TC\_41**, ve stejném místě vypočetl nejvyšší teplotu také **PT\_21** a to **754,1 °C**, viz tab. 19. Rozdíl mezi maximálními a minimálními teplotami je tedy pro PT =  $754,1 - 724,8 = 29,3$  °C a TC =  $777,7 - 743,9 = 33,8$  °C.

Vzhledem k vysokým teplotám a proudění horkých plynů uvnitř pece poukazuje relativně malý rozdíl mezi teplotami v měřicích místech a průměrnou teplotou: TC -13 až +20,7 = 33,7 °C a PT -10 až +19,2 = 29,2 °C, rovnoměrné rozložení teploty po půdorysu pece. Nicméně to jsou rozdíly průměrných teplot, například v 15. min (Obr. 32 a obr. 47) jsou rozdíly mezi nejchladnějšími a nejteplejšími místy vyšší: TC =  $819,4 - 746,9 = 72,5$  °C a pro PT =  $797,5 - 737,9 = 59,6$  °C.

Tab. 19: Přehled teplot naměřených pomocí PT a TC pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky

TERMOČLÁNKY	20 PT	21 PT	22 PT	23 PT	25 PT	26 PT	27 PT	28 PT	31 PT	32 PT	33 PT	34 PT	ø PT
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ø průměrná	738,2	754,1	750,8	734,8	728,2	734,1	734,6	729,0	729,1	730,7	730,0	724,8	734,9
maximální	884,8	893,2	894,8	885,6	873,8	877,9	879,5	876,7	867,1	869,5	869,4	866,5	875,6
minimální	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
rozdíl od ø teploty	3,3	19,2	15,9	-0,1	-6,7	-0,7	-0,3	-5,9	-5,8	-4,2	-4,9	-10,0	/
teplota v 15.min	764,1	797,5	772,8	747,8	757,5	763,8	759,2	743,9	771,3	759,5	749,9	737,9	760,4

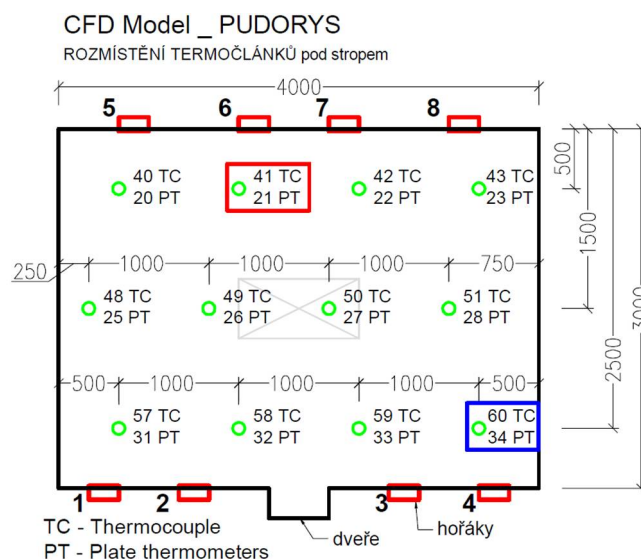
  

TERMOČLÁNKY	40 TC	41 TC	42 TC	43 TC	48 TC	49 TC	50 TC	51 TC	57 TC	58 TC	59 TC	60 TC	ø TC
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ø průměrná	758,2	777,7	774,5	754,4	750,7	758,9	761,1	752,9	750,3	750,9	749,7	743,9	756,9
maximální	884,5	894,4	897,6	886,9	881,6	886,5	888,0	881,9	870,3	873,3	874,2	871,2	880,6
minimální	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
rozdíl od ø teploty	1,2	20,7	17,6	-2,6	-6,3	2,0	4,2	-4,0	-6,6	-6,0	-7,2	-13,0	/
teplota v 15.min	795,0	819,4	792,8	766,5	777,2	786,7	782,2	761,7	804,9	774,7	761,7	746,9	780,8

rozdíl mezi ø PT a TC	19,9	23,5	23,7	19,5	22,4	24,7	26,5	24,0	21,2	20,2	19,7	19,1	22,0
-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

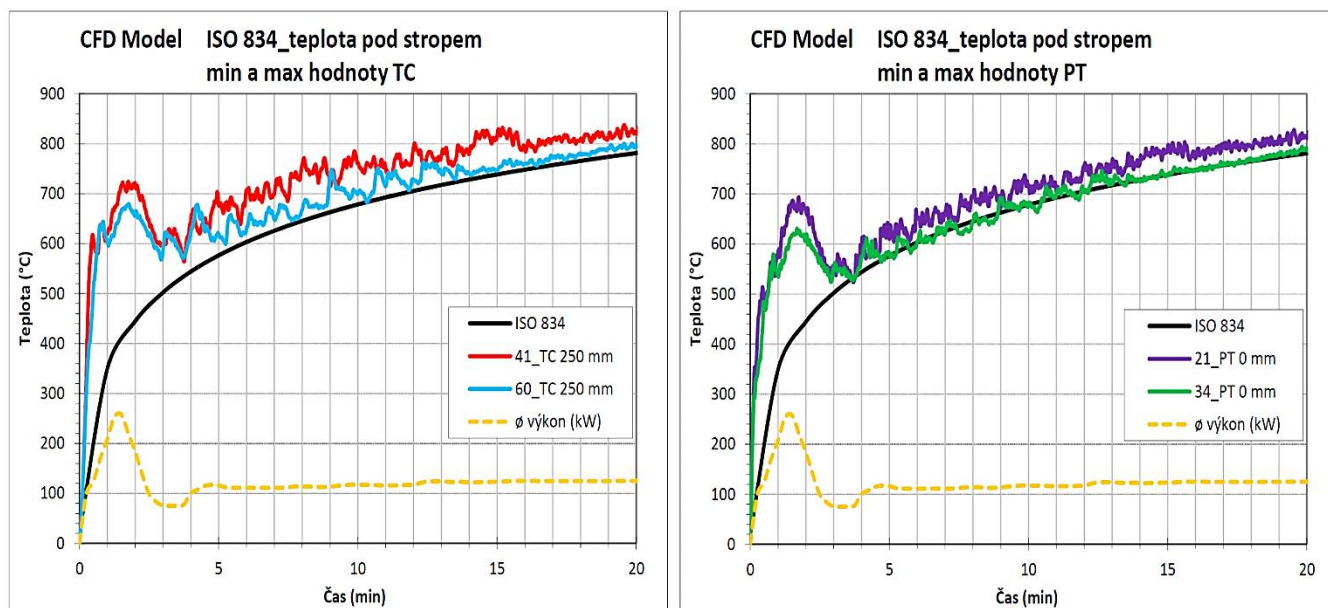
Pro přehlednost je na obr. 48 znázorněn zjednodušený půdorys pece s vyznačením míst, kde a kterými termočlánky jsou vypočítány max. a min. teploty, červený obdélník vyznačuje místo s nejvyšší teplotou (21\_PT, 41\_TC) a modrý naopak s nejnižší teplotou (34\_PT, 60\_TC).



Obr. 48: Půdorysné rozmístění TC a PT pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník), nastavení podle 1. zkoušky.

Z tab. 19 lze také vyčíst, že průměrné teploty vypočítané na PT jsou nižší a to v průměru o 19,1 až 26,5 °C, než teploty stanovené pomocí TC. Dále jsou v tabulkách uvedeny teploty v 15. minutě, která má být podle normové teplotní křivky 739 °C, průměrná teplota PT je 734,9 °C, což je pouze o 4 °C méně než je požadovaná hodnota. Na rozdíl od toho průměrná teplota vypočítaná na TC je 756,9 °C, takže rozdíl je 17,9 °C. Je vidět, že rozdíl mezi teplotami vypočítanými na TC a PT je relativně malý, což je jasně patrné i z grafu 16, kde jsou zakresleny maximální a minimální teploty. Pro porovnání je v grafu znázorněn i průběh normové teplotní křivky (černá křivka). V grafu 16 je jasně vidět, že křivky TC mají rychlejší nárůst teplot, již v 1. min narůstá teplota nad 600 °C, zatímco na PT zůstává pod 600 °C. Stejně tak vykazují TC méně

stabilní průběh (větší odchylky) než křivky PT, což je způsobeno jejich vyšší citlivostí. Nicméně můžeme v grafu 16 vidět, že průběh minimální teploty na 60\_TC (modrá barva) a maximální teploty na 21\_PT (fialová barva) je téměř shodný.

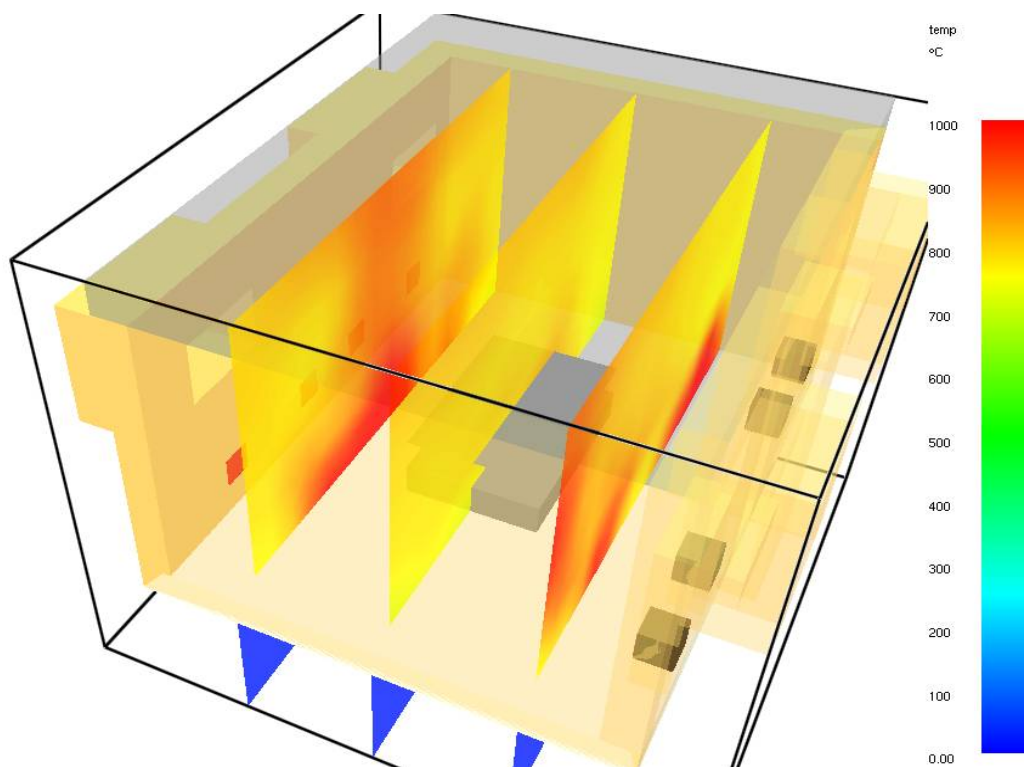
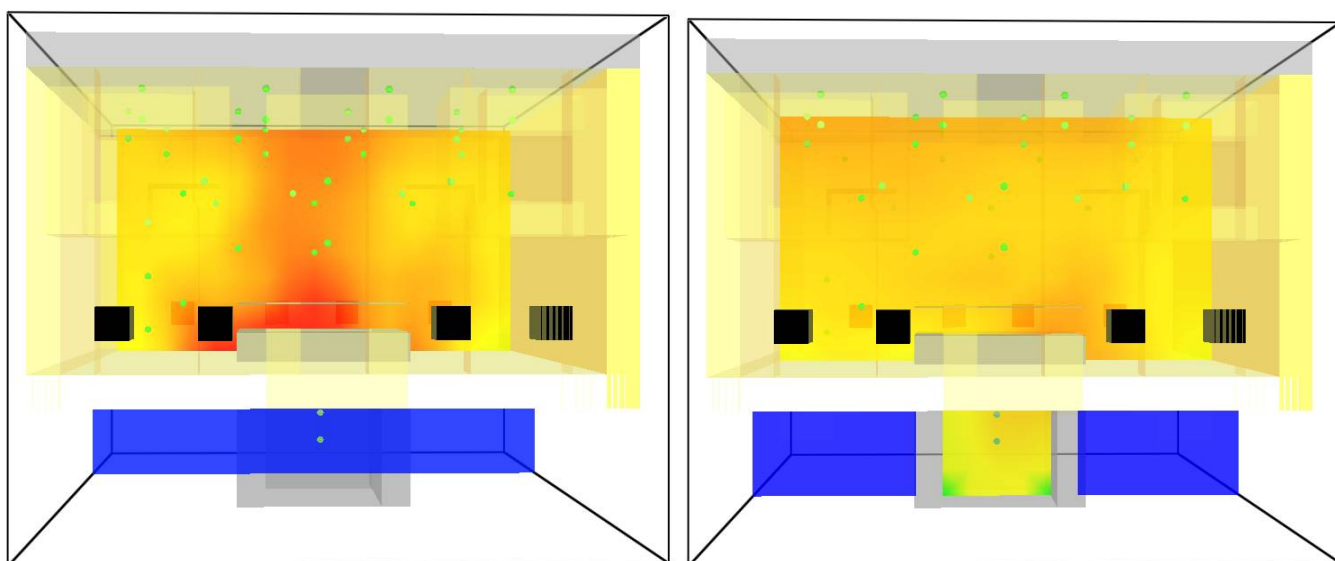


a) TC 250 mm pod stropem

b) PT (AST na spodní straně stropu)

Graf 16: Průběh max. a min. teplot vypočítaných na PT a TC pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky

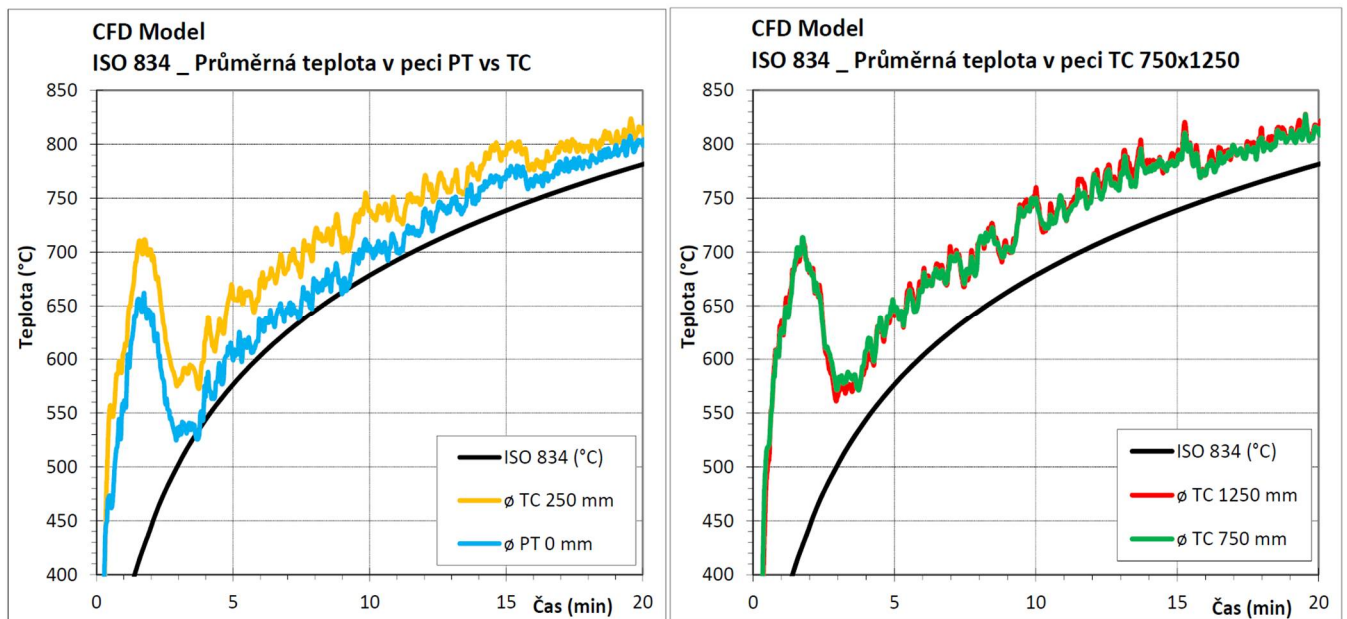
## 4.2.2.2 Normová teplotní křivka – teploty po výšce modelu

a) Pohled do virtuální pece – teplotní řezy v ose  $y = 0,75; 1,75; 2,75$  mb) Teplota po výšce ŘEZ A1-A1' ( $y = 2,75$  m)c) Teplota po výšce ŘEZ C-C' ( $y = 1,75$  m)

Obr. 49: Teploty po výšce CFD modelu v ose  $y$  - vypočítané na TC v 15. min, nastavení podle 1. zkoušky

Z následujícího grafu 17 můžeme vyčíst, že průběhy teploty neklesají dle očekávání s narůstající vzdáleností od hořáků, ale jsou téměř shodné. To znamená, že v CFD modelu nastaveného podle 1. zkoušky je téměř dosaženo rovnoměrného rozložení teplot po výšce pece. Rovnoměrné rozložení teplot je patrné i z obr. 49, kde jsou zobrazeny teploty v řezech A1-A1', A2-A' a C-C'. Ve středu pece (ŘEZ C-C') je teplota téměř stejná po celé výšce. Zatímco v krajních řezech je patrný vliv hořáků, což se projevuje oblastmi s vyššími teplotami (znázorněné červenou barvou).





a) Teploty pod stropem

b) Teploty ve středu pece a nad hořáky

Graf 17: Průběh teplot vypočítaných po výšce modelu: PT (AST na stropě) a TC – 250 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky

Průměr teplot po výšce virtuální pece je počítán, stejně jako v případě reálné pece z vybraných termočlánků, viz kapitolu 3.4.3.2 a obr. 34, vyjma PT číslo 24, 29 a 35 umístěných ve střední úrovni (750 mm pod stropem), protože AST lze měřit pouze na povrchu konstrukcí.

V grafu 17 je vidět v prvních 5 min od začátku zkoušky velké teplotní výkyvy, ty jsou způsobeny velkými výkyvy výkonů v začátku zkoušky, podle které jsou nastaveny výkony hořáků v CFD modelu pece. Z důvodu velkých výkyvů teplot v prvních 5 min a následného ustálení průběhu je průměr teplot počítán z hodnot naměřených až od 5. min viz tab. 20.

Teploty TC vypočítané 1250 mm pod stropem, což je 1,0 m nad podlahou, jsou průměrně o 3,3 °C vyšší než teploty 250 mm pod stropem. Ve střední měřící rovině tj. 1,5 m nad podlahou (0,875 m nad hořáky) je teplota průměrně o 4,8 °C nižší než ve spodní rovině, která se nachází o 0,5 m níže. Teploty v horní a střední úrovni jsou téměř shodné, průměrný rozdíl činí 1,4 °C. Rozdíly mezi výškovými úrovněmi jsou prakticky zanedbatelné, což potvrzuje tvrzení, že teplota po výšce CFD modelu je rovnoměrná.

V případě PT jsou teploty v horní úrovni průměrně o 23,3 °C nižší než teploty vypočítané na TC 250 mm pod stropem, viz tab. 20. V grafu 17 můžeme pozorovat s časem se snižující rozdíl teplot vypočítaných na TC a PT. V prvních 5 min se rozdíl pohybuje okolo 50 °C, v 10. min klesá na hodnotu 32,9 °C a dál se rovnoměrně snižuje až do konce zkoušky na 5,5 °C ve 30. min.



Tab. 20: Přehled rozdílů teplot po výšce vypočítaných na TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	Ø od 5.min
Ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
TC 250 mm	20,0	607,6	702,0	576,8	617,9	657,5	738,4	793,6	810,4	850,4	874,2	---
TC 750 mm	20,0	628,2	687,5	576,2	607,8	645,2	749,9	784,1	810,2	851,8	874,7	---
TC 1250 mm	20,0	635,6	680,9	566,6	591,8	640,6	760,0	791,1	812,6	860,4	880,0	---
rozdíl TC 250x750	0,0	20,6	-14,5	-0,6	-10,1	-12,3	11,5	-9,5	-0,2	1,4	0,4	-1,4
rozdíl TC 750x1250	0,0	7,4	-6,5	-9,6	-16,0	-4,6	10,1	7,0	2,4	8,6	5,4	4,8
rozdíl TC 250x1250	0,0	28,0	-21,0	-10,3	-26,1	-16,9	21,5	-2,5	2,2	10,0	5,8	3,3
PT 0 mm	20,0	561,3	637,9	529,1	564,9	599,0	705,5	773,6	798,7	839,6	868,7	---
rozdíl TC 250 a PT	0,0	46,3	64,0	47,7	52,9	58,5	32,9	20,0	11,7	10,8	5,5	23,3

Na TC, kterými je dána teplota plynů, jsou nejvyšší výkyvy vypočteny ve 2. min, kdy teplota v horní rovině dosahuje 702,0°C, ve střední rovině 687,5°C a ve spodní rovině (1250 mm pod stropem) 680,9°C. V další minutě teploty prudce klesají a to v horní rovině o -125,2°C (na 576,8°C), ve střední o -111,3°C (na 576,2°C) a ve spodní o -114,3°C (na 566,6°C), viz tab. 20.

Na PT umístěných na spodní straně stropní konstrukce je dosaženo nejvyššího výkyvu také ve 2. min, kdy teplota dosahuje 637,9°C. V další minutě teplota klesá o -108,8°C (na 529,1°C).

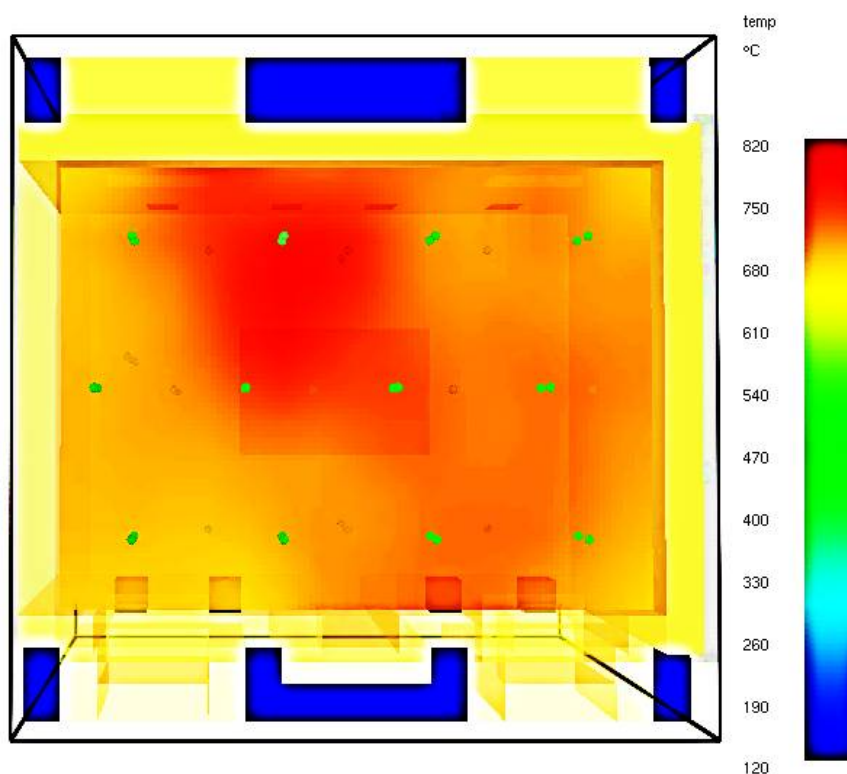
Tab. 21: Rozdíl teplot na PT (AST na stropě) a TC 250 mm a ISO 834, nastavení podle 1.zkoušky

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	Ø od 5.min
Ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ISO 834	20,0	349,2	444,5	502,3	543,9	576,4	678,4	738,6	781,4	814,6	841,8	---
TC 250 mm	20,0	607,6	702,0	576,8	617,9	657,5	738,4	793,6	810,4	850,4	874,2	---
rozdíl TC od ISO	0,0	258,4	257,4	74,5	74,0	81,0	60,0	55,0	29,0	35,8	32,4	48,9
PT 0 mm	20,0	561,3	637,9	529,1	564,9	599,0	705,5	773,6	798,7	839,6	868,7	---
rozdíl PT od ISO	0,0	212,1	193,4	26,8	21,1	22,6	27,0	35,0	17,3	25,0	26,9	25,6
rozdíl TC x PT	0,0	46,3	64,0	47,7	52,9	58,5	32,9	20,0	11,7	10,8	5,5	23,3

Neboť byly výkony hořáků nastaveny podle 1. zkoušky, která byla řízena podle normové teplotní křivky, je zajímavé srovnání dosažených teplot s jejím průběhem. Srovnání je provedeno v horní rovině (TC 250 mm pod stropem a PT na stropě), kde je požadován průběh teplot podle této křivky, viz tab. 21.

Na průběhu teplot v grafu 17 a) *Teploty pod stropem* je jasně patrné, že teploty vypočítané na PT jsou jen o málo vyšší než teploty normové teplotní křivky, což je vidět i v tab. 21 na hodnotách rozdílů, kdy je teplota na PT průměrně od 5. min vyšší o 25,6°C. Zatímco v 1. min je vyšší o 212,1°C a ve 2. min o 193,4°C. Jak již bylo řečeno výše, je tato extrémní odchylka způsobena nastavením výkonu podle skutečných hořáků, které v prvních minutách vykazovaly značnou nestabilitu. V případě TC jsou teploty oproti normové teplotní křivce vyšší a to v průměru od 5. min o 48,9°C. Nejvyšší rozdíly jsou opět v začátku zkoušky a to 258,4°C v 1. min a 257,4°C ve 2. min.

## 4.2.2.3 Konstantní výkon – teploty pod stropem modelu



Obr. 50: Půdorys CFD modelu – teploty vypočítané na TC pod stropem v 15. min, nastavení podle 2.zkoušky

Na obr. 50 je znázorněn půdorys virtuálního modelu pece a teploty v 15. min, vypočítané na TC 250 mm pod stropní konstrukcí při nastavení hořáků podle 2. zkoušky, kdy byl výkon nařazen na konstantní hodnotu 30% z maximálního možného výkonu a průměrná teplota v peci klesla před zahájením 2.zkoušky na 118 °C.

Z tab. 22, kde jsou vypsány průměrné, maximální a minimální teploty naměřené PT (AST na stropě) a TC 250 mm pod stropem, lze vyčíst, že nejnižší průměrná teplota byla vypočítána na **PT\_34** a to **635,7 °C**, ve stejném místě vyla na **TC\_60** vypočítána hodnota **658,9 °C**. Nejvyšší průměrné teploty **688,7 °C** dosáhl **TC\_41**, ve stejném místě dosáhl také nejvyšší teploty **PT\_21** a to **662,8 °C**. Rozdíl mezi max. a min. teplotami je tedy pro PT =  $662,8 - 635,7 = 27,1$  °C a TC =  $688,7 - 658,9 = 29,8$  °C.

Vzhledem k vysokým teplotám a proudění horkých plynů uvnitř pece model vykazuje relativně malý rozdíl mezi teplotami v měřících místech a průměrnou teplotou: TC -14,3 až +15,5 = 29,8 °C a PT -11 až +16,2 = 27,2 °C, rovnoměrné rozložení teploty po půdorysu pece. To potvrzují i rozdíly teplot po půdorysu vypočítané pod stropem v 15. min (obr. 35 a obr. 50), kdy jsou rozdíly mezi nejchladnějšími a nejteplejšími místy také nízké: TC =  $698,7 - 672,0 = 26,7$  °C a pro PT =  $681,5 - 653,6 = 27,9$  °C.

Místa kde byla vypočítána max. teplota (21\_PT, 41\_TC) a min. teplota (34\_PT, 60\_TC) jsou shodná s nastavením CFD modelu podle 1.zkoušky, viz obr. 48.

Tab. 22: Přehled teplot vypočítaných pomocí PT a TC pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky

TERMOČLÁNKY	20 PT	21 PT	22 PT	23 PT	25 PT	26 PT	27 PT	28 PT	31 PT	32 PT	33 PT	34 PT	ø PT
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ø průměrná	653,2	662,8	660,7	649,2	643,8	647,3	647,3	644,1	637,9	638,8	638,9	635,7	646,6
maximální	757,6	767,5	764,5	754,7	749,2	753,2	751,8	746,7	742,6	743,1	742,7	739,4	749,1
minimální	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0
rozdíl od ø teploty	6,6	16,2	14,0	2,6	-2,8	0,6	0,6	-2,6	-8,7	-7,9	-7,8	-11,0	/
teplota v 15.min	673,5	681,5	670,5	664,2	662,7	669,1	664,3	658,5	655,8	656,3	659,5	653,6	664,1

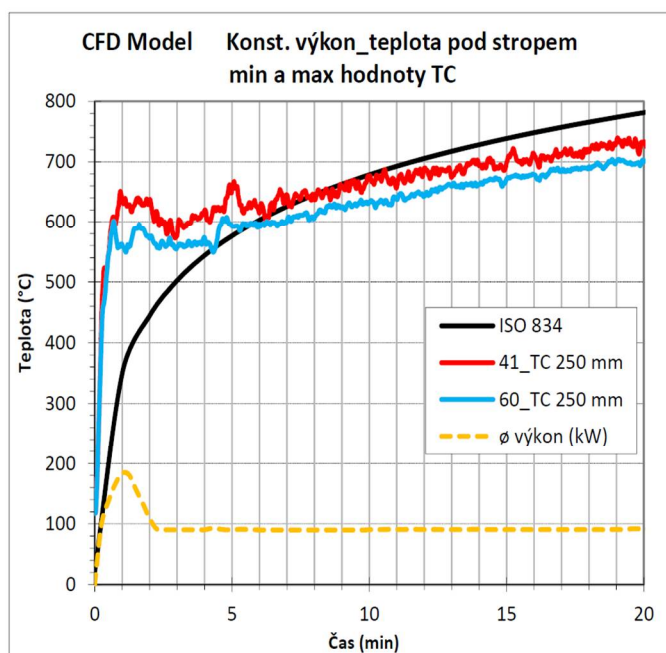
  

TERMOČLÁNKY	40 TC	41 TC	42 TC	43 TC	48 TC	49 TC	50 TC	51 TC	57 TC	58 TC	59 TC	60 TC	ø TC
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ø průměrná	676,1	688,7	686,5	671,4	671,6	679,0	680,7	673,1	662,8	665,2	664,6	658,9	673,2
maximální	766,2	775,6	776,1	764,8	764,2	770,7	771,4	763,2	755,6	757,1	757,7	751,7	762,7
minimální	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0
rozdíl od ø teploty	2,9	15,5	13,3	-1,8	-1,6	5,8	7,5	-0,1	-10,4	-8,1	-8,6	-14,3	/
teplota v 15.min	687,7	698,7	697,0	689,3	684,7	693,1	699,5	690,2	673,1	679,5	682,0	672,0	687,2

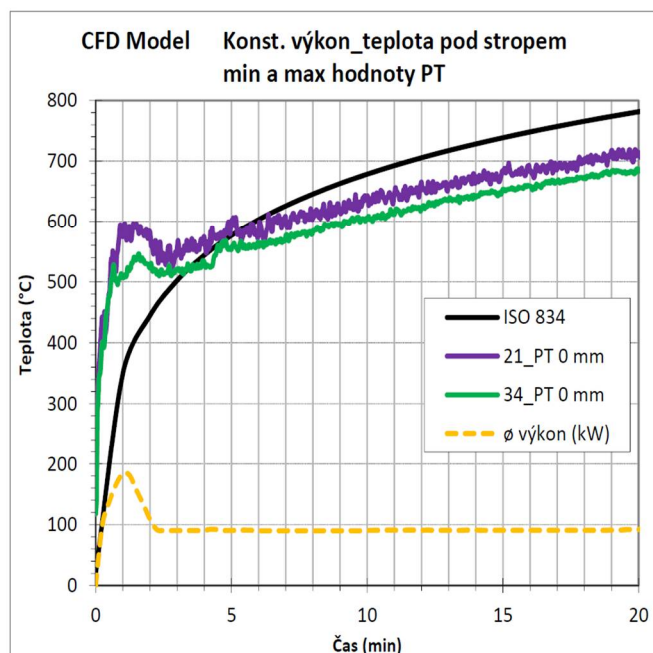
  

rozdíl mezi ø PT a TC	22,9	26,0	25,8	22,2	27,8	31,7	33,5	29,0	24,9	26,4	25,7	23,2	26,6
-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Z tab. 22 lze dále vyčíst, že průměrné teploty vypočítané na PT jsou nižší a to v průměru o 23,2 °C až 33,5 °C, než teploty počítané pomocí TC. Dále jsou v tabulkách uvedeny teploty v 15. minutě, která má být dle normové teplotní křivky 739 °C. Průměrná teplota PT je 664,1 °C, což je o 74,9 °C méně než je hodnota normové teplotní křivky a průměrná teplota TC je 687,2 °C, takže rozdíl je 51,8 °C. To znamená, že při 30% výkonu hořáků není v peci dosahováno teplot normové teplotní křivky, což je vidět i na grafu 18. Je vidět, že rozdíl mezi teplotami vypočítanými na TC a PT je relativně malý, což je jasně patrné i z grafu 18, kde jsou zakresleny maximální a minimální naměřené teploty. Pro porovnání je v grafu znázorněn i průběh normové teplotní křivky (černá křivka). Křivky TC mají rychlejší nárůst teplot, již v 1. min narůstá teplota nad 600 °C, zatímco na PT zůstává pod 600 °C. Nicméně můžeme vidět, že průběh minimální teploty na TC\_60 (modrá barva) a maximální teploty na PT\_21 (fialová barva) je téměř shodný.



a) TC 250 mm pod stropem

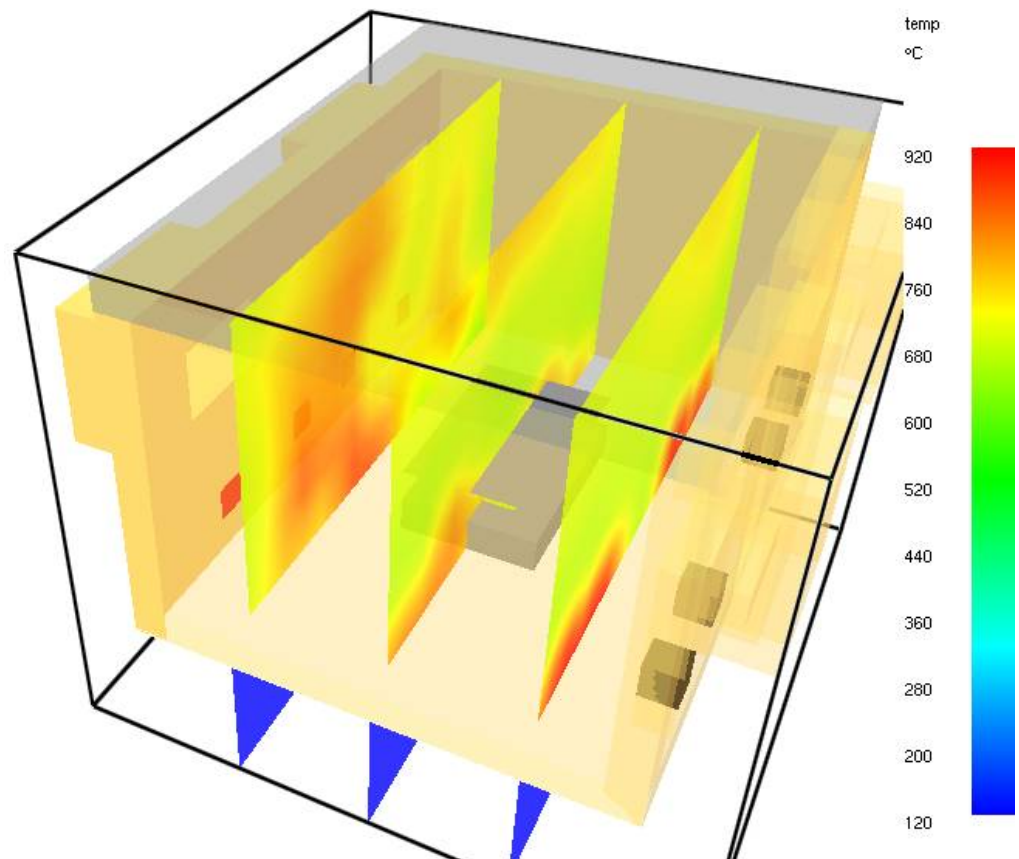
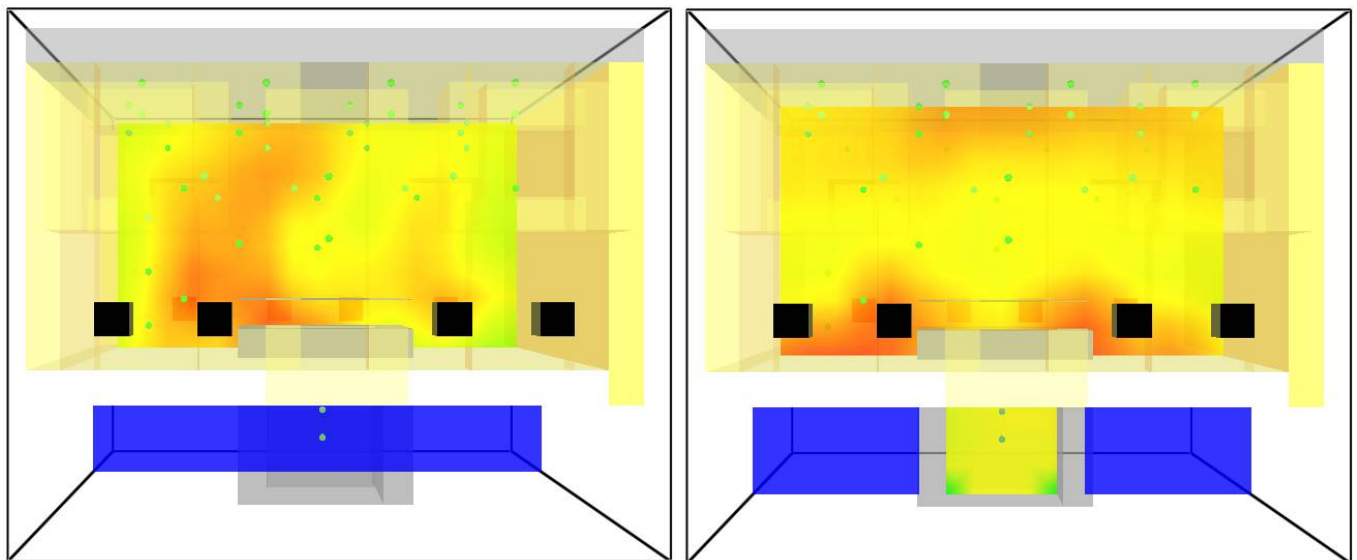


b) PT (AST na spodní straně stropu)

Graf 18: Průběh max. a min. teplot vypočítaných na PT a TC pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky



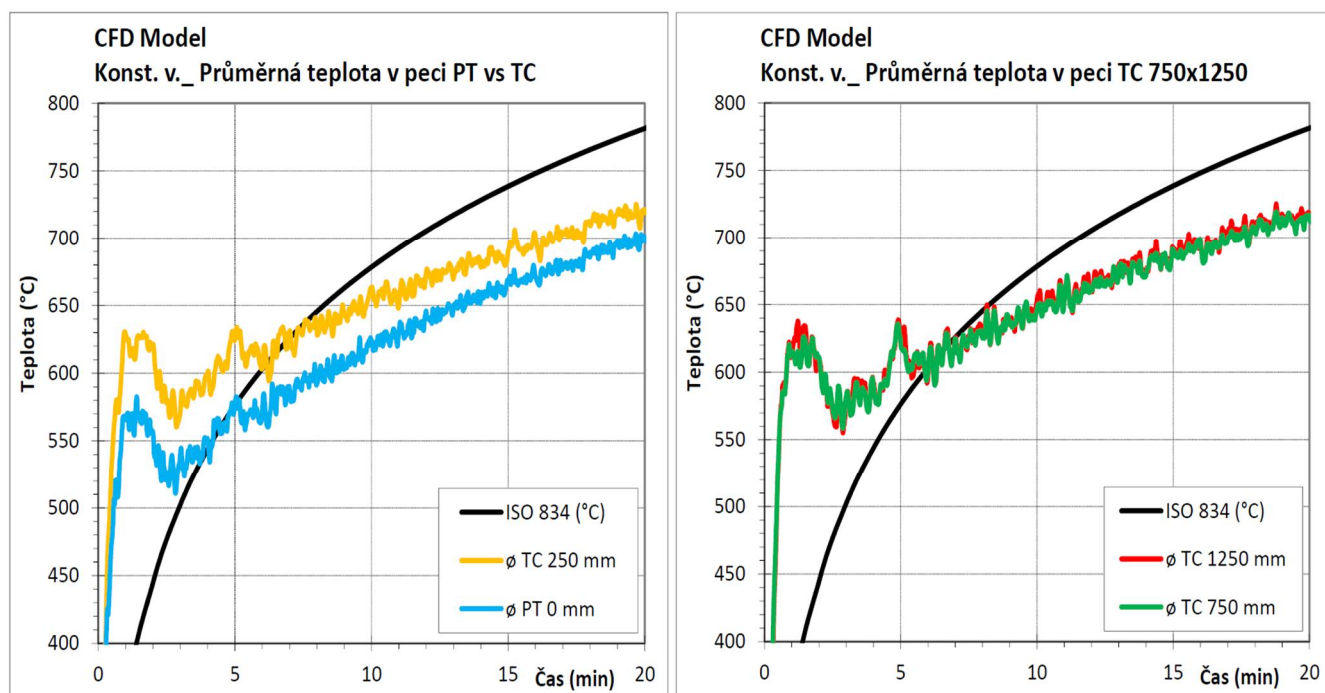
## 4.2.2.4 Konstantní výkon – teploty po výšce modelu

a) Pohled do virtuální pece – teplotní řezy v ose  $y = 0,75; 1,75; 2,75$  mb) Teplota po výšce ŘEZ A1-A1' ( $y = 2,75$  m)c) Teplota po výšce ŘEZ C-C' ( $y = 1,75$  m)

Obr. 51: Teploty po výšce CFD modelu v ose  $y$  - vypočítané na TC v 15. min, nastavení podle 2.zkoušky

Z grafu 19 je možné vyčíst, že průběhy teploty neklesají dle očekávání s narůstající vzdáleností od hořáků, ale jsou téměř shodné. To znamená, že v CFD modelu nastaveného podle 2. zkoušky je téměř dosaženo rovnoměrného rozložení teplot po výšce pece. Rovnoměrné rozložení teplot je patrné i z obr. 51, kde jsou zobrazeny teploty v řezech A1-A1', A2-A' a C-C'. Ve středu pece

(ŘEZ C-C') je teplota téměř stejná po celé výšce, pouze ve střední úrovni je o něco málo nižší. Zatímco v krajních řezech je patrný vliv hořáků, což se projevuje oblastmi s vyššími teplotami (znázorněné červenou barvou).



a) Teploty pod stropem

b) Teploty ve středu pece a nad hořáky

Graf 19: Průběh teplot vypočítaných po výšce modelu: PT (AST na stropě) a TC – 250 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky

Průměr teplot po výšce virtuální pece je počítán, stejně jako v případě reálné pece z vybraných termočlánků, viz kapitolu 3.4.3.2 a obr. 34, vyjma PT číslo 24, 29 a 35 umístěných ve střední úrovni (750 mm pod stropem), protože AST lze počítat pouze na povrchu konstrukcí.

V grafu 19 můžeme vidět v prvních 4 min od začátku zkoušky velké teplotní výkyvy, ty jsou způsobeny velkými výkyvy výkonů v začátku 2. zkoušky, podle které jsou nastaveny výkony hořáků v CFD modelu pece. Z důvodu velkých výkyvů teplot v prvních 4 min a následného ustálení průběhu je průměr teplot počítán z hodnot naměřených až od 4. min viz tab. 23tab. 20.

Teploty TC vypočítané 1250 mm pod stropem, což je 1,0 m nad podlahou, jsou průměrně o  $-3,3$  °C nižší než teploty 250 mm pod stropem. Ve střední měřící rovině tj. 1,5 m nad podlahou (0,875 m nad hořáky) je teplota průměrně o  $2,6$  °C nižší než ve spodní rovině, která se nachází o 0,5 m níže. Teploty pod stropem jsou průměrně o  $6,0$  °C vyšší než ve střední úrovni. Z těchto rozdílů je patrné, že nejnižší teploty jsou vypočítány 750 mm pod stropem, což potvrzuje i obr. 51, kde jsou vidět v ŘEZU C-C' nad hořáky a pod stropem oblasti s vyššími teplotami (červená barva), zatímco ve střední výškové úrovni je rozložení teplot rovnoměrné. Nicméně můžeme říct, že rozdíly mezi výškovými úrovněmi jsou prakticky zanedbatelné, protože oblasti s vyššími



teplotami se vyskytují pouze lokálně v blízkosti sálavých ploch (hořáky, nahřáté obvodové konstrukce, ocelová deska nad otvorem).

V případě PT jsou teploty v horní úrovni průměrně o 29,2 °C nižší než teploty vypočítané na TC 250 mm pod stropem, viz tab. 23, tab. 20. V grafu 19 můžeme pozorovat s časem se snižující rozdíl teplot vypočítaných na TC a PT. V prvních 2 min se rozdíl pohybuje okolo 65 °C, ve 3. min klesá na hodnotu 30,9 °C a dál se rovnoměrně snižuje až do konce zkoušky na 10,0 °C ve 30. min.

Tab. 23: Přehled rozdílů teplot po výšce vypočítaných na TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	ø od 4.min
ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
TC 250 mm	118,0	629,8	621,4	571,0	599,4	626,1	663,0	690,5	721,0	742,6	762,8	---
TC 750 mm	118,0	612,6	610,7	582,6	591,7	618,5	645,9	690,6	713,7	743,5	759,6	---
TC 1250 mm	118,0	613,6	608,7	577,1	592,4	621,5	652,2	690,9	714,1	747,9	763,0	---
rozdíl TC 250x750	0,0	-17,2	-10,6	11,6	-7,7	-7,6	-17,1	0,1	-7,3	0,9	-3,2	-6,0
rozdíl TC 750x1250	0,0	1,0	-2,0	-5,5	0,7	2,9	6,2	0,3	0,5	4,3	3,4	2,6
rozdíl TC 250x1250	0,0	-16,2	-12,6	6,1	-7,0	-4,6	-10,9	0,4	-6,8	5,3	0,2	-3,3
PT 0 mm	118,0	565,7	555,6	540,1	551,9	578,8	624,3	668,9	698,2	726,1	752,8	---
rozdíl TC 250 a PT	0,0	64,1	65,8	30,9	47,5	47,3	38,8	21,5	22,8	16,4	10,0	29,2

Na TC, kterými je počítána teplota plynů, jsou nejvyšší výkyvy naměřeny v 1. min, kdy teplota v horní rovině dosahuje 629,8 °C, ve střední rovině 612,6 °C a ve spodní rovině (1250 mm pod stropem) 613,6 °C, tyto teploty se drží až do 2. min, pak ve 3. min klesají a to v horní rovině o -58,8 °C (na 571,0 °C), ve střední o -30 °C (na 582,6 °C) a ve spodní o -36,5 °C (na 577,1 °C), viz tab. 23.

Na PT umístěných na spodní straně stropní konstrukce je dosaženo nejvyššího výkyvu v 1,4. min, kdy teplota dosahuje 577,5 °C. Ve 3. min teplota klesá o -37,4 °C (na 540,1 °C).

Tab. 24: Rozdíl teplot na PT (AST na stropě) a TC 250 mm a ISO 834, nastavení podle 2.zkoušky

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ISO 834	20,0	349,2	444,5	502,3	543,9	576,4	678,4	738,6	781,4	814,6	841,8
TC 250 mm	118,0	629,8	621,4	571,0	599,4	626,1	663,0	690,5	721,0	742,6	762,8
rozdíl TC od ISO	98,0	280,6	176,9	68,7	55,5	49,7	-15,4	-48,1	-60,4	-72,0	-79,0
PT 0 mm	118,0	565,7	555,6	540,1	551,9	578,8	624,3	668,9	698,2	726,1	752,8
rozdíl PT od ISO	98,0	216,5	111,1	37,8	8,0	2,4	-54,2	-69,6	-83,2	-88,5	-89,0
rozdíl TC x PT	0,0	64,1	65,8	30,9	47,5	47,3	38,8	21,5	22,8	16,4	10,0

Z grafu 19 je patrné, že se teploty ve virtuální peci pohybovaly cca od 7. min pod teplotami normové teplotní křivky, což můžeme vyčíst i z tab. 24.

Teploty vypočítané na PT jsou shodné s teplotami normové teplotní křivky pouze ve 4. a 5. min, což je vidět i v tab. 24 na nízkých hodnotách rozdílu 8 °C a 2,4 °C. Do 2. min teploty na PT stoupají mnohem strměji, viz rozdíl 216,5 °C v 1. min a od 3. min klesají, až se v 10. min dostávají na hodnoty o 54,2 °C nižší, rozdíl teplot vzrůstá až do konce zkouška a to na -89,0 °C ve 30. min.

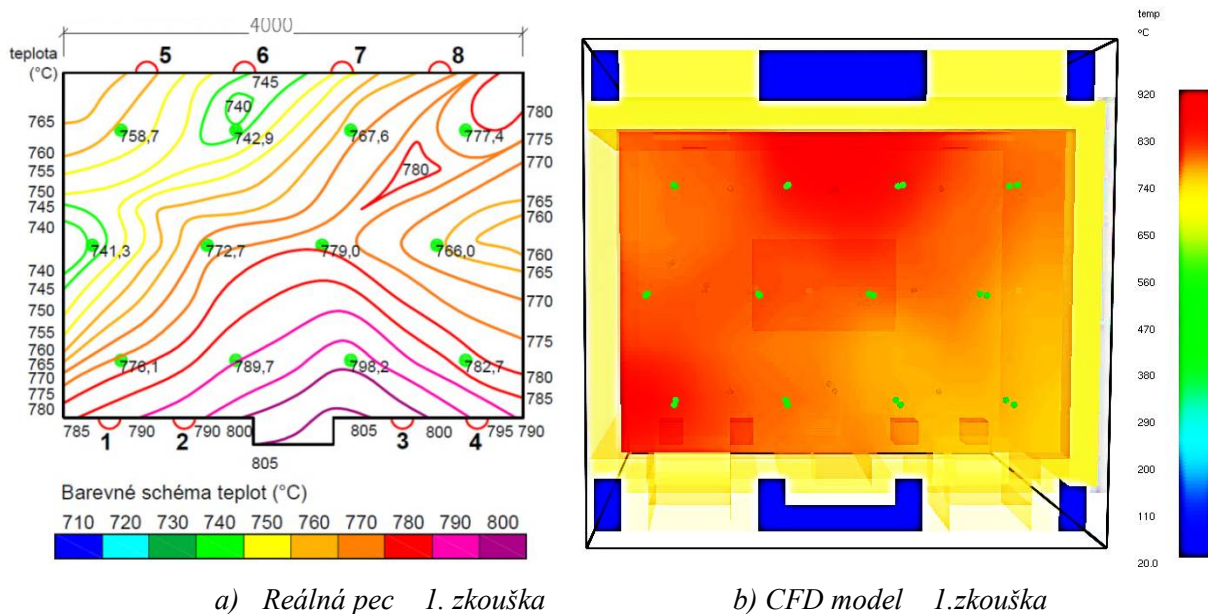
Podobný průběh, ale s nižšími rozdíly teplot můžeme pozorovat i v případě teplot vypočítaných na TC. Nejvyšší rozdíl od normové teplotní křivky je opět v 1. min a 2. min, kdy jsou teploty na TC o 280,6 °C a 176,09 °C vyšší. Oproti tomu je v 5. min teplota na TC vyšší o 49,7 °C a v 10. min již klesá pod hodnoty normové teplotní křivky a to o 15,4 °C. Rozdíl se dál zvětšuje a to až do konce zkoušky na hodnotu -79,0 °C ve 30. min.

## 5 Validace CFD modelu

Vytvoření počítačového modelu reálné zkušební pece vyžaduje následnou validaci chování této virtuální pece se skutečnou zkušební pecí. Měření teploty v modelu pece je simulováno numericky metodou CFD. Tato kapitola je věnována ověření správného fungování virtuálního modelu pece pomocí teplot naměřených při požárních zkouškách provedených ve vodorovné peci H2 v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí, která byla předlohou virtuálního modelu.

### 5.1 Normová teplotní křivka – teploty pod stropem

Na obr. 52 je zobrazen půdorys reálné a virtuální pece s vyznačením teplot zaznamenaných na TC pod stropem v 15. min. V případě reálné pece jsou TC umístěny 100 mm pod stropem a v případě CFD modelu z důvodu hrubosti sítě 250 mm pod stropem. Z půdorysů je vidět, že nejchladnější a nejteplejší oblasti se v obou případech liší, což potvrzují i hodnoty průměrných teplot, viz. tab. 25. Z níž lze vyčíst, že v **15. min** byla v reálné peci pod stropem naměřena **průměrná teplota** na TC = 771,0 °C a na PT = 734,1 °C (rozdíl TC-PT = 36,9 °C). V CFD modelu pak byla vypočtena průměrná teplota na TC = 780,8 °C a na PT = 760,4 °C (rozdíl TC-PT = 20,4 °C). V CFD modelu je vypočten o 16,5 °C nižší rozdíl mezi teplotami měřenými na TC a PT, dále je na TC i PT vypočtena vyšší teplota a to na **TC o 9,8 °C** a na **PT o 26,3 °C**. Rozdíl na TC je téměř zanedbatelný a lze říct, že si teploty v reálné a virtuální peci odpovídají. Na PT je rozdíl vyšší a z výsledků je patrné, že v reálné peci měří PT nižší teploty než, které jsou vypočítány v CFD modelu, kde jsou si výsledky na TC a PT bližší.



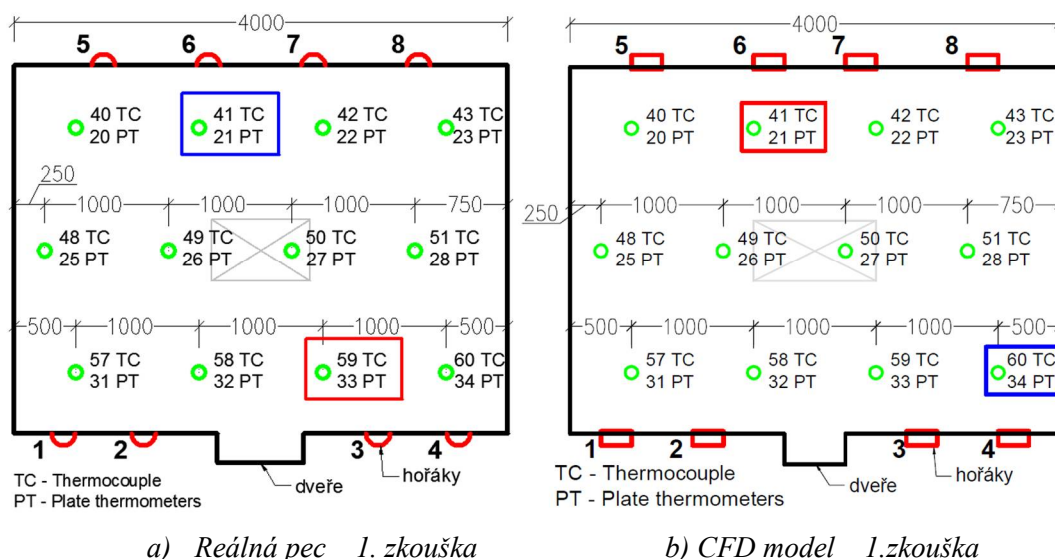
Obr. 52: Půdorys pece – teploty na TC pod stropem v 15. min, 1. zkouška

Dále je možné z půdorysného rozložení teplot pod stropem (viz obr. 52) vyčíst rozmístění nejteplejších a nejchladnějších oblastí. V půdorysu reálné pece jsou nejteplejší oblasti u dveří a

v pravém horním rohu, nejchladnější oblasti se nacházejí v blízkosti středu horní a levé stěny. Zatímco v CFD modelu je situace přesně opačná, nejteplejší oblast je ve středu horní stěny a levém spodním rohu a nejchladnější pak v blízkosti pravého spodního rohu. Toto tvrzení potvrzuje i obr. 53, kde jsou vyznačeny měřící body s min. a max. průměrnými teplotami.

Vliv na rozdílné rozložení teplot má jistě také to, že v CFD modelu jsou spaliny odváděny přirozeně, zatímco v reálné peci ventilátorem, lze předpokládat, že by se po doplnění ventilátoru do CFD modelu rozložení teplot mohlo změnit.

Dalším důležitým rozdílem jsou výkony hořáků. V reálné peci je výkon každého hořáku regulován samostatně podle teploty na řídicím PT, výkony jsou tedy odlišné. Zatímco v CFD modelu je nastaven výkon všech hořáků stejně a to podle průměrné hodnoty výkonů ze všech 8mi hořáků naměřených při 1. zkoušce. Lze předpokládat, že v případě nastavení rozdílného výkonu na každém hořáku podle 1. zkoušky bude rozložení teploty v CFD modelu odlišné.



Obr. 53: Půdorysné rozmístění TC a PT pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník), 1. zkouška

V tab. 25 jsou uvedeny vybrané termočlánky, na kterých je při 1. zkoušce naměřena a v CFD modelu nastaveného podle této zkoušky vypočtena max. a min. průměrná teplota pod stropem. Pro přehlednost jsou tato místa vyznačena na zjednodušených půdorysech pece, viz obr. 53. Červené obdélníky vyznačují místa s nejvyšší teplotou a modré naopak s nejnižší.

**Nejnižší průměrná teplota** je při 1. zkoušce naměřena na  $PT_{21} = 669,1 \text{ } ^\circ\text{C}$  a na  $TC_{41} = 723,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  (rozdíl TC-PT =  $54,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) a v CFD modelu je vypočítána na  $PT_{34} = 724,8 \text{ } ^\circ\text{C}$  a na  $TC_{60} = 743,9 \text{ } ^\circ\text{C}$  (rozdíl TC-PT =  $19,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Rozdíl mezi nejchladnějšími místy pod stropem v CFD modelu a při 1. zkoušce je tedy pro PT =  $724,8 - 669,1 = 55,7 \text{ } ^\circ\text{C}$  a pro TC =  $743,9 - 723,4 = 20,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Nejvyšší průměrnou teplotu** software vypočítal na  $PT_{21} = 754,1 \text{ } ^\circ\text{C}$  a na  $TC_{41} = 777,7 \text{ } ^\circ\text{C}$  (rozdíl TC-PT =  $23,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), při 1. zkoušce je nejvyšší průměrná teplota naměřena na  $PT_{33} = 709,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  a na  $TC_{59} = 763,8 \text{ } ^\circ\text{C}$  (rozdíl TC-PT =  $54,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Rozdíl mezi nejteplejšími



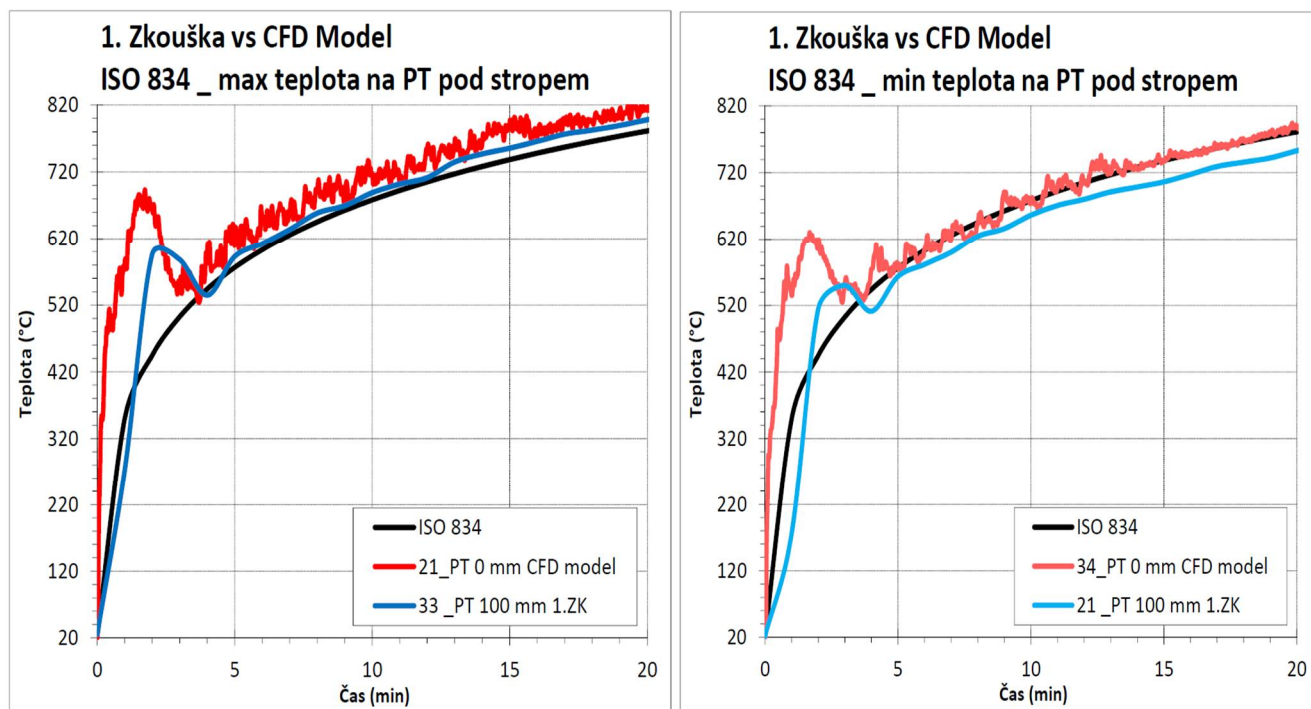
místy pod stropem v CFD modelu a při 1. zkoušce je tedy pro PT =  $754,1 - 709,4 = 44,7 \text{ °C}$  a pro TC =  $777,7 - 763,8 = 13,9 \text{ °C}$ .

Tab. 25: Přehled teplot na vybraných PT a TC pod stropem, 1.zkouška

TERMOČLÁNKY	1. Zkouška						1. CFD model					
	100 mm	MIN	MAX	100 mm	MIN	MAX	0 mm	MIN	MAX	250 mm	MIN	MAX
	∅ PT	21 PT	33 PT	∅ TC	41 TC	59 TC	∅ PT	34 PT	21 PT	∅ TC	60 TC	41 TC
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
∅ průměrná	690,8	669,1	709,4	741,4	723,4	763,8	734,9	724,8	754,1	756,9	743,9	777,7
maximální	850,3	827,3	862,0	875,3	866,5	891,3	875,6	866,5	893,2	880,6	871,2	894,4
minimální	22,5	21,6	24,8	193,6	141,8	264,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
rozdíl od ∅ tepl.	/	-21,7	18,6	/	-18,0	22,4	/	-10,0	19,2	/	-13,0	20,7
teplota v 15.min	734,1	706,5	755,6	771,0	742,9	798,2	760,4	737,9	797,5	780,8	746,9	819,4

Rozdíly průměrných teplot na TC a PT potvrzují výše zmíněné tvrzení a tedy, že v případě CFD modelu jsou si teploty vypočítané na TC a PT bližší, jejich rozdíl se pohybuje okolo  $10 - 20 \text{ °C}$ , zatímco při 1. zkoušce v reálné peci se tento rozdíl pohybuje okolo  $50 \text{ °C}$ . Tato skutečnost se projevuje na vyšším rozdílu mezi průměrnými teplotami naměřenými při 1. zkoušce a vypočítanými v CFD modelu na PT, který je pro min. teplotu =  $55,7 \text{ °C}$  a max. teplotu =  $44,7 \text{ °C}$ . Lze tedy tvrdit, že teploty na PT jsou v CFD modelu průměrně o desítky  $\text{°C}$  vyšší než při reálné zkoušce, viz graf 20. Průměrné teploty na TC jsou v CFD modelu také vyšší než při reálné zkoušce, ale rozdíly jsou téměř zanedbatelné a průběhy teplot jsou téměř shodné, viz graf 21.

Průběhy teplot na vybraných termočláncích v tab. 25 jsou zobrazeny PT v grafu 20 a TC v grafu 21.



a) Max. teploty pod stropem

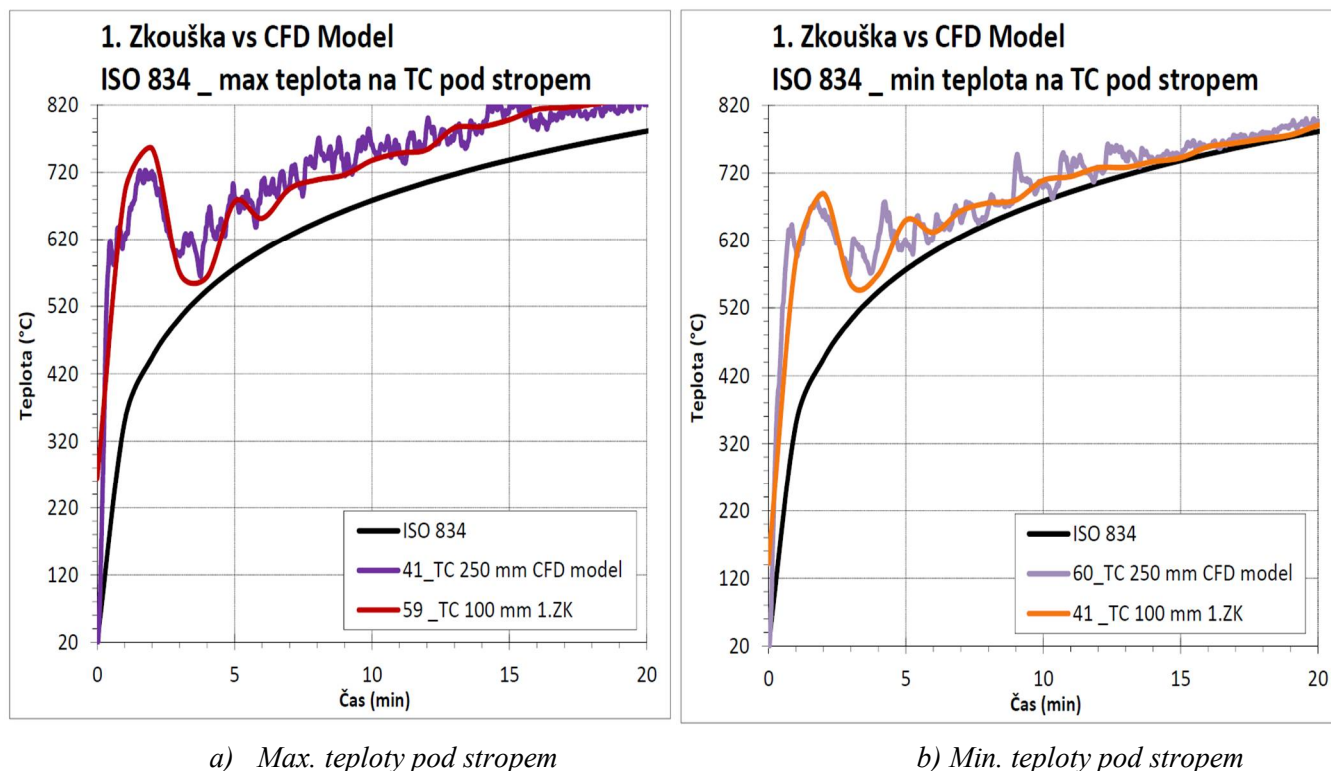
b) Min. teploty pod stropem

Graf 20: Průběh max. a min. teplot na PT pod stropem, 1.zkouška



Jak již bylo řečeno výše, jsou teploty vypočítané v CFD modelu na PT vyšší než teploty naměřené na PT při 1. zkoušce. V grafu 20 je červenou barvou zobrazen průběh teplot vypočítaných na **PT v CFD modelu** (max. teploty červenou a min. teploty světle červenou křivkou), na první pohled je patrné, že tyto teploty mají méně plynulý průběh a vyšší výkyvy od průměru než teploty měřené na **TC při 1. zkoušce**, v grafu zakreslené modrými křivkami (max. teploty tmavě modrou a min. teploty světle modrou). V grafu je možné vidět, že teploty v CFD modelu narůstaly v prvních minutách na rozdíl od experimentu mnohem strměji než teploty na normové teplotní křivce, ale v obou případech došlo k ustálení průběhu do 5 min od začátku zkoušky a v obou případech byla počáteční teplota okolo 20 °C. Na křivkách teplot vypočítaných v CFD modelu je také patrné další výrazné „zklidnění“ průběhu od 15. min.

Zajímavé také je, že téměř ve stejném místě v půdorysu pece je naměřena max. teplota při experimentu (na PT\_33 = 609,3 °C, tmavě modrá v grafu 20 a) a min. teplota vypočtená v CFD modelu (na PT\_34, světle červená v grafu 20 b)), viz obr. 53. Průběh těchto teplot je téměř shodný a téměř přesně kopíruje průběh normové teplotní křivky, viz graf 20.



Graf 21: Průběh max. a min. teplot na TC pod stropem, 1. zkouška

V grafu 21 je na průběhu teplot jasně vidět, že rozdíly mezi hodnotami vypočítanými na TC v CFD modelu a naměřenými při 1. zkoušce jsou téměř zanedbatelné. V grafu 21 je tmavě červenou křivkou zobrazen průběh max. teplot a oranžovou křivkou pak průběh min. teplot naměřených na TC při 1. zkoušce. Dále jsou v grafu fialovými křivkami (max. teploty tmavě fialovou a min. teploty světle fialovou) zakreslené teploty vypočítané na TC v CFD modelu, na první pohled je patrné, že tyto teploty mají méně plynulý průběh a vyšší výkyvy od průměru než teploty měřené na TC při 1. zkoušce. V grafu je možné vidět, že teploty při experimentu

narůstaly v prvních minutách na rozdíl od teplot na PT (viz graf 20) shodně s teplotami vypočítanými v CFD modelu a zároveň mnohem strměji než teploty na normové teplotní křivce. V obou případech došlo k ustálení průběhu teplot do 5 min od začátku zkoušky, navíc je na křivkách teplot vypočítaných v CFD modelu patrné další výrazné „zklidnění“ průběhu od 15. min. Výrazný rozdíl je ale v počáteční teplotě, kde v CFD modelu začínají vypočítané hodnoty na TC na předepsané teplotě okolí 20 °C, zatímco při experimentu je v čase 0 min na TC teplota v rozmezí 125,9 - 264,5 °C, viz tab. 9.

Výkony hořáků jsou v CFD modelu nastaveny podle 1. zkoušky, která reprezentuje nejběžnější způsob zkoušení požární odolnosti konstrukcí ve vodorovné peci, kdy je teplota v peci v nejvyšší úrovni pod stropem udržována na hodnotách normové teplotní křivky. V tab. 26 je provedeno srovnání teplot normové teplotní křivky a průměrných teplot na TC a PT pod stropem naměřených při 1. zkoušce a vypočítaných v CFD modelu nastaveného podle této zkoušky.

Tab. 26: Rozdíl průměrných teplot na TC a PT pod stropem + srovnání s ISO 834, 1.zkouška

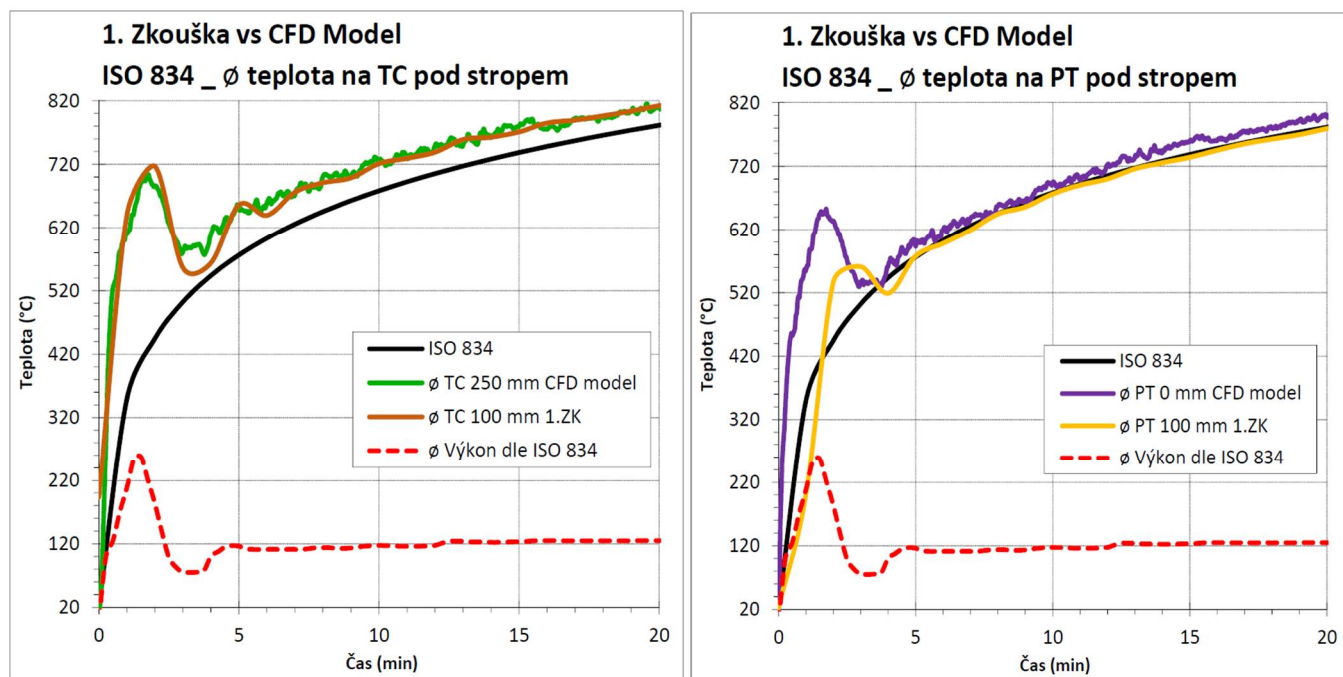
ČAS	0 min	1 min	1,5 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ISO 834	20,0	404,3	349,2	444,5	502,3	543,9	576,4	678,4	738,6	781,4	814,6	841,8
1.ZK TC 100 mm	193,6	639,7	678,4	717,2	556,4	563,8	656,0	721,1	771,0	812,2	841,9	865,3
rozdíl od ISO 834	173,6	235,4	329,2	272,7	54,2	20,0	79,6	42,7	32,5	30,9	27,3	23,5
1.CFD TC 250 mm	20,0	610,7	689,7	686,4	582,7	607,6	648,9	725,1	780,8	809,1	846,0	869,9
rozdíl od ISO 834	0,0	206,4	340,5	241,9	80,4	63,8	72,5	46,6	42,2	27,7	31,4	28,1
rozdíl mezi TC	173,6	28,9	-11,3	30,8	-26,3	-43,8	7,0	-3,9	-9,8	3,2	-4,1	-4,6
1.ZK PT 100 mm	22,5	200,6	368,6	536,7	561,1	519,0	578,1	676,5	734,1	779,1	813,5	838,2
rozdíl od ISO 834	2,5	-203,7	19,4	92,2	58,9	-24,9	1,6	-1,9	-4,5	-2,2	-1,1	-3,6
1.CFD PT 0 mm	20,0	557,5	644,5	634,3	534,9	560,8	593,4	695,2	760,4	797,4	838,1	865,3
rozdíl od ISO 834	0,0	153,2	295,3	189,8	32,6	17,0	17,0	16,7	21,9	16,0	23,5	23,5
rozdíl mezi PT	2,5	-356,9	-275,8	-97,6	26,2	-41,8	-15,3	-18,7	-26,3	-18,3	-24,5	-27,1
Ø VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
1.ZK výkon - ISO 834	0,0	208,2	257,7	183,4	75,5	100,2	116,1	117,4	123,3	125,0	123,7	123,7

Z tab. 26 je možné vyčíst, že rozdíly v čase mezi průměrnými teplotami zjištěnými na TC jsou od ustálení průběhu v 5. min velice malé a pohybují se okolo  $\pm 10$  °C, což se projevuje i na odchylce od hodnot normové teplotní křivky, které se pro oba případy od 5. min liší pouze v desítkách °C. Lze tedy říct, že v obou případech je rozdíl mezi teplotami na TC a normovou teplotní křivkou v 5. min přibližně 75 °C a tento rozdíl se průběžně snižuje až do konce zkoušky ve 30. min na hodnotu okolo 25 °C, tento průběh je možné vyčíst i z grafu 22. Dále je vidět, že v čase 0 min je průměrná počáteční teplota na TC při 1. zkoušce 193,6 °C, zatímco v CFD modelu je shodná s předepsanou teplotou okolního prostředí 20 °C a tedy i s hodnotou normové teplotní křivky. V další minutě se ale teploty vyrovnávají a od 1. min do 4. min se rozdíly průměrných teplot na TC pohybují okolo  $\pm 40$  °C. V 1. min až 3. min jsou teploty na TC v obou případech o 200 °C až 340 °C vyšší než teploty normové teplotní křivky a ve 4. min se tento rozdíl výrazně sníží na 54,2 °C v případě experimentu a na 80,4 °C v případě CFD modelu. Průběh průměrných teplot na TC je vykreslen v grafu 22 a), kde je zelenou barvou zobrazen průběh vypočítaný v CFD modelu, na kterém je jasně patrné, že průběh průměrné teploty je

mnohem plynulejší než průběh max. a min. teploty v grafu 21. Dále je hnědou barvou vykreslen průběh průměrné teploty naměřené při 1. zkoušce, černou barvou normová teplotní křivka a červenou čárkovanou křivkou průměrný výkon při 1. zkoušce.

Déle jsou v tab. 26 uvedeny rozdíly v čase mezi průměrnými teplotami zjištěnými na **PT**, kde jsou teploty naměřené při 1. zkoušce od ustálení průběhu v 5. min přibližně o 20 °C nižší než teploty vypočítané na PT v CFD modelu. Což je možné vidět i na průběhu těchto teplot v grafu 22 *b*), kde je fialovou barvou zobrazen průběh vypočítaný v CFD modelu, na kterém je stejně jako v případě TC jasně patrné, že průběh průměrné teploty na PT je mnohem plynulejší než průběh max. a min. teploty v grafu 20. Dále je žlutou barvou vykreslen průběh průměrné teploty naměřené při 1. zkoušce, černou barvou normová teplotní křivka a červenou čárkovanou křivkou průměrný výkon při 1. zkoušce. V grafu je možné vidět, že průměrná teplota vypočítaná v prvních 5ti min na PT v CFD modelu má podobnější průběh jako teploty zjištěné na TC (viz graf 22 *a*)), než jako průměrná teplota naměřená na PT při 1. zkoušce, což potvrzují i vysoké hodnoty rozdílů teplot na PT, viz tab. 26, kde je průměrná teplota na PT při 1. zkoušce nižší a to v 1. min o -356,9 °C; ve 2. min o -275,8 °C a ve 3. min o -97,6 °C. Dále je vidět, že v čase 0 min je průměrná počáteční teplota na PT při 1. zkoušce 22,5 °C, což je pouze o 2,5 °C více než v CFD modelu, kde je shodná s předepsanou teplotou okolního prostředí 20 °C a tedy i s hodnotou normové teplotní křivky.

Z grafu 22 *b*) lze dále vyčíst, že od ustálení průběhu v 5. min je průměrná teplota naměřená na PT při 1. zkoušce nižší a to o 1,1 – 4,5 °C než teplota normové teplotní křivky. V případě teploty vypočítané na PT v CFD modelu dochází k ustálení průběhu okolo 3. min a teplota je naopak vyšší než hodnoty normové teplotní křivky a to o 16,7 – 32,6 °C. Je možné říct, že od 3. min se průměrná teplota vypočítaná na PT ve virtuální peci pod stropem, tedy v místě, kde to požaduje norma, pohybuje v normou stanoveném rozmezí teplot normové teplotní křivky  $\pm 100$  °C. Nicméně v prvních 3 min tuto podmínku překračuje, stejně jako max. povolenou procentní odchylku ( $d_e$ ) v ploše křivky průměrné teploty, z plochy normové teplotní křivky, která musí být dle normy ČSN EN 1363-1 v rozmezí 15% pro čas  $5 < t \leq 10$  minut, viz kapitolu 3.4.1.


 a)  $\varnothing$  teploty na TC pod stropem

 b)  $\varnothing$  teploty na PT pod stropem

Graf 22: Průběh průměrných teplot na TC a PT pod stropem, 1.zkouška

## 5.2 Normová teplotní křivka – teploty po výšce

Validace teplot vypočítaných pod stropem v úrovni 0 mm na PT a 250 mm na TC pro CFD model pomocí teplot naměřených pod stropem v úrovni 100 mm na PT i TC při 1. zkoušce je provedena v kapitole 5.1. Proto se tato kapitola zaměří pouze na výsledky teplot z termočlánků umístěných v úrovních 750 mm a 1250 mm pod stropem.

Hodnoty průměrných teplot po výšce uvedené v tab. 27 a zakreslené v grafu 23 jsou opět počítané z vybraných termočlánků, viz kapitolu 3.4.3.2 a obr. 34, vyjma PT číslo 24, 29 a 35, které jsou umístěné ve střední úrovni (750 mm pod stropem) a nelze je v CFD modelu simulovat pomocí AST, kterou lze měřit pouze na povrchu konstrukcí.

 Tab. 27: Přehled rozdílů  $\varnothing$  teplot po výšce na TC 750 mm a 1250 mm pod stropem, 1.zkouška

ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	$\varnothing$ od 3.min
$\varnothing$ TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1.ZK TC 750 mm	235,1	714,6	777,4	587,5	590,5	699,7	738,3	782,6	823,0	849,9	872,4	---
1.CFD TC 750 mm	20,0	628,2	687,5	576,2	607,8	645,2	749,9	784,1	810,2	851,8	874,7	---
rozdíl TC 750 mm	215,1	86,4	90,0	11,3	-17,3	54,5	-11,6	-1,5	12,8	-1,9	-2,3	-1,5
1.ZK TC 1250 mm	288,3	793,1	827,3	587,8	614,4	742,1	783,7	813,4	850,7	875,6	899,2	---
1.CFD TC 1250 mm	20,0	635,6	680,9	566,6	591,8	640,6	760,0	791,1	812,6	860,4	880,0	---
rozdíl TC 1250 mm	268,3	157,5	146,4	21,2	22,7	101,6	23,8	22,3	38,1	15,2	19,2	23,2
$\varnothing$ VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	---
1.ZK výkon ISO 834	0,0	208,2	183,4	75,5	100,2	116,1	117,4	123,3	125,0	123,7	123,7	---

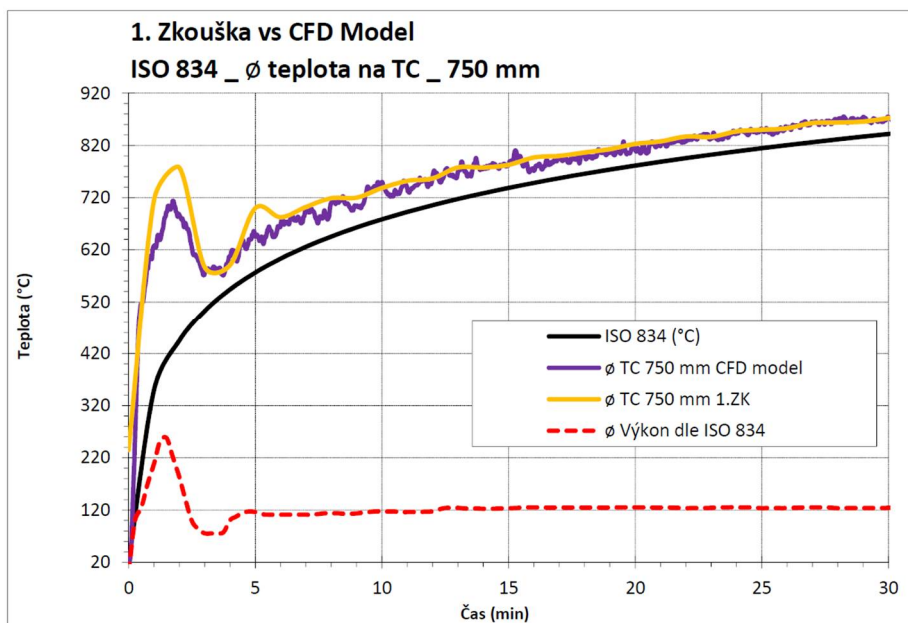
V tab. 27 je možné vidět, že se průměrné teploty vypočítané v obou výškových úrovních na TC v CFD modelu liší pouze v desítkách °C a jejich průběhy jsou téměř shodné, viz graf 17 b). Naopak teploty naměřené při experimentu se v jednotlivých výškových úrovních výrazně liší,



viz graf 9. Nicméně je v obou případech průměrná teplota v úrovni 1250 mm (blíže k hořákům) vyšší a to v CFD modelu o 4,8 °C (viz tab. 20) a při 1. zkoušce o 33,2 °C (viz tab. 10).

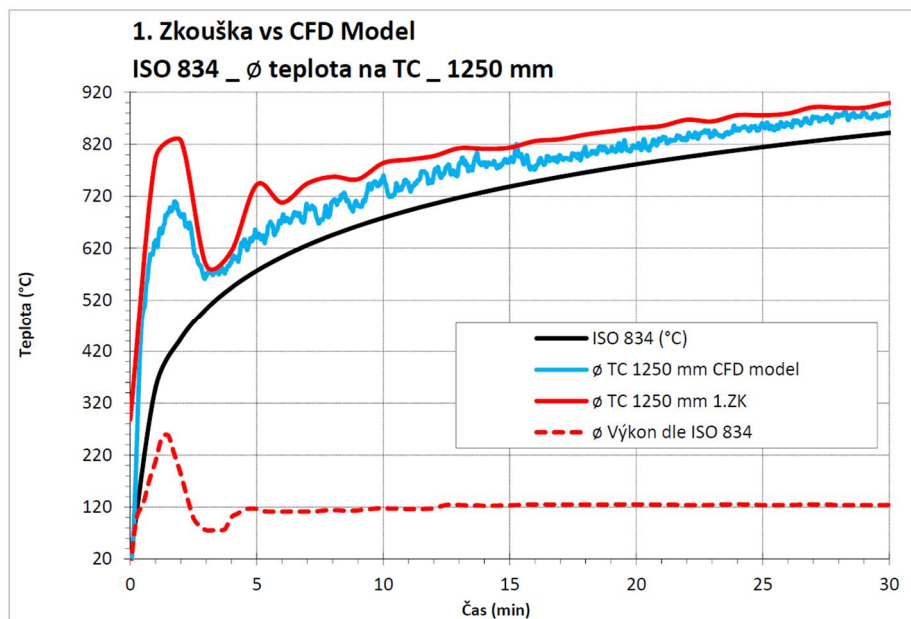
Opět je vidět, že teploty vypočítané na TC v CFD modelu se na začátku výpočtu v čase 0 rovnají předepsané teplotě okolí 20 °C, zatímco při 1. zkoušce je v čase 0 na TC naměřena teplota mnohem vyšší a to 235,1 °C v úrovni 750 mm a 288,3 °C v úrovni 1250 mm. V dalších 2 min je patrný výrazný rozdíl mezi  $\varnothing$  teplotami v CFD modelu a při experimentu, který je v úrovni 750 mm v 1. min = 86,4 °C a ve 2. min = 90,0 °C a v úrovni 1250 mm v 1. min = 157,5 °C a ve 2. min = 146,4 °C, tento výrazný rozdíl je dobře patrný i na průběhu průměrných teplot v obou výškových úrovních, viz graf 23. Vyšší rozdíl v úrovni, která je blíž hořákům, je způsoben tím, že v reálné peci jsou teploty v této úrovni ovlivňovány hořáky a teploty jsou zde vyšší, zatímco v CFD modelu jsou teploty po výšce téměř shodné.

V grafu 23 je jasně vidět, že od 3. min jsou průběhy průměrných teplot v obou výškových úrovních velice podobné a v případě střední úrovně (750 mm pod stropem) jsou téměř shodné, kromě 5. min, kdy je na křivkách teplot naměřených při 1. zkoušce výrazný skok. Z tohoto důvodu je průměrný rozdíl počítán od 3. min vyjma 5. min, kdy se rozdíly vyšplhaly ve střední úrovni na 54,5 °C a ve spodní úrovni (1250 mm pod stropem) na 101,6 °C. Z průměrných rozdílů počítaných od 3. min (viz tab. 27) lze vyčíst, že teplota naměřená při 1. zkoušce je ve střední úrovni o **-1,5 °C nižší** a ve spodní úrovni o **23,2 °C vyšší** než teplota vypočítaná v CFD modelu nastaveného podle této zkoušky. Také je jasně patrné, že rozdíl mezi teplotami se s narůstajícím časem snižuje a to zejména na průběhu průměrných teplot v úrovni 1250 mm pod stropem, viz graf 23 b).



a)  $\varnothing$  teploty na TC 750 mm pod stropem



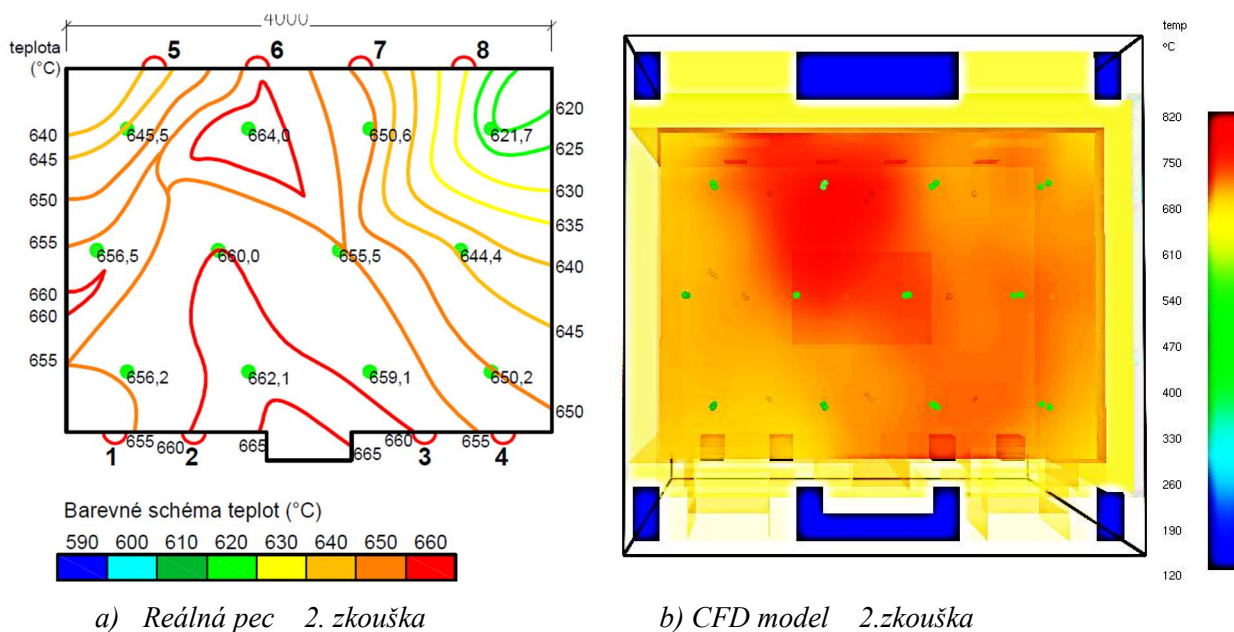


b) ø teploty na TC 1250 mm pod stropem

Graf 23: Průběh průměrných teplot na TC a PT 750 mm a 1250 mm pod stropem, 1. zkouška

### 5.3 Konstantní výkon – teploty pod stropem

Na obr. 54 je zobrazen půdorys reálné a virtuální pece s vyznačením teplot zaznamenaných na TC pod stropem v 15. min. V případě reálné pece jsou TC umístěny 100 mm pod stropem a v případě CFD modelu z důvodu hrubosti sítě 250 mm pod stropem. Z půdorysů je vidět, že nejchladnější a nejteplejší oblasti se v obou případech liší, což potvrzují i hodnoty průměrných teplot, viz tab. 28. Z tabulky lze vyčíst, že v **15. min** je v reálné peci pod stropem naměřena **průměrná teplota** na TC = 645,6 °C a na PT = 597,8 °C (rozdíl TC-PT = **47,8 °C**). V CFD modelu je vypočtena průměrná teplota na TC = 673,2 °C a na PT = 646,6 °C (rozdíl TC-PT = **26,6 °C**). V CFD modelu je vypočten o 21,2 °C nižší rozdíl mezi teplotami měřenými na TC a PT, dále je na TC i na PT vypočtena vyšší teplota a to na **TC o 27,6 °C** a na **PT o 48,8 °C**. Na TC i na PT jsou ve zjištěných teplotách nezanedbatelné rozdíly, ale na PT je rozdíl o 20 °C vyšší než na TC. Tento vyšší rozdíl je způsoben tím, že v reálné peci jsou měřeny na PT nižší teploty, než které jsou vypočítány v CFD modelu, v němž jak je patrné z výsledků v tab. 28 jsou si teploty na TC a PT bližší.



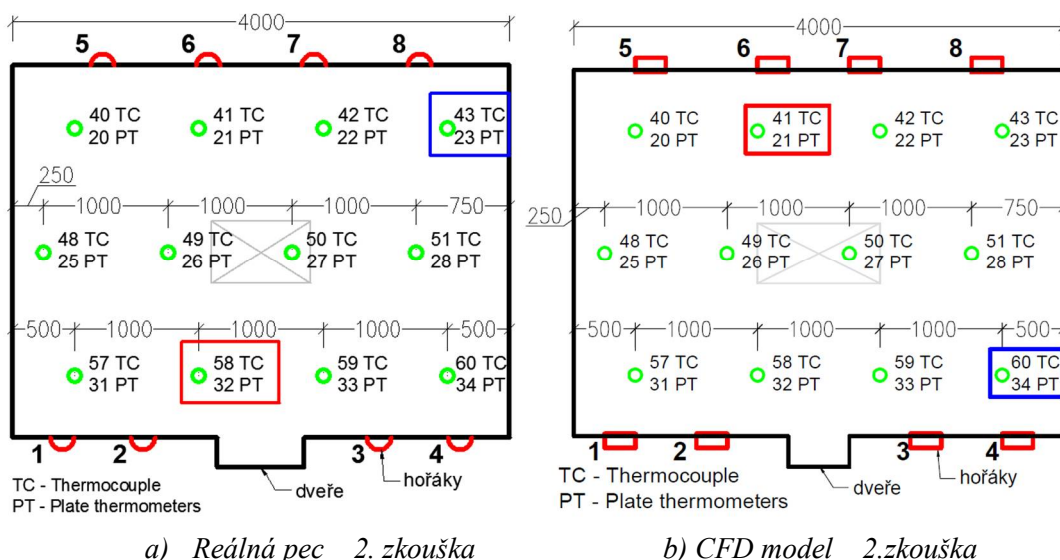
Obr. 54: Půdorys pece – teploty na TC pod stropem v 15. min, 2.zkouška

Dále je možné z půdorysného rozložení teplot pod stropem (viz obr. 54) vyčíst rozmístění nejteplejších a nejchladnějších oblastí. V půdorysu reálné pece jsou nejteplejší oblasti v levých 2/3 pece, zejména pak u dveří a středu horní stěny u hořáku č. 6 a nejchladnější oblast se nachází v pravém horním rohu. V CFD modelu je rozložení teplot podobné, nejteplejší oblast je také ve středu horní stěny a vyšší teploty jsou vypočteny i v oblasti dveří, ale nejchladnější místa se nacházejí v pravém a levém spodním rohu. Toto tvrzení potvrzuje i obr. 55, kde jsou vyznačeny měřící body s min. a max. průměrnými teplotami.

Je zajímavé, že v případě 1. zkoušky je rozmístění nejteplejších a nejchladnějších oblastí po půdorysu reálné pece v 15. min opačné než v případě 2. zkoušky, vyjma oblasti dveří, viz obr. 52. Zatímco v případě CFD modelu je rozložení teploty po půdorysu v 15. min podobné a místa s max. a min. průměrnou teplotou jsou shodná (viz obr. 53).

I přes to, že rozložení teplot po půdorysu pece není příliš rozdílné, je důležité poznamenat, že v CFD modelu jsou spaliny odváděny přirozeně a v reálné peci ventilátorem. Lze předpokládat, že po doplnění ventilátoru do CFD modelu by se rozložení teplot mohlo lišit.

Dalším důležitým rozdílem jsou výkony hořáků. V reálné peci je výkon každého hořáku regulován samostatně podle teploty na řídicím PT. Výkon na každém hořáku je tedy jiný, zatímco v CFD modelu je nastaven výkon všech hořáků stejně a to podle průměrné hodnoty výkonů ze všech 8mi hořáků naměřených při 2. zkoušce. Lze předpokládat, že pokud by byl na každém hořáku nastaven rozdílný výkon podle 2. zkoušky, bylo by jiné i rozložení teploty v CFD modelu.



Obr. 55: Půdorysné rozmístění TC a PT pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník), 2. zkouška

V tab. 28 jsou uvedeny vybrané termočlánky, na kterých je při 2. zkoušce naměřena a v CFD modelu nastaveného podle této zkoušky vypočtena max. a min. průměrná teplota pod stropem. Pro přehlednost jsou tato místa vyznačena na zjednodušených půdorysech pece, viz obr. 55. Červené obdélníky vyznačují místa s nejvyšší teplotou a modré naopak s nejnižší.

**Nejnižší průměrná teplota** při je 2. zkoušce naměřena na **PT<sub>23</sub> = 584,7 °C** a na **TC<sub>43</sub> = 616,9 °C** (rozdíl TC-PT = **32,2 °C**) a v CFD modelu je vypočítána na **PT<sub>34</sub> = 635,7 °C** a na **TC<sub>60</sub> = 658,9 °C** (rozdíl TC-PT = **23,2 °C**). Rozdíl mezi nejchladnějšími místy pod stropem v CFD modelu a při 2. zkoušce je tedy pro PT =  $635,7 - 584,7 = 51,0$  °C a pro TC =  $658,9 - 616,9 = 42$  °C.

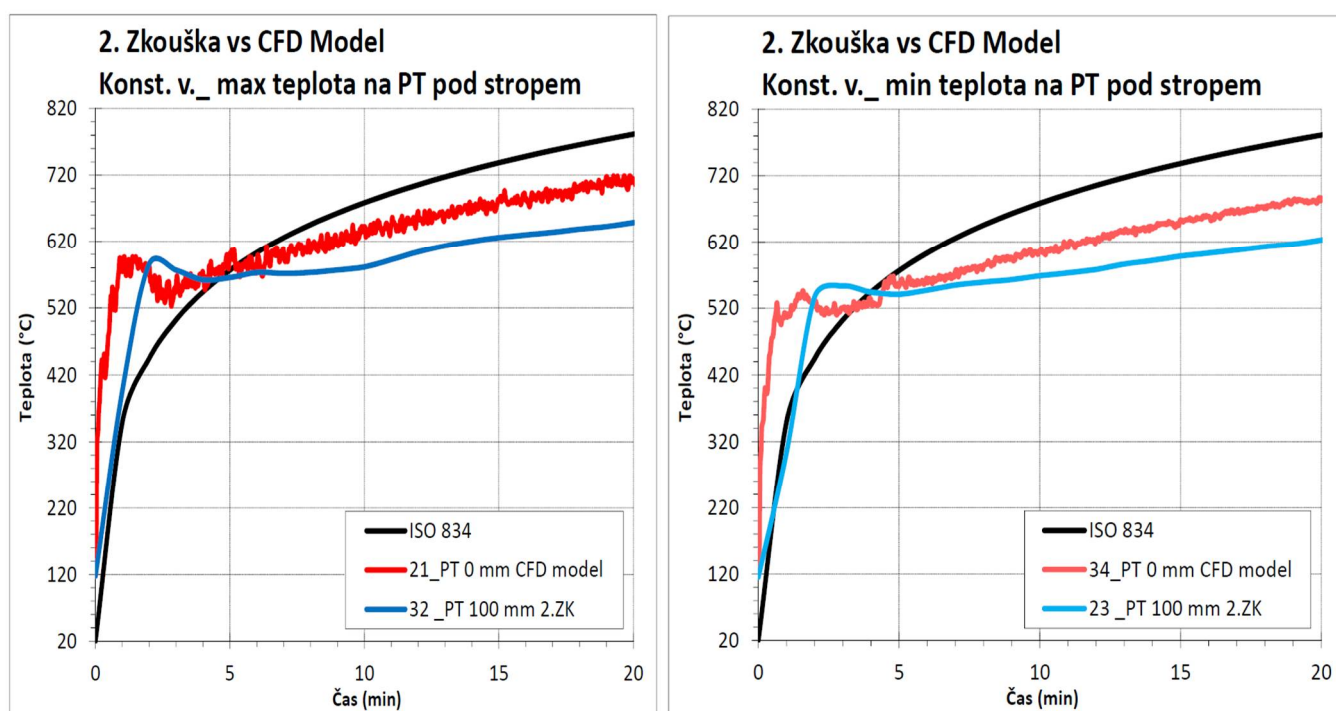
**Nejvyšší průměrnou teplotu** software vypočítal na **PT<sub>21</sub> = 662,8 °C** a na **TC<sub>41</sub> = 688,7 °C** (rozdíl TC-PT = **25,9 °C**), při 2. zkoušce je nejvyšší průměrná teplota naměřena na **PT<sub>32</sub> = 609,3 °C** a na **TC<sub>58</sub> = 661,5 °C** (rozdíl TC-PT = **52,2 °C**). Rozdíl mezi nejteplejšími místy pod stropem v CFD modelu a při 2. zkoušce je tedy pro PT =  $662,8 - 609,3 = 53,5$  °C a pro TC =  $688,7 - 661,5 = 27,2$  °C.

Tab. 28: Přehled teplot na vybraných PT a TC pod stropem, 2.zkouška

TERMOČLÁNKY	2. Zkouška						2. CFD model					
	100 mm	MIN	MAX	100 mm	MIN	MAX	0 mm	MIN	MAX	250 mm	MIN	MAX
	∅ PT	23 PT	32 PT	∅ TC	43 TC	58 TC	∅ PT	34 PT	21 PT	∅ TC	60 TC	41 TC
TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
∅ průměrná	597,8	584,7	609,3	645,6	616,9	661,5	646,6	635,7	662,8	673,2	658,9	688,7
maximální	679,5	667,1	689,9	706,4	687,7	744,5	749,1	739,4	767,5	762,7	751,7	775,6
minimální	117,9	115,2	117,5	245,0	189,8	307,3	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0
rozdíl od ∅ tepl.	/	-13,1	11,5	/	-28,7	15,9	/	-11,0	16,2	/	-14,3	15,5
teplota v 15.min	616,3	598,2	625,9	652,2	621,7	662,1	664,1	653,6	681,5	687,2	672,0	698,7

Rozdíly průměrných teplot na TC a PT potvrzují, jak již bylo zmíněno výše, že v případě CFD modelu jsou si teploty vypočítané na TC a PT bližší, jejich průměrný rozdíl je **26,6 °C** (viz tab. 22), zatímco při 2. zkoušce v reálné peci je tento rozdíl **47,8 °C** (viz tab. 12). Tato skutečnost se projevuje na vyšším rozdílu mezi průměrnými teplotami naměřenými při 2. zkoušce a vypočítanými v CFD modelu na **PT**, který je pro **min. teplotu = 51,0 °C** a **max. teplotu = 53,5 °C**. Lze tedy tvrdit, že teploty na PT jsou v CFD modelu průměrně o desítky °C vyšší než při reálné zkoušce, viz graf 24. Nicméně průměrné teploty na **TC** jsou v CFD modelu také vyšší než při reálné zkoušce a rozdíly, které jsou pro **min. teplotu = 42 °C** a **max. teplotu = 27,2 °C**, nejsou zanedbatelné a průběhy teplot se výrazně liší, viz graf 25.

Průběhy teplot na vybraných termočláncích v tab. 28 jsou zobrazeny PT v grafu 24 a TC v grafu 25.



a) Max. teploty pod stropem

b) Min. teploty pod stropem

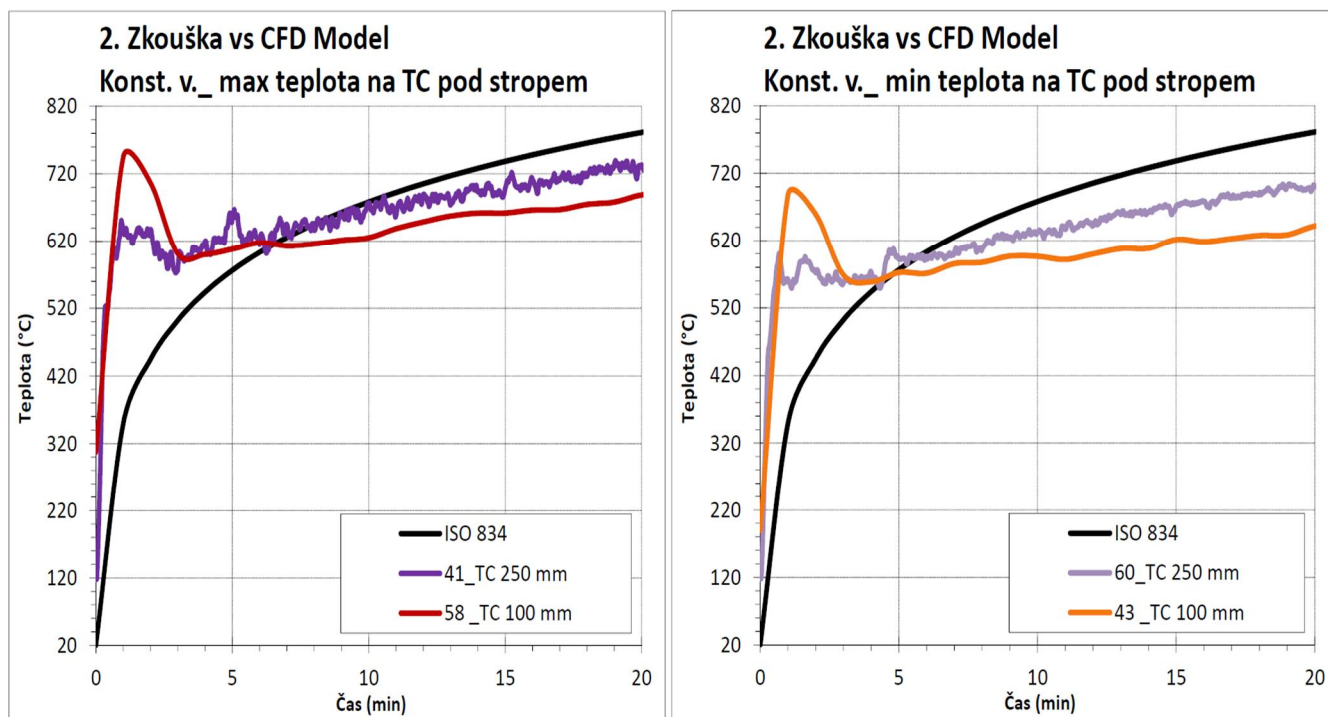
Graf 24: Průběh max. a min. teplot na **PT** pod stropem, 2. zkouška

Jak již bylo řečeno výše, teploty vypočítané v CFD modelu na PT jsou od cca 4. min vyšší než teploty naměřené na PT při 2. zkoušce. V grafu 24 je červenou barvou zobrazen průběh teplot vypočítaných na **PT v CFD modelu** (max. teploty červenou a min. teploty světle červenou křivkou), na první pohled je patrné, že tyto teploty mají méně plynulý průběh a vyšší výkyvy od průměru než teploty měřené na **PT při 2. zkoušce**, v grafu zakreslené modrými křivkami (max. teploty tmavě modrou a min. teploty světle modrou). V grafu je možné vidět, že teploty v CFD modelu narůstaly v prvních minutách na rozdíl od experimentu mnohem strměji než teploty na normové teplotní křivce, ale v obou případech došlo k ustálení průběhu do 4 min od začátku zkoušky a v obou případech byla počáteční teplota okolo 120 °C. Na křivkách teplot vypočítaných v CFD modelu je také patrné, že jejich průběh rychleji reaguje na změny výkonu



hořáků, podobně jako je tomu u teplot počítaných na TC, díky tomu křivky PT v CFD modelu dosáhnou vrcholu ve stejný čas jako výkon, zatímco křivky PT z experimentu kopírují výkon s určitým časovým zpožděním, viz kapitolu 3.4.3.5.

Zajímavé také je, že v blízkosti sebe je v půdorysu pece naměřena max. teplota při experimentu (na PT\_32 = 609,3 °C, tmavě modrá v grafu 24 a)) a min. teplota vypočtená v CFD modelu (na PT\_34 = 635,7 °C, světle červená v grafu 24 b)), viz obr. 55. Průběh těchto teplot se v průměru liší o 26,4 °C, rozdíl je tedy výrazně nižší než v případě min. teplot = 51,0 °C a max. teplot = 53,5 °C. Lze tedy říct, že se průměrné teploty v pravém spodním rohu pod stropem naměřené při experimentu a vypočítané v CFD modelu liší pouze o cca 20 °C.



a) Max. teploty pod stropem

b) Min. teploty pod stropem

Graf 25: Průběh max. a min. teplot na TC pod stropem, 2. zkouška

V grafu 25 je na průběhu teplot jasně vidět, že hodnoty vypočítané na TC v CFD modelu jsou cca od 3. min vyšší než hodnoty naměřené při 2. zkoušce.

V grafu 25 je tmavě červenou křivkou zobrazen průběh max. teplot a oranžovou křivkou pak průběh min. teplot naměřených na TC při 2. zkoušce. Dále jsou v grafu fialovými křivkami zakreslené teploty vypočítané na TC v CFD modelu (max. teploty tmavě fialovou a min. teploty světle fialovou), na první pohled je patrné, že tyto teploty mají méně plynulý průběh a vyšší výkyvy od průměru než teploty měřené na TC při 1. zkoušce. V grafu je možné vidět, že teploty při experimentu narůstaly v prvních minutách na rozdíl od teplot na PT (viz graf 24) shodně s teplotami vypočítanými v CFD modelu a zároveň mnohem strměji než teploty na normové teplotní křivce. V obou případech došlo k ustálení průběhu teplot do 3 min od začátku zkoušky. Výrazný rozdíl je ale v počáteční teplotě, kde v CFD modelu začínají vypočítané hodnoty na TC



na předepsané teplotě okolí 118 °C, zatímco při experimentu je v čase 0 min na TC teplota v rozmezí 189,3 – 311,7 °C, viz tab. 12.

Jak již bylo zmíněno výše, je zajímavé, že v blízkosti sebe je v půdorysu pece naměřena max. teplota při experimentu (na TC\_58 = 661,5 °C, tmavě červená v grafu 25 a)) a min. teplota vypočtená v CFD modelu (na TC\_60 = 658,9 °C, světle fialová v grafu 25 b)), viz obr. 55. Průběh těchto teplot je od cca 7. min shodný. Lze tedy říct, že průměrné teploty na TC v pravém spodním rohu pod stropem naměřené při experimentu a vypočítané v CFD modelu jsou od cca 7. min téměř stejné.

Srovnání o kolik jsou průměrné teploty vypočítané v 2. CFD modelu a naměřené při 2. zkoušce na TC a PT pod stropem nižší než normová teplotní křivka je provedeno v tab. 29.

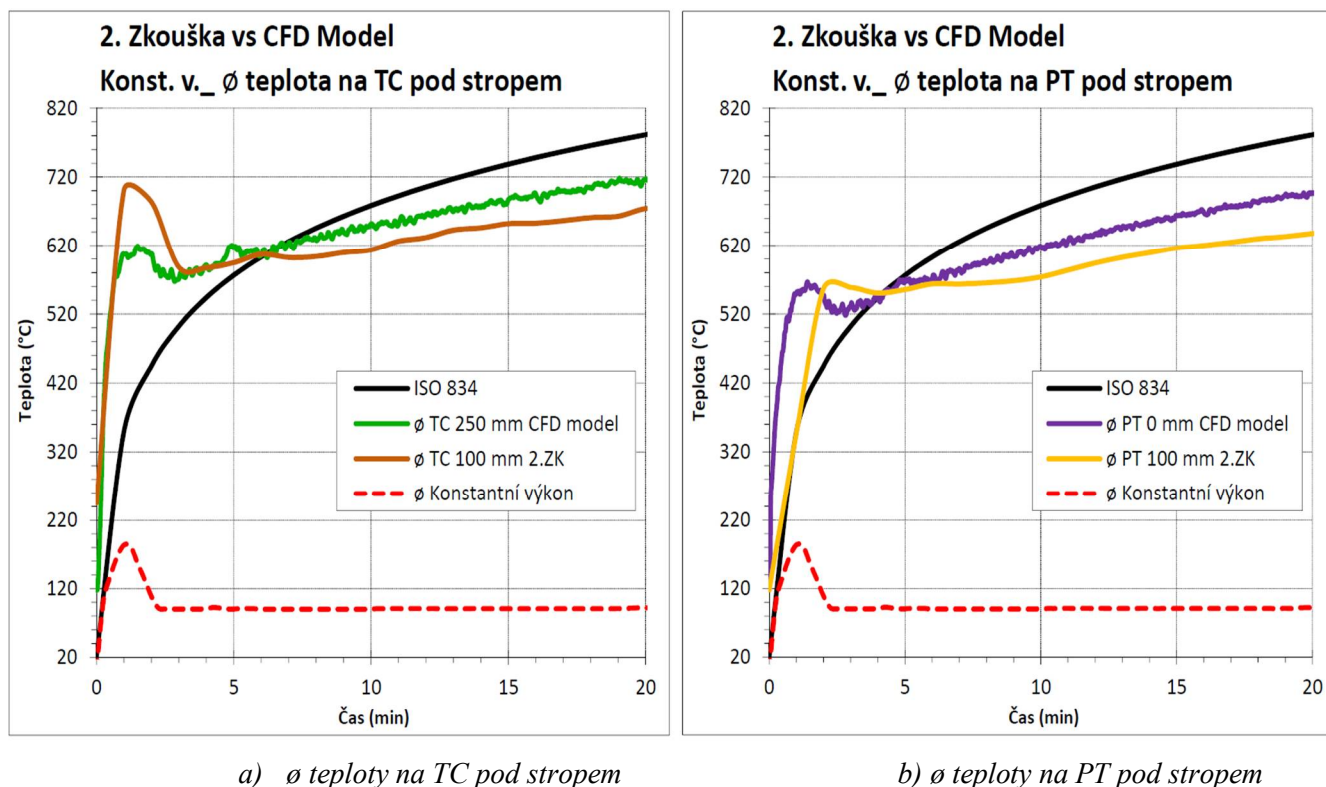
Tab. 29: Rozdíl průměrných teplot na TC a PT pod stropem + srovnání s ISO 834, 2.zkouška

ČAS	0 min	1 min	1,5 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Ø TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
ISO 834	20,0	404,3	349,2	444,5	502,3	543,9	576,4	678,4	738,6	781,4	814,6	841,8
2.ZK TC 100 mm	245,0	700,4	692,2	684,0	588,4	587,4	594,7	613,6	652,2	674,2	673,5	695,8
rozdíl od ISO 834	225,0	296,1	343,0	239,4	86,1	43,5	18,3	-64,8	-86,4	-107,1	-141,1	-146,0
2.CFD TC 250 mm	118,0	619,2	607,5	608,1	570,8	591,4	616,7	651,5	687,2	717,3	739,8	758,3
rozdíl od ISO 834	98,0	214,9	258,3	163,5	68,5	47,5	40,3	-26,9	-51,3	-64,1	-74,8	-83,5
rozdíl mezi TC	127,0	81,2	84,7	75,9	17,6	-4,0	-22,0	-37,9	-35,1	-43,0	-66,3	-62,5
2.ZK PT 100 mm	117,9	347,1	452,1	557,0	558,7	550,5	555,5	574,0	616,3	637,9	646,0	667,7
rozdíl od ISO 834	97,9	-57,2	102,9	112,5	56,4	6,6	-20,9	-104,4	-122,3	-143,5	-168,6	-174,1
2.CFD PT 0 mm	118,0	561,1	549,5	547,0	532,0	544,5	568,1	617,9	664,1	697,4	724,3	748,1
rozdíl od ISO 834	98,0	156,8	200,3	102,4	29,7	0,6	-8,3	-60,5	-74,4	-83,9	-90,3	-93,7
rozdíl mezi PT	-0,1	-214,0	-97,5	10,1	26,6	6,0	-12,6	-43,9	-47,9	-59,5	-78,3	-80,4
Ø VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
2.ZK Konst. výkon	0,0	183,4	156,7	108,8	90,3	90,3	90,3	90,7	90,7	92,0	89,7	90,7

Z tab. 29 je možné vyčíst, že nejvyšší rozdíl mezi průměrnými teplotami zjištěnými na TC je v čase 0 min, přestože v **grafu 26 a)** je jasně vidět, že právě v prvních vteřinách je průběh křivek téměř totožný. Tento rozdíl v čase 0 min je způsoben rozdílnou počáteční teplotou, která je na TC při 2. zkoušce = 245,0 °C, zatímco v CFD modelu je shodná s předepsanou teplotou okolního prostředí 118 °C. V dalších 2 min se rozdíl teplot na TC pohybuje okolo 80 °C, tento rozdíl je způsoben vyššími výchyly na TC v reálné peci, zdůvodněnými níže v textu. Mezi 3. a 4. min klesá průměrná teplota naměřená na TC při 2. zkoušce pod hodnotu průměrných teplot vypočítaných v CFD modelu, ve 4. min jsou teploty nižší o 4 °C a tento rozdíl se díky rozdílnému úhlu stoupání obou křivek (viz graf 26 a)) dále plynule zvyšuje až do konce zkoušky ve 30 min. na hodnotu 62,5 °C. Průběh průměrných teplot na TC je vykreslen v **grafu 26 a)**, kde je zelenou barvou zobrazen průběh vypočítaný v CFD modelu, na kterém je jasně patrné, že průběh průměrné teploty je mnohem plynulejší než průběh max. a min. teplot v grafu 25. Dále je hnědou barvou vykreslen průběh průměrné teploty naměřené při 2. zkoušce, černou barvou normová teplotní křivka a červenou čárkovanou křivkou průměrný výkon při 2. zkoušce. Při srovnání průběhů teplot na TC s normovou teplotní křivkou lze říct, že v obou případech od cca

7. min klesají teploty na TC pod teplotu normové teplotní křivky. V případě 2. zkoušky je v 10. min teplota naměřená na TC nižší než normová teplotní křivka o  $-64,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tento rozdíl se plynule zvyšuje až do konce zkoušky ve 30. min na hodnotu  $-146,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případě CFD modelu je v 10. min teplota vypočítaná na TC nižší než normová teplotní křivka o  $-26,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tento rozdíl se opět plynule zvyšuje až do konce zkoušky ve 30. min na hodnotu  $-83,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z grafu 26 a) a uvedených rozdílů je patrné, že se teploty vypočítané v CFD modelu zvyšují rychleji a rozdíl s normovou teplotní křivkou je tedy nižší než v případě teplot naměřených při 2. zkoušce.

Dále jsou v tab. 29 uvedeny rozdíly v čase mezi průměrnými teplotami zjištěnými na **PT**. Je možné vyčíst, že teploty na PT jsou v čase 0 min v podstatě stejné, na rozdíl od TC, kde se počáteční teploty velmi lišily. Přesto, že je v případě PT počáteční teplota shodná, je v **grafu 26 b)** jasně vidět, že průběh křivek je v 1. min zcela odlišný. Teploty na PT v CFD modelu narůstají mnohem strměji a teploty jsou v začátku mnohem vyšší, takže je jejich průběh více podobný teplotám na TC, to potvrzuje i vysoká hodnota rozdílu mezi PT v 1. min =  $214,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V čase 1,5 min se rozdíl snižuje na  $97,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a ve 2. min je možné vidět, že teplota v CFD modelu klesá pod hodnoty naměřené při 2. zkoušce, to trvá až do 4. min, což potvrzují kladné hodnoty rozdílu mezi PT v tab. 29. Po 4. min klesá průměrná teplota naměřená na PT při 2. zkoušce opět pod hodnotu  $\varnothing$  teplot vypočítaných v CFD modelu, v 5. min je teplota nižší o  $12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tento rozdíl se díky rozdílnému úhlu stoupání obou křivek (viz graf 26 b)) dále plynule zvyšuje až do konce zkoušky ve 30 min. na hodnotu  $80,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Průběh průměrných teplot na PT je vykreslen v grafu 26 b), kde je fialovou barvou zobrazen průběh vypočítaný v CFD modelu, na kterém je jasně patrné, že průběh průměrné teploty je o něco plynulejší než průběh max. a min. teplot v grafu 24. Dále je žlutou barvou vykreslen průběh průměrné teploty naměřené při 2. zkoušce, černou barvou normová teplotní křivka a červenou čárkovanou křivkou průměrný výkon při 2. zkoušce. Při srovnání průběhů teplot na PT s normovou teplotní křivkou můžeme vidět, že všechny 3 křivky se protínají přibližně ve stejný okamžik a to po 4. min. Lze tedy říct, že od cca 4. min klesají teploty na PT pod teplotu normové teplotní křivky. V případě 2. zkoušky je v 5. min průměrná teplota naměřená na PT nižší než normová teplotní křivka o  $-20,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tento rozdíl se plynule zvyšuje až do konce zkoušky ve 30. min na hodnotu  $-174,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případě CFD modelu je v 5. min průměrná teplota vypočítaná na PT nižší než normová teplotní křivka o  $-8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tento rozdíl se opět plynule zvyšuje až do konce zkoušky ve 30. min na hodnotu  $-93,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z grafu 26 b) a uvedených rozdílů je patrné, že se teploty vypočítané v CFD modelu zvyšují rychleji a rozdíl s normovou teplotní křivkou je tedy nižší než v případě teplot naměřených při 2. zkoušce.



Graf 26: Průběh průměrných teplot na TC a PT pod stropem, 2. zkouška

V grafu 26 je možné vidět podobnost tvaru teplotních křivek vypočítaných na TC a PT v CFD modelu, kde PT reaguje na změnu výkonu hořáků stejně citlivě a rychle jako TC. Výkyv teploty v začátku výpočtu na TC v CFD modelu není zdaleka tak výrazný jako v případě reálných TC při 2. zkoušce, na kterých dosahuje teplota v prvních 2 min hodnot téměř 700 °C, zatímco na PT je vrcholu dosaženo až po cca 3 min a teploty se pohybují okolo 560 °C, viz tab. 29. Na TC a PT v CFD modelu je dosaženo vrcholu ve stejné době a to v 1 min, teploty na TC se pohybují okolo 620 °C a na PT okolo 560 °C. Lze tedy tvrdit, že v prvních minutách výpočtu dosahují teploty na PT v CFD modelu podobných hodnot jako teploty při 2. zkoušce, ale o cca 1 min dříve. Zatímco TC v CFD modelu dosahují vrcholu ve stejnou dobu jako TC v reálné peci, ale vypočítané teploty jsou o cca 80 °C nižší.

Výše zmíněný průběh teplot na TC ve 2. CFD modelu může být odůvodněn nastavením výkonů hořáků, kde tak jako při zkouškách kopírují i teploty vypočítané v CFD modelu průběh výkonu hořáků. V 1. CFD modelu kde dosáhne výkon hořáků svého maxima 257,7 kW v čase 1,5 min, což je o 133,7 kW více než průměrný výkon 124 kW. Na grafu 22 je možné vidět, že průměrná teplota vypočítaná na TC pod stropem v 1. CFD modelu relativně přesně kopíruje průběh teploty naměřené při 1. zkoušce a také, že průběh teplot na PT se podobá průběhu na TC. Ve 2. CFD modelu je maxima 183,4 kW dosaženo v 1. min, což je o 89,4 kW více než průměrný výkon 94 kW. Na grafu 26 je vidět, že průměrná teplota vypočítaná na TC pod stropem nereaguje zdaleka tak citlivě na nárůst výkonu, jako průběh průměrných teplot naměřených na TC při 1. zkoušce a také, že průběh teplot na TC se podobá průběhu na PT. Lze tedy říct, že v případě nižšího maximálního výkonu 183,4 kW (nižším o 257,7 – 183,4 = 74,3 kW) a nižším poklesu výkonu o 89,4 kW (nižším o 133,7 – 89,4 = 44,3 kW) zpět na průměrný výkon 94 kW je

průběh teplot vypočítaných na TC pod stropem ve 2. CFD modelu na rozdíl od 1. CFD modelu podobnější průběhům teplot na PT a navíc nedochází k žádné výrazné reakci průběhu teplot na skokový nárůst a pokles výkonu.

## 5.4 Konstantní výkon – teploty po výšce

Validace teplot vypočítaných pod stropem v úrovni 0 mm na PT a 250 mm na TC pro CFD model pomocí teplot naměřených pod stropem v úrovni 100 mm na PT i TC při 2. zkoušce je provedena v kapitole 5.3. Proto se tato kapitola zaměří pouze na výsledky teplot z termočlánků umístěných v úrovních 750 mm a 1250 mm pod stropem.

Hodnoty průměrných teplot po výšce uvedené v tab. 30 a zakreslené v grafu 27 jsou opět počítané z vybraných termočlánků, viz kapitolu 3.4.3.2 a obr. 34, vyjma PT číslo 24, 29 a 35, které jsou umístěné ve střední úrovni (750 mm pod stropem) a nelze je v CFD modelu simulovat pomocí AST, kterou lze měřit pouze na povrchu konstrukcí.

Tab. 30: Přehled rozdílů  $\varnothing$  teplot po výšce na TC 750 mm a 1250 mm pod stropem, 2.zkouška

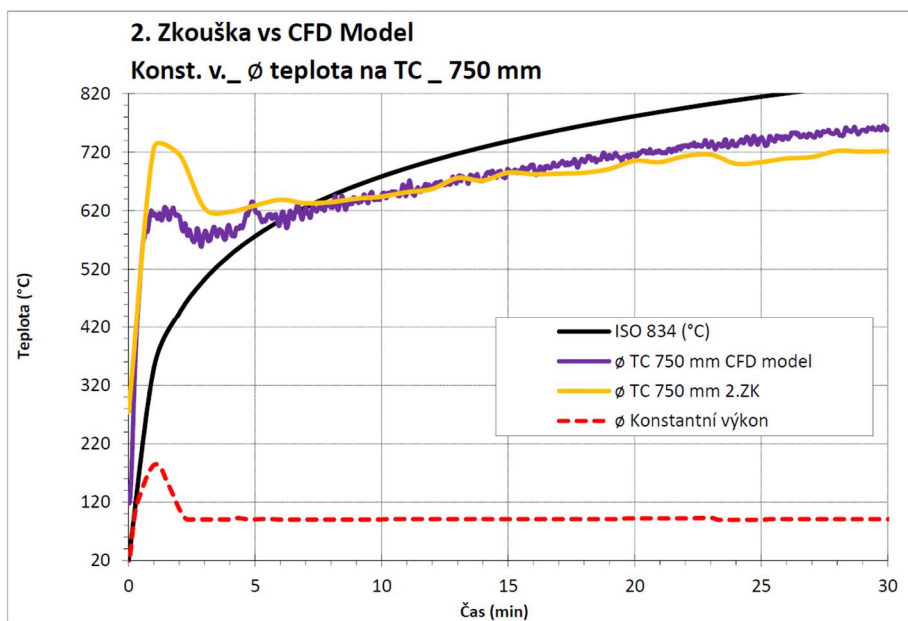
ČAS	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	$\varnothing$ 5.-20. min
$\varnothing$ TEPLOTA	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1.ZK TC 750 mm	274,0	727,0	716,3	624,4	618,1	628,9	644,1	685,0	705,2	702,8	721,6	---
1.CFD TC 750 mm	118,0	612,6	610,7	582,6	591,7	618,5	645,9	690,6	713,7	743,5	759,6	---
rozdíl TC 750 mm	156,0	114,4	105,5	41,8	26,4	10,4	-1,8	-5,6	-8,5	-40,7	-38,0	-1,4
1.ZK TC 1250 mm	339,6	731,7	720,1	622,3	622,7	622,9	636,4	687,6	723,2	700,4	736,1	---
1.CFD TC 1250 mm	118,0	613,6	608,7	577,1	592,4	621,5	652,2	690,9	714,1	747,9	763,0	---
rozdíl TC 1250 mm	221,6	118,1	111,4	45,2	30,2	1,4	-15,8	-3,3	9,1	-47,5	-26,9	-2,1
$\varnothing$ VÝKON	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
2.ZK Konst. výkon	0,0	183,4	108,8	90,3	90,3	90,3	90,7	90,7	92,0	89,7	90,7	---

V tab. 30 je možné vidět, že se  $\varnothing$  teploty vypočítané v obou výškových úrovních na TC v CFD modelu liší pouze ve  $^{\circ}\text{C}$  a jejich průběhy jsou téměř shodné, viz graf 19 b). Stejně tak se i teploty naměřené při experimentu v jednotlivých výškových úrovních téměř neliší, viz graf 11. V obou případech je průměrná teplota od 4. min v úrovni 1250 mm (blíže k hořákům) vyšší a to v CFD modelu o  $2,6^{\circ}\text{C}$  (viz tab. 23) a při 2. zkoušce o  $4,7^{\circ}\text{C}$  (viz tab. 13). Při experimentu i v CFD modelu jsou tedy  $\varnothing$  teploty po výšce téměř shodné, díky tomu jsou také velmi podobné hodnoty rozdílů v tab. 30.

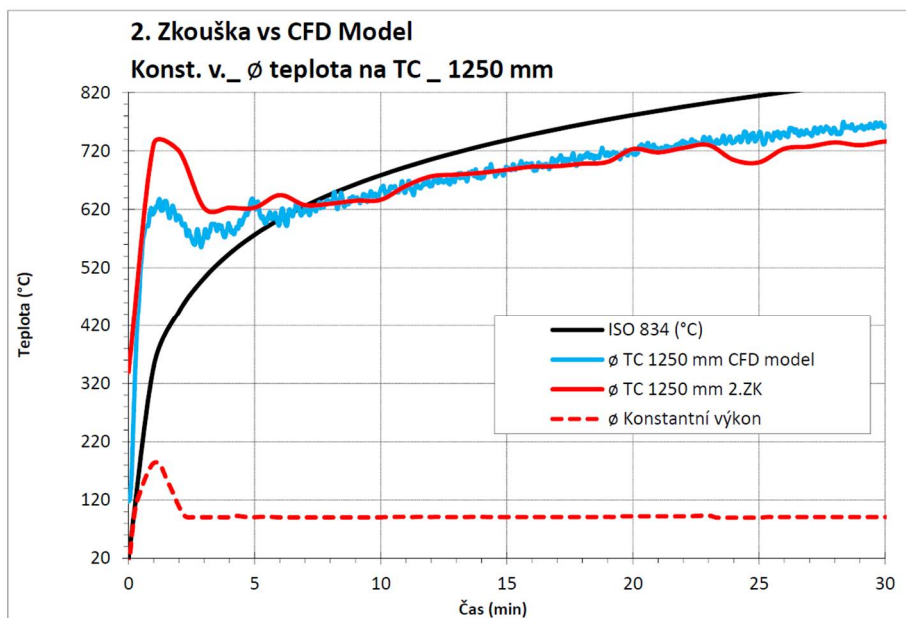
Opět je vidět, že teploty vypočítané na TC v CFD modelu se na začátku výpočtu v čase 0 rovnají předepsané teplotě okolí  $118^{\circ}\text{C}$ , zatímco při 2. zkoušce je v čase 0 na TC naměřena teplota mnohem vyšší a to  $274,0^{\circ}\text{C}$  v úrovni 750 mm a  $339,6^{\circ}\text{C}$  v úrovni 1250 mm. V dalších 2 min je patrný výrazný rozdíl mezi  $\varnothing$  teplotami v CFD modelu a při experimentu, který je v úrovni 750 mm v 1. min =  $114,4^{\circ}\text{C}$  a ve 2. min =  $105,5^{\circ}\text{C}$  a v úrovni 1250 mm v 1. min =  $118,1^{\circ}\text{C}$  a ve 2. min =  $111,4^{\circ}\text{C}$ , tento výrazný rozdíl je dobře patrný i na průběhu  $\varnothing$  teplot v obou výškových úrovních, viz graf 27. Tento výrazný rozdíl je způsoben tím, že teploty naměřené na TC při 2. zkoušce dosahují v prvních min mnohem vyšších hodnot než teploty vypočítané v CFD modelu. Z rozdílů ve 3. a 4. min a 25. a 30. min, lze vyčíst, že průběhy teplot



narůstaly v CFD modelu a při experimentu v obou výškových úrovních pod jiným úhlem, což je patrné z grafu 27. Ve 3. a 4. min jsou teploty vypočtené v CFD modelu vyšší než teploty naměřené při experimentu. Následně jsou od 5. min do 20. min rozdíly velice malé, což potvrzují téměř zanedbatelné hodnoty  $\delta$  rozdílu (-1,4 °C a -2,1 °C) počítaného v časovém rozmezí 5 - 20. min. Od cca 20. min pro úroveň 750 mm a 23. min pro úroveň 1250 mm klesají naměřené teploty při 2. zkoušce pod hodnoty vypočtené v CFD modelu a to až do konce zkoušky ve 30 min.



a)  $\delta$  teploty na TC 750 mm pod stropem



b)  $\delta$  teploty na TC 1250 mm pod stropem

Graf 27: Průběh průměrných teplot na TC a PT 750 mm a 1250 mm pod stropem, 2. zkouška



## 6 Závěry

Tato diplomová práce se zaměřuje na vlastnosti a konstrukci plášt'ových termočlánků (značených TC) a deskových snímačů teploty (značených PT) používaných při zkouškách PO konstrukcí ve vodorovné peci a dále na adiabatickou teplotu povrchu měřenou právě deskovými snímači teploty.

S cílem ověřit teploty měřené pomocí plášt'ových termočlánků a deskových snímačů teploty uvnitř vodorovné pece při požárních zkouškách byl v rámci této práce vytvořen CFD model vodorovné zkušební pece v programu FDS verze 6.4.0. Skutečné rozměry pece byly přeměřeny přímo na vodorovné peci H2 v požární zkušebně PAVUS a.s., která je předlohou virtuálního modelu. Dále zkušebna poskytla veškeré informace a technické listy k materiálům a termočlánkům používaným ve vodorovné peci H2. Díky tomu je vytvořen CFD model pece, který je rozměrově a materiálově věrnou kopií reálné pece. Správnost a funkčnost numerického modelu je v práci validována pomocí dvou zkoušek provedených ve vodorovné peci v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Podle těchto zkoušek byl rovněž nastaven výkon hořáků v CFD modelu, v němž jsou také shodně se zkouškami rozmístěny a nastaveny 2 typy použitých termočlánků a to plášt'ové termočlánky a deskové snímače teploty.

Normovým požadavkem je udržení tlaku v peci v úrovni pod stropem na hodnotě 20 Pa, tato hodnota musí být po prvních 5 min od spuštění zkoušky v toleranci  $\pm 5$  Pa a po 10 min je tolerance zpřísněna na  $\pm 3$  Pa. Při experimentu, kde je tlak v peci regulován frekvenčním ventilátorem napojeným na odvod spalin v podlaze pece a řízeným čidlem tlaku v peci, jsou tato kritéria splněna. V případě CFD modelu pece je odvod spalin prováděn přirozeně otvorem v podlaze pece, hodnoty tlaku jsou v případě 1. CFD modelu cca o 10 Pa vyšší než horní hranice normou požadované hodnoty tlaku 23 Pa. Zatímco v 2. CFD modelu, kde je nastavena o 98 °C vyšší počáteční teplota 118 °C, je přísnější tolerance 20 Pa  $\pm 3$  Pa je splněna již od 2. min. V případě nastavení počáteční teploty 20 °C v 2. CFD modelu se tlak uvnitř pece zvýší přibližně o 9 Pa a průměrné teploty pod stropem vypočítané na PT i TC se sníží o více než 60 °C, přičemž tvar křivek teplot i tlaku je shodný s tvarem křivek při nastavení počáteční teploty 118 °C, mění se tedy pouze dosažené hodnoty nikoliv jejich průběh.

V případě **1. CFD modelu** je výkon hořáků nastaven podle **1. zkoušky**, při níž byl výkon řízen tak, aby v úrovni pod stropem teplota narůstala podle průběhu normové teplotní křivky, průměrný výkon hořáků je v tomto případě **124 kW** ( $\approx 47\%$  z maxima 264 kW) a nejvyššího výkonu **257,7 kW** je dosaženo v čase 1,5 min. Z teplot naměřených při 1. zkoušce je patrné zvyšování teplot po výšce, kde pod stropem celkem přesně odpovídají požadovaným teplotám normové teplotní křivky, zatímco v nižších úrovních, tedy blíže hořákům jsou teploty vyšší. Naopak teploty vypočítané v 1. CFD modelu zůstávají po výšce téměř stejné. Ze srovnání teplot pod stropem v 1. CFD modelu a 1. zkoušce vyplynulo, že hodnoty zjištěné na TC jsou shodné, zatímco na PT jsou průměrně od 5. min o cca 20 °C vyšší teploty vypočítané v CFD modelu. Dále je zajímavé, že při experimentu mají teploty naměřené na PT v prvních minutách méně

prudký nárůst než teploty na TC, což je způsobeno samotnou konstrukcí PT. Tento pomalejší nárůst teplot měřených na reálných PT, nenastává v případě virtuálních PT simulovaných AST v CFD modelu. Na PT ve virtuální peci jsou vypočítány nižší teploty než na TC, tak jako je tomu při experimentu, ale tvar průběhu teplot na PT odpovídá tvaru průběhu teplot na TC. Díky tomu se teploty zjištěné na PT v 1. CFD modelu a 1. zkoušce v prvních 5. min výrazně liší, zatímco od 5. min až do konce zkoušky je rozdíl relativně malý.

Při **2. zkoušce**, je nastaven konstantní výkon hořáků na hodnotu 88 kW (= 30% z maxima 264 kW), nicméně průměrný výkon hořáků zaznamenaný při experimentu je **94 kW** ( $\approx 35\%$  z maxima 264 kW) a nejvyššího výkonu **183,4 kW** je dosaženo v čase 1 min, podle těchto hodnot je také nastaven výkon ve **2. CFD modelu**. Při této nízké hodnotě výkonu vycházejí průběhy teplot pod stropem při 2. zkoušce i ve 2. CFD modelu pod normovou teplotní křivkou. Dále je při tomto výkonu, který je v průměru o 30 kW nižší než při 1. zkoušce, rozložení teplot po výšce pece při 2. zkoušce méně rozdílné, ve spodní a střední úrovni jsou teploty téměř shodné a v horní úrovni pod stropem je teplota průměrně o cca 20 °C nižší. Ve 2. CFD modelu jsou teploty po výšce pece shodné stejně jako v 1. CFD modelu, ale tentokrát je průběh teplot na TC tvarem podobný průběhu teplot na PT, což je zdůvodněno nižší hodnotou nejvyššího výkonu 183,4 kW (nižší o  $257,7 - 183,4 = 74,3$  kW) a nižším poklesem výkonu o 89,4 kW (nižším o  $133,7 - 89,4 = 44,3$  kW) zpět na průměrný výkon 94 kW, než v případě 1. CFD modelu, díky tomu navíc teploty vypočítané na TC v 2. CFD modelu jen nepatrně reagují na skokový nárůst výkonu na začátku výpočtu. Zatímco na teplotách naměřených na TC při 2. zkoušce se tento skok ve výkonu výrazně projevuje. Kromě toho na rozdíl od 1. zkoušky, kde tvary průběhů křivek od 5. min téměř odpovídaly průběhům vypočítaným v 1. CFD modelu, je z průběhů teplot vypočítaných ve 2. CFD modelu a průběhů naměřených při 2. zkoušce jasné, že teploty narůstají s rozdílnou rychlostí. Díky tomu jsou teploty vypočítané na TC i PT ve 2. CFD modelu po ustálení průběhů vyšší než teploty naměřené při 2. zkoušce.

Závěrem lze říct, že v CFD modelu je na rozdíl od experimentu na PT stejně rychlý nárůst teplot jako na TC, ale na PT jsou stejně jako při experimentu vypočítány nižší hodnoty. Díky podobnému průběhu s TC nemají teploty na PT v simulaci takové časové zpoždění v reakci na výkon, jako při experimentu (cca 1 min). V případě průměrného výkonu 124 kW se výsledky vypočítané v CFD modelu shodovali (od 5. min) s výsledky z experimentu. V případě průměrného výkonu 94 kW se výsledky vypočítané v CFD modelu významněji lišily od výsledků z experimentu. Z komplexního pohledu lze však model virtuální pece prohlásit jako za validní. I když se některé výsledky liší, vzhledem k vysoké komplexnosti a náročnosti modelu lze dosažené výsledky považovat za kvalitní.

## Literatura

1. **Cayla F, Leborgne, H., Joyeux, D.** Application of a virtual resistance furnace: fire resistance test simulation of a plasterboard membrane. *ASFE Conference*. Praha : autor neznámý, 2011.
2. **Cueff G, Mindeguia, J-C., Drean, V., Auguin, G., Breyse, D.** Thermomechanical behaviour of cellulose-based materials: application to a door under fire resistance test . *Structures in Fire*. Shanghai : autor neznámý, 2014.
3. **Wickström U, Robbins A, Baker G.** The Use of Adiabatic Surface Temperature to Design Structures for Fire. *Structural in Fire DEStech Publications*. Lancaster : autor neznámý, 2010.
4. **ČSN EN 1363-1.** *Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky*. Praha : ÚNMZ, Leden 2013.
5. **ČSN EN 1363-2.** *Zkoušení požární odolnosti - Část 2: Alternativní a doplňkové postupy*. Praha : ÚNMZ, Únor 2000.
6. **ČSN P ENV 1363-3.** *Zkoušení požární odolnosti - Část 3: Ověřování charakteristik pecí*. Praha : ÚNMZ, Listopad 1999.
7. **ČSN EN 60 584-1.** *Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance*. Praha : ÚNMZ, Květen 2013.
8. **Hyrš, Jan.** Bakalářská práce - Měření teploty termočlánky. Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2012.
9. **Čičmanec, P.** Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetismus. Bratislava : Alfa a SNTL, 1980.
10. **Mareš, Ing. Luděk.** Teplota a její měření. *TZB-info*. [Online] Topinfo s.r.o., 3. Červen 2006. [Citace: 10. Duben 2016.] ISSN 1801-4399.
11. **Szmeek, Tomáš.** Bakalářská práce - Měření teploty v technické Diagnostice. Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2008.
12. *Meranie technických veličín, 1. vydanie.* **Chudý V., Palenčár R., Kureková E., Halaj M.** Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
13. **Přidal, Oldřich.** Bakalářská práce - Termočlánkový snímač teploty (TST). Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Červen 2008.
14. **Ing. Kamila Horová, prof. Ing. František Wald, CSc.** Tepelná a mechanická zatížení konstrukcí při požáru. *TZB-info*. [Online] Topinfo s.r.o., 23. Červenec 2012. [Citace: 14. Květen 2016.] ISSN 1801-4399.
15. **ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, Oprava 1 12.06t, Oprava 2 2.10t, Oprava 3 5.13t.** Praha : ÚNMZ, Srpen 2004.
16. **Wickström, Ulf.** ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE FOR CALCULATING HEAT TRANSFER TO FIRE EXPOSED STRUCTURES. Boras, Sweden : Swedish National Testing and Research Institute (SP).

- 
17. **Kevin McGrattan, Randall McDermott.** Fire Dynamicd Simulator Use´r Guide, Version 6.4.0. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>. [Online] 5. Duben 2016. [Citace: 15. Duben 2016.]
18. ČSN 73 0810. *Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení.* Praha : ÚNMZ, 2009 + Z1:2012 + Z2:2013 + Z3:2013 .
19. **ZOUFAL, Roman a kol.** *Hodnoty požární odolnosti stavebních konstrukcí podle Eurokódů.* Praha : PAVUS, a.s. - Centrum technické normalizace pro požární ochranu, 2009. ISBN 978-80-904481-0-0.
20. **McGRATTAN, Kevin, a další, a další.** *Fire Dynamics Simulator (Version 6) - User's Guide.* [PDF] Gaithersburg, Maryland, USA : National Institute for Standards and Technology, 2013. Sv. Special Publication 1019 - Sixth Edition.
21. **Marek, Pavel.** Výroba platinových termočlánků. *Rubrika Servis - Měření ve strojírenství.* [Online] MMspektrum, 10. Září 2013. [Citace: 14. Květen 2016.] Kód článku: 130903.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Princip termoelektrického obvodu [8].....	5
Obr. 2: Termoelektrický článek: M – měřicí spoj, S – srovnávací spoj, $T_M$ [K] - teplota měřicího spoje, $T_S$ [K] - teplota srovnávacího spoje, $E_{MS}$ [V] - termoelektrické napětí, závislé na rozdílu teplot ( $T_M - T_S$ ) [10].....	6
Obr. 3: Princip prodloužení termočlánku [10].....	6
Obr. 4: Zapojení termočlánku [10].....	7
Obr. 5: Princip konstrukce termočlánku: 1 – měřicí spoj, 2 – srovnávací spoj, 3 – kompenzační obvod, $\alpha_A$ , $\alpha_B$ – dva vodiče s různým termoelektrickým součinitelem [11].....	7
Obr. 6: Příklady řešení měřicího spoje termočlánků [8] .....	8
Obr. 7: Konstrukce plášťového termočlánku [13] .....	10
Obr. 8: Příklady provedení měřicího konce termočlánku [8].....	11
Obr. 9: MTC 10 - plášťový termočlánek - bez / s konektorem, výrobce MAVIS Nový Bor s.r.o., viz technický list výrobce Příloha 1 .....	12
Obr. 10: Deskový snímač teploty.....	13
Obr. 11: Přenos tepla sáláním závisí na dopadajícím záření, teplotě a emisivitě povrchu .....	14
Obr. 12: Profil rychlosti proudění plynu podél ohřívané konstrukce.....	15
Obr. 13: Vliv složek konvekčního a sálavého tepelného toku na hodnotu $T_{AST}$ .....	16
Obr. 14: Konstrukce deskového snímače teploty [4] .....	18
Obr. 15: Pohled na pec H2.....	20
Obr. 16: Pec H2 – pohled shora .....	20
Obr. 17: Rozměry reálné pece - půdorys.....	21
Obr. 18: Rozměry reálné pece - ŘEZ A2-A2' .....	21
Obr. 19: Rozměry reálné pece - ŘEZ B-B' a ŘEZ C-C' .....	22
Obr. 20: Experiment – stropní svařovaná konstrukce na peci H2.....	22
Obr. 21: Skladba stěn pece H2.....	23
Obr. 22: Skladba podlahy pece H2.....	23
Obr. 23: Otvor v podlaze pece H2 s ochrannou ocelovou konstrukcí.....	24
Obr. 24: Půdorys pece H2 s rozmístěním termočlánků + foto ocelové stropní konstrukce s umístěním termočlánků v drážkách. ....	25
Obr. 25: ŘEZ A1-A1'a ŘEZ C-C' - Rozmístění plášťových termočlánků (TC) a deskových snímačů teploty (PT).....	25
Obr. 26: Výškové rozmístění TC a PT v prostoru pece + detail upevnění.....	26
Obr. 27: Umístění dvojitého PT a TC ve středu pece. ....	26



Obr. 28: Půdorys pece – číselné označení termočlánků umístěných 100 mm pod stropem.....	27
Obr. 29: Půdorys pece – číselné označení termočlánků umístěných 750 a 1250 mm pod stropem. .....	28
Obr. 30: Zapojení plynových hořáků k peci H2 .....	31
Obr. 31: Rozmístění a označení hořáků ve vodorovné peci H2 .....	31
Obr. 32: Teplotní mapa – teploty naměřené v 15. minutě, 100 mm pod stropem TC a PT při průběhu zkoušky dle ISO 834.....	37
Obr. 33: Půdorysné rozmístění TC a PT 100 mm pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník) při 1. zkoušce..	38
Obr. 34: Vybrané TC a PT pro srovnání průměrné teploty po výšce pece 1.zkouška .....	40
Obr. 35: Teplotní mapa – teploty naměřené v 15. minutě, 100 mm pod stropem TC a PT při průběhu zkoušky s Konstantním výkonem hořáků.....	43
Obr. 36: Půdorysné rozmístění TC a PT 100 mm pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník) při 2. zkoušce..	44
Obr. 37: Vybrané TC a PT pro srovnání průměrné teploty po výšce pece 2.zkouška. ....	46
Obr. 38: Teplotní mapa – teploty naměřené v 15. minutě, 100 mm pod stropem TC a PT při průběhu zkoušky dle ISO 834 (1.zkouška) a s konstantním výkonem hořáků (2.zkouška)....	50
Obr. 39: CFD model vodorovné pece .....	52
Obr. 40: Rozměrové srovnání virtuální pece s reálnou – Půdorys: síť 250 x 250 mm .....	53
Obr. 41: Rozměrové srovnání virtuální a reálné pece – ŘEZ C-C': síť 250 x 250 mm.....	53
Obr. 42: Rozměrové srovnání virtuální a reálné pece – ŘEZ A2-A2': síť 250 x 250 mm .....	54
Obr. 43: Rozměrové srovnání virtuální a reálné pece – ŘEZ B-B': síť 250 x 250 mm.....	54
Obr. 44: Rozmístění termočlánků v CFD modelu pece – PŮDORYS a ŘEZ B-B' .....	58
Obr. 45: Rozmístění termočlánků v CFD modelu pece – ŘEZ A1-A1' a ŘEZ A2-A2' .....	59
Obr. 46: Rozmístění termočlánků v CFD modelu pece a srovnání s rozmístěním v reálné peci – ŘEZ C-C' .....	59
Obr. 47: Půdorys CFD modelu – teploty vypočítané na TC pod stropem v 15. min, nastavení podle 1.zkoušky .....	63
Obr. 48: Půdorysné rozmístění TC a PT pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník), nastavení podle 1. zkoušky. .	64
Obr. 49: Teploty po výšce CFD modelu v ose y - vypočítané na TC v 15. min, nastavení podle 1.zkoušky .....	66
Obr. 50: Půdorys CFD modelu – teploty vypočítané na TC pod stropem v 15. min, nastavení podle 2.zkoušky .....	69
Obr. 51: Teploty po výšce CFD modelu v ose y - vypočítané na TC v 15. min, nastavení podle 2.zkoušky .....	71
Obr. 52: Půdorys pece – teploty na TC pod stropem v 15. min, 1.zkouška .....	75

---

Obr. 53: Půdorysné rozmístění TC a PT pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník), 1. zkouška .....	76
Obr. 54: Půdorys pece – teploty na TC pod stropem v 15. min, 2.zkouška .....	83
Obr. 55: Půdorysné rozmístění TC a PT pod stropem s vyznačením míst, kde byla zaznamenána max. teplota (červený obdélník) a min. teplota (modrý obdélník), 2. zkouška .....	84

## Seznam tabulek

Tab. 1: Seebeckovy koeficienty pro různé kovy [8] .....	5
Tab. 2: Základní vlastnosti termočlánků .....	8
Tab. 3 Značení termočlánků dle ČSN EN 60 584-1:2014.....	10
Tab. 4: Deskové snímače teploty (PT) .....	27
Tab. 5: Plášťové termoelektrické články $\varnothing$ 2 mm (TC).....	27
Tab. 6: Souhrn teplot v peci naměřených PT 100 mm pod stropem při průběhu teplot dle ISO 834.....	29
Tab. 7: Přehled výkonů hořáků pro průběh teploty dle ISO 834.....	32
Tab. 8: Přehled výkonů hořáků při nastavení Konstantního výkonu .....	33
Tab. 9: Přehled teplot naměřených pomocí PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834.....	38
Tab. 10: Přehled rozdílů teplot po výšce naměřených TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834.....	41
Tab. 11: Rozdíl teplot naměřených 100 mm pod stropem při 1.zkoušce a křivky ISO 834 .....	42
Tab. 12: Přehled teplot naměřených pomocí PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce s Konst. výkonem .....	44
Tab. 13: Přehled rozdílů teplot po výšce naměřených TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce s Konstantním výkonem hořáků.....	47
Tab. 14: Rozdíl teplot naměřených 100 mm pod stropem při 2.zkoušce a křivky ISO 834 .....	48
Tab. 15: Přehled teplot naměřených TC a PT 100 mm pod stropem při 1.zkoušce a 2.zkoušce..	51
Tab. 16 Zvyšování výkonu ploch hořáků v závislosti na čase dle 1. a 2. zkoušky provedené 29.7.2016 ve vodorovné zkušební peci H2 v požární zkušebně PAVUS a.s. ....	56
Tab. 17: Výkony hořáků a tlak 250 mm pod stropem v modelu pece .....	60
Tab. 18: Rozdíl tlaku pod stropem při rozdílné počáteční teplotě v modelu pece.....	61
Tab. 19: Přehled teplot naměřených pomocí PT a TC pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky.	64
Tab. 20: Přehled rozdílů teplot po výšce vypočítaných na TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky .....	68
Tab. 21: Rozdíl teplot na PT (AST na stropě) a TC 250 mm a ISO 834, nastavení podle 1.zkoušky.....	68
Tab. 22: Přehled teplot vypočítaných pomocí PT a TC pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky .....	70
Tab. 23: Přehled rozdílů teplot po výšce vypočítaných na TC a PT – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky.....	73
Tab. 24: Rozdíl teplot na PT (AST na stropě) a TC 250 mm a ISO 834, nastavení podle 2.zkoušky.....	73

---

Tab. 25: Přehled teplot na vybraných PT a TC pod stropem, 1.zkouška .....	77
Tab. 26: Rozdíl průměrných teplot na TC a PT pod stropem + srovnání s ISO 834, 1.zkouška..	79
Tab. 27: Přehled rozdílů $\sigma$ teplot po výšce na TC 750 mm a 1250 mm pod stropem, 1.zkouška	81
Tab. 28: Přehled teplot na vybraných PT a TC pod stropem, 2.zkouška .....	85
Tab. 29: Rozdíl průměrných teplot na TC a PT pod stropem + srovnání s ISO 834, 2.zkouška..	87
Tab. 30: Přehled rozdílů $\sigma$ teplot po výšce na TC 750 mm a 1250 mm pod stropem, 2.zkouška	90

## Seznam grafů

Graf 1: Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termočlánky [13] .....	9
Graf 2: Průběh křivky normové teplotní křivky s tolerancí $\pm 100^{\circ}\text{C}$ .....	18
Graf 3: Srovnání průběhu ISO 834 s průběhem průměrné teploty v peci H2 100 mm pod stropem .....	30
Graf 4: Tlak v peci H2 100 mm pod spodním okrajem stropní konstrukce .....	30
Graf 5: Výkon hořáků pro průběh teploty dle ISO 834 .....	32
Graf 6: Výkon hořáků při nastavení Konstantního výkonu .....	34
Graf 7: Srovnání průběhu křivek průměrné teploty měřené DST 100 mm pod stropem a průměrného výkonu hořáků .....	35
Graf 8: Průběh maximálních a minimálních teplot naměřených PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834 .....	39
Graf 9: Průběh teplot naměřených TC a PT po výšce pece – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce podle ISO 834. ....	42
Graf 10: Průběh maximálních a minimálních teplot naměřených PT a TC 100 mm pod stropem při zkoušce s Konstantním výkonem hořáků .....	45
Graf 11: Průběh teplot naměřených TC a PT po výšce pece – 100 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem při zkoušce s Konstantním výkonem hořáků .....	48
Graf 12: Průběh teplot naměřených TC a PT 100 mm pod stropem při 1.zkoušce – podle ISO 834 a 2.zkoušce – s Konstantním výkonem hořáků .....	51
Graf 13: Průběh výkonů hořáků v CFD modelu vodorovné pece .....	57
Graf 14: Tlak v modelu pece 250 mm pod stropem .....	61
Graf 15: Průběh průměrných teplot na TC a PT pod stropem při rozdílné počáteční teplotě, 2.zkouška .....	62
Graf 16: Průběh max. a min. teplot vypočítaných na PT a TC pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky .....	65
Graf 17: Průběh teplot vypočítaných po výšce modelu: PT (AST na stropě) a TC – 250 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 1.zkoušky .....	67
Graf 18: Průběh max. a min. teplot vypočítaných na PT a TC pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky .....	70
Graf 19: Průběh teplot vypočítaných po výšce modelu: PT (AST na stropě) a TC – 250 mm; 750 mm a 1250 mm pod stropem, nastavení podle 2.zkoušky .....	72
Graf 20: Průběh max. a min. teplot na <b>PT</b> pod stropem, 1.zkouška .....	77
Graf 21: Průběh max. a min. teplot na <b>TC</b> pod stropem, 1.zkouška .....	78
Graf 22: Průběh průměrných teplot na TC a PT pod stropem, 1.zkouška .....	80
Graf 23: Průběh průměrných teplot na TC a PT 750 mm a 1250 mm pod stropem, 1.zkouška .....	82



---

Graf 24: Průběh max. a min. teplot na <b>PT</b> pod stropem,2.zkouška .....	85
Graf 25: Průběh max. a min. teplot na <b>TC</b> pod stropem,2.zkouška.....	86
Graf 26: Průběh průměrných teplot na TC a PT pod stropem,2.zkouška.....	89
Graf 27: Průběh průměrných teplot na TC a PT 750 mm a 1250 mm pod stropem,2.zkouška....	91

## **Příloha 1**

Technický list MTC 10 - plášťové termočlánky - bez / s konektorem od českého výrobce termočlánekových a odporových snímačů teplot MAVIS Nový Bor s.r.o.

## Příloha 2

Technické listy materiálů použitých ve vodorovné peci H2 používané v požární zkušebně PAVUS, a.s. ve Veselí nad Lužnicí.

- 1) Bloky z keramických vláken **FIBRATEC HPS 1260**
- 2) Rohože z keramických vláken **FIBRATEC HPS 1260**
- 3) Izolační žárobeton (perlit) **IZOBET 1400/0,9**
- 4) Kalcium-silikátové desky **KERASIL 1000**
- 5) Vysocehlinité cihly **TRIAL AT 60A**
- 6) Tepelně izolační cihly **TRIZOL HB 11**

## **Příloha 3**

Zdrojový kód modelu virtuální vodorovné pece, který je napsán pro výpočet v programu FDS (Fire Dynamics Simulator) verze 6.4.0 vyvinutým v NIST (National Institute of Standards and Technology).