

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



**Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb**

Diplomová práce

# **POSUZOVÁNÍ POŽÁREM NAMÁHANÝCH KONSTRUKCÍ**

ASSESSMENT OF CONSTRUCTIONS EXPOSED TO FIRE

**Bc. Milan Andrlík**

vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Mózer, PhD.

2024



## Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>3</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>5</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>7</b>
<b>Zadání diplomové práce</b> .....	<b>8</b>
<b>Prohlášení</b> .....	<b>9</b>
<b>Poděkování</b> .....	<b>10</b>
<b>Abstrakt</b> .....	<b>11</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>11</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>13</b>
1.1 Motivace.....	13
1.2 Stanovení výzkumné otázky .....	13
1.3 Cíle práce .....	13
<b>2 Proces hoření a požární vyšetřování</b> .....	<b>14</b>
2.1 Proces hoření.....	14
2.1.1 Požár a hoření.....	14
2.1.2 Palivo .....	14
2.1.3 Přestup tepla .....	16
2.1.4 Proces hoření .....	16
2.1.5 Rozvoj požáru v uzavřených prostorech .....	17
<b>3 Účinky požáru na stavební konstrukce</b> .....	<b>19</b>
3.1 Účinky požáru - Fire effects .....	20
3.2 Vyhodnocení účinků požáru .....	22
3.3 Požární vyšetřování v České republice .....	22
<b>4 Deskové materiály používané jako opláštění</b> .....	<b>24</b>
4.1 Druhy deskových materiálů.....	24
4.1.1 Sádrokartonové desky.....	24
4.1.2 Sádroláknité desky .....	24
4.1.3 Cementovláknité desky.....	25
4.1.4 Desky na bázi dřeva.....	25
<b>5 Sádrokartonové desky</b> .....	<b>26</b>
5.1 Sádrokarton.....	26
5.2 Výroba desek.....	26
5.3 Využití sádrokartonových desek .....	27
5.4 Konstrukce a montáž sádrokartonových konstrukcí .....	27
5.5 Vlastnosti a požadavky na sádrokartonové desky .....	29

---

5.5.1	Mechanické vlastnosti .....	29
5.5.2	Chování při požáru.....	29
5.5.3	Odolnost proti rázu.....	29
5.5.4	Propustnost vodní páry .....	30
5.5.5	Průvzdušnost.....	30
5.5.6	Akustické vlastnosti.....	30
5.5.7	Tepelná odolnost .....	30
5.5.8	Nebezpečné látky.....	30
5.5.9	Druhy sádrokartonových desek .....	30
5.6	Chování sádrokartonu při požáru .....	31
5.6.1	Fyzikální a chemické změny .....	31
5.6.2	Vlastnosti závislé na teplotě.....	32
5.6.3	Účinky požáru na sádrokartonové konstrukce .....	34
5.6.4	Měření hloubky kalcinace pro účely požárního vyšetřování .....	34
<b>6</b>	<b>Ověření chování sádrokartonových desek při požárních zkouškách .....</b>	<b>36</b>
6.1	Zkušební pec miniFUR .....	37
6.1.1	Malá zkušební pec miniFUR.....	37
6.1.2	Úprava hořáků v peci miniFUR.....	37
6.1.3	Doplnění pilotních hořáků a výsledná konfigurace.....	41
6.1.4	Zkouška hořáků ve výsledné konfiguraci .....	41
6.2	Zkoušky sádrokartonových desek na peci miniFUR.....	43
6.2.1	Výběr sádrokartonových desek pro zkoušení .....	43
6.2.2	Sledovaný časový interval.....	43
6.2.3	Montáž zkušebních vzorků.....	44
6.2.4	Umístění měřících zařízení – termočlánků .....	46
6.2.5	Provedení zkoušek.....	47
6.2.6	Vyhodnocení tepelného namáhání vzorků .....	54
6.2.7	Měření kalcinace na odzkoušených vzorcích.....	56
6.2.8	Vyhodnocení měření kalcinace.....	62
6.2.9	Porovnání hloubky kalcinace na lomu deskou.....	65
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>66</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>67</b>

---

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Diagram požáru - fire triangle [2].....	14
Obrázek 2 Model rychlosti uvolňování tepla v čase [8].....	15
Obrázek 3 Skutečné hodnoty RHR/HRR (NIST FCD) [7] .....	16
Obrázek 4 Graf rozvoje požáru [9] .....	17
Obrázek 5 Fáze iniciace požáru [2] .....	17
Obrázek 6 Fáze rozvoje požáru [2] .....	18
Obrázek 7 Fáze celkového vzplanutí – flashover [2] .....	18
Obrázek 8 Fáze ustáleného hoření - post-flashover [2] .....	19
Obrázek 9 Konstrukce po požáru - viditelné účinky požáru [16] .....	22
Obrázek 10 Proces výkonu Státního požárního dozoru - zjišťování příčin vzniku požárů [17] ...	23
Obrázek 11 Příklad využití deskového materiálu jako opláštění - sádrokartonová příčka [18]...	24
Obrázek 12 Odhořívání dřeva při požáru [22].....	25
Obrázek 13 Sádrovec (dihydrát síranu vápenatého) [30].....	26
Obrázek 14 Proces výroby sádrokartonových desek [23] .....	27
Obrázek 15 Profil CW [32].....	28
Obrázek 16 Profil UW [32] .....	28
Obrázek 17 Systém lehkého dřevěného skeletu opláštěného sádrokartonovými deskami [34] ..	28
Obrázek 18 Schéma dehydratace sádrovce a procesu kalcinace [29] .....	32
Obrázek 19 Měrné teplo (specific heat) sádrokartonové desky [40] .....	33
Obrázek 20 Úbytek hmoty (mass loss) sádrokartonové desky [40] .....	33
Obrázek 21 Teplená vodivost (thermal conductivity) sádrokartonové desky [40] .....	34
Obrázek 22 Hloubkoměr pro měření hloubky kalcinace [16] .....	35
Obrázek 23 Grafické znázornění hloubky kalcinace na konstrukci [16].....	35
Obrázek 24 Degradace sádrokartonových desek při požární zkoušce [35] .....	36
Obrázek 25 Malá zkušební pec miniFUR (UCEEB) [44] .....	37
Obrázek 26 Možnosti umístění zkušební vzorku na pec miniFUR [45].....	37
Obrázek 27 Difúzní plamen - pískový hořák [44] .....	38
Obrázek 28 Schematický řez proudovým hořákem.....	39
Obrázek 29 Předmíchaný plamen - proudový hořák .....	39
Obrázek 30 Umístění termočlánků v peci miniFUR.....	40
Obrázek 31 Rozložení teplot v peci miniFUR (původní pískový hořák) .....	40
Obrázek 32 Rozložení teplot v peci miniFUR (nové hořáky) .....	40
Obrázek 33 Finální konfigurace hořáků pro zkušební pec miniFUR .....	41
Obrázek 34 Hořáky při výkonu 15 kW .....	42
Obrázek 35 Hořáky při výkonu 50 kW .....	42
Obrázek 36 Hořáky při výkonu 100 kW .....	42
Obrázek 37 Hořáky při výkonu 150 kW .....	42
Obrázek 38 Skladba vzorku pro zkoušky .....	43
Obrázek 39 Skladba zkušební vzorku – rozdělená na jednotlivé části .....	44

---

Obrázek 40 Rozmístění UW a CW profilů.....	45
Obrázek 41 Umístění minerální izolace mezi ocelové profily.....	45
Obrázek 42 Vnitřní skladba před zaklopením desky z horní strany.....	45
Obrázek 43 Umístění termočlánků uvnitř vzorku.....	46
Obrázek 44 Umístění termočlánků uvnitř vzorku.....	47
Obrázek 45 Detail umístění termočlánku – na středovém profilu CW.....	47
Obrázek 46 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 01.....	48
Obrázek 47 Záznam teplot uvnitř vzorku 01.....	48
Obrázek 48 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 02.....	49
Obrázek 49 Záznam teplot uvnitř vzorku 02.....	49
Obrázek 50 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 03.....	50
Obrázek 51 Záznam teplot uvnitř vzorku 03.....	50
Obrázek 52 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 04.....	51
Obrázek 53 Záznam teplot uvnitř vzorku 04.....	51
Obrázek 54 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 05.....	52
Obrázek 55 Záznam teplot uvnitř vzorku 05.....	52
Obrázek 56 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 06.....	53
Obrázek 57 Záznam teplot uvnitř vzorku 06.....	53
Obrázek 58 Vyhodnocení teplotního pole (pouze horní teplotní pole) pro všechny vzorky.....	54
Obrázek 59 Vývoj teplot na odvrácené straně exponované sádrokartonové desky.....	55
Obrázek 60 Vývoj teplot na odvrácené straně exponované sádrokartonové desky v místě ocelového profilu.....	55
Obrázek 61 Hloubkoměr č. 1 [47].....	56
Obrázek 62 Hloubkoměr č. 2 [47].....	56
Obrázek 63 Místa pro měření hloubky kalcinace na vzorcích.....	57
Obrázek 64 Barevná stupnice vyhodnocení hloubky kalcinace na zkušebních vzorcích.....	57
Obrázek 65 Vzorek 01 s označením míst měření kalcinace.....	58
Obrázek 66 Vzorek 02 s označením míst měření kalcinace.....	58
Obrázek 67 Vzorek 03 s označením míst měření kalcinace.....	59
Obrázek 68 Vzorek 04 s označením míst měření kalcinace.....	60
Obrázek 69 Vzorek 05 s označením míst měření kalcinace.....	61
Obrázek 70 Vzorek 06 s označením míst měření kalcinace.....	61
Obrázek 71 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 01 a vzorek 02 při měření v terči.....	62
Obrázek 72 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 02 při měření v terči a mimo terč.....	63
Obrázek 73 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 02 a vzorek 03 při měření mimo terč.....	63
Obrázek 74 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 04, vzorek 05 a vzorek 06 při měření mimo terč.....	64
Obrázek 75 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 02, vzorek 03, vzorek 04, vzorek 05 a vzorek 06 při měření mimo terč.....	64
Obrázek 76 Odebraný kus ze vzorku 01 pro měření kalcinace v řezu deskou (část vpravo dole)	65
Obrázek 77 Příčný řez deskou vzorku 01 s patrnou čarou kalcinace.....	65

---

---

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Pojmy v oblasti požárního vyšetřování a účinků požáru na konstrukce [10, 11] .....	19
Tabulka 2 Základní seznam účinků požáru (NFPA, 2014) [10] .....	20
Tabulka 3 Definice účinků požáru [12–15] .....	21
Tabulka 4 Ocelové profily sádrokartonových konstrukcí [32, 33] .....	28
Tabulka 5 Požadavky na mechanické vlastnosti [26] .....	29
Tabulka 6 Požadavky na chování při požáru [26] .....	29
Tabulka 7 Požadavky na akustické vlastnosti [26] .....	30
Tabulka 8 Druhy sádrokartonových desek [26] .....	31
Tabulka 9 Přehled zkoušených vzorků s návazným měřením kalcinace .....	44
Tabulka 10 Hloubka kalcinace vzorku 01, použit hloubkoměr 1, měřeno v terči .....	58
Tabulka 11 Hloubka kalcinace vzorku 02, použit hloubkoměr 1, měřeno v terči .....	59
Tabulka 12 Hloubka kalcinace vzorku 02, použit hloubkoměr 1, měřeno okolo terče .....	59
Tabulka 13 Hloubka kalcinace vzorku 03, použit hloubkoměr 1, měřeno okolo terče .....	60
Tabulka 14 Hloubka kalcinace vzorku 04, použit hloubkoměr 2, měřeno okolo terče .....	60
Tabulka 15 Hloubka kalcinace vzorku 05, použit hloubkoměr 2, měřeno okolo terče .....	61
Tabulka 16 Hloubka kalcinace vzorku 06, použit hloubkoměr 2, měřeno okolo terče .....	62

## Zadání diplomové práce

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Andrlík Jméno: Milan Osobní číslo: 484383Zadávací katedra: Katedra konstrukcí pozemních stavebStudijní program: Integrovaná bezpečnost stavebStudijní obor: -

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posuzování požárem namáhaných konstrukcíNázev diplomové práce anglicky: Assessment of constructions exposed to fire

Pokyny pro vypracování:


- 1/ Rozbor současného stavu problematiky v oblasti požárem namáhaných konstrukcí
- 2/ Identifikace relevantních metod pro ohledání a posouzení poškození konstrukcí požárem
- 3/ Návrh experimentů pro namáhání vybraných konstrukčních skladeb požárem a posouzení poškození
- 4/ Realizace experimentů, analýza naměřených dat a vyvození závěrů
- 5/ Doporučení pro navazující výzkum


Seznam doporučené literatury:

- Harper, C. Handbook of Building Materials for Fire Protection  
 LaMalva, K., Hopkin, D. International Handbook of Structural Fire Engineering  
 Apte, V. Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining  
 Dauid, N. Fire Investigation

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Mózer, PhD.Datum zadání diplomové práce: 2.10.2023Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2024

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

  
 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“.*

12.10.2023

Datum převzetí zadání

  
 Podpis studenta(ky)



## Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem zpracovával samostatně pod odborným vedením doc. Ing. Vladimíra Mózera, PhD. Všechny použité podklady a literatura jsou vypsány v seznamu citované literatury v závěru této práce.

Souhlasím s použitím tohoto školního díla 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:

Bc. Milan Andrlík

.....

.....

## Poděkování

V úvodu bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Vladimíru Mózerovi, PhD. za odborné vedení mé diplomové práce a konzultace, ze kterých jsem si odnášel vždy mnoho cenných rad a nápadů, jak tuto práci vylepšit.

Současně patří velké poděkování mým rodičům za trpělivost, za to, že vždycky stáli při mně a především za možnost studovat.

Další poděkování patří panu nrap. Ing. Jakobovi Bacovi, vyšetřovateli požárů a současně studentovi Fakulty bezpečnostního inženýrství v Ostravě, za objasnění s měřením hloubky kalcinace pro účely požárního vyšetřování a možnost vyzkoušení během experimentů. Příprava a realizace požárních zkoušek by se neobešla bez pomoci pana Ing. arch. Bc. Petra Hejtmánka, Ph.D., Ing. Daniely Šejnové Pitelkové a Ing. Tomáše Vančury. Fyzikální a chemické změny sádry při vystavení vysokým teplotám mi přehledně vysvětlila paní doc. Ing. Alena Vimmrová, Ph.D. z katedry materiálového inženýrství Fakulty stavební ČVUT.

Výzkum prezentovaný v této práci, a hlavně experimenty proběhly jako součásti realizace projektu BV MV Inovace a rozvoj nástrojů v oblasti zjišťování příčin vzniku požárů VJ01010046.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na problematiku posuzování požárem namáhaných konstrukcí pro účely požárního vyšetřování. Pro získání uceleného přehledu o analýze konstrukcí po požáru bylo provedeno shrnutí problematiky rozvoje požáru a účinků požáru na konstrukce v souvislosti s požárním vyšetřováním. Hlavní zaměření je pak na konstrukce s využitím sádrokartonových deskových materiálů jako opláštění konstrukce. Na to navazuje i praktická část a její součástí je i optimalizace zkušební pece použité pro zkoušky deskových materiálů.

### **Klíčová slova**

Sádrokartonové konstrukce; sádrokartonová deska; deskové materiály; požární vyšetřování; stupeň poškození požárem; hloubka kalcinace; malá zkušební pec

## **Abstract**

This thesis focuses on the topic of assessing thermally stressed structures for fire investigation purposes. In order to obtain a comprehensive overview, a summary of the knowledge of fire development and the fire effects on structures in the context of fire investigation was carried out. The main focus is then on structures using drywall board materials as a covering for the supporting structure. This is also followed by a practical part and includes optimisation of the test furnace used for testing of board materials.

### **Keywords**

Gypsum drywall; gypsum board; board materials; post-fire investigation; degree of fire damage (DOFD); depth of calcination; small test furnace

## Seznam použitých symbolů a zkratk

### Zkratky

SPD	Státní požární dozor
ZPP	Zjišťování příčin požáru
HZS ČR	Hasičský záchranný sbor České republiky
ČR	Česká republika
HRR/RHR	Heat release rate / Rate of heat release
NIST	National Institute of Standards and Technology
NFPA	National Fire Protection Association
FCD	Fire calorimetry database
DOFD	Degree of fire damage
SDK	Sádrokarton
OSB	Oriented strand board
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

### Třída reakce na oheň

A1/A2	Nehořlavé výrobky
B/C/D/E/F	Hořlavé výrobky

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se zaměřuje na hodnocení sádrokartonových desek pro účely požárního vyšetřování. Součástí je úvodní teoretická část, která se věnuje základnímu popisu principů hoření, mechanismu rozvoje požáru v uzavřených prostorech a požárnímu vyšetřování včetně hodnocení stavebních konstrukcí (materiálů) po požáru. Praktická část práce je rozdělena na dvě dílčí. První je zaměřena na úpravu hořáků pro zkušební pec miniFUR, včetně jejich zkoušky. A druhá se věnuje odzkoušení sádrokartonových desek pro následné hodnocení z hlediska jejich degradace a možnostem měření této degradace.

## 1.1 Motivace

Motivací této práce je ucelení a doplnění informací o chování sádrokartonových desek vystavených účinkům požáru pro účely požárního vyšetřování. Hlavní zaměření je na možnosti jejich zhodnocení po tepelné expozici jednoduchými metodami uplatnitelnými v praxi.

## 1.2 Stanovení výzkumné otázky

Pro navrhování konstrukcí na účinky požáru lze využít katalogy výrobců na základě výsledků odzkoušených sestav. Tyto odzkoušené prvky jsou často určeny primárně pro vystavení vysokým teplotám a jde u nich hlavně o dosažení požadované požární odolnosti. Jedná se o deskové materiály obsahující příměsi ke zvýšení jejich soudržnosti. Běžně se ale využívají i deskové materiály, které tyto specifické příměsi neobsahují a jejich chování při vysokých teplotách je odlišné. Obecně skupina materiálů na bázi sádry je u nás méně prozkoumaná, a to odpovídá i množství podkladů o jejich chování při požáru, ze kterých by bylo možné vycházet při analýze konstrukce po požáru. Práce je věnována právě této problematice s cílem ověření informací o chování těchto materiálů a možnostem zhodnocení konstrukce pro účely požárního vyšetřování.

## 1.3 Cíle práce

Hlavním cílem práce je ověření chování a měření účinků požáru u sádrokartonových desek při tepelném namáhání. Pro naplnění hlavního cíle byly stanoveny následující dílčí cíle:

- Shrnutí procesu hoření a rozvoje požáru v uzavřených prostorech
- Specifikace účinků požáru na konstrukce a možnostem jejich sledování
- Popis chování sádrokartonu při vystavení požáru
- Optimalizace hořáků pro zkušební pec miniFUR

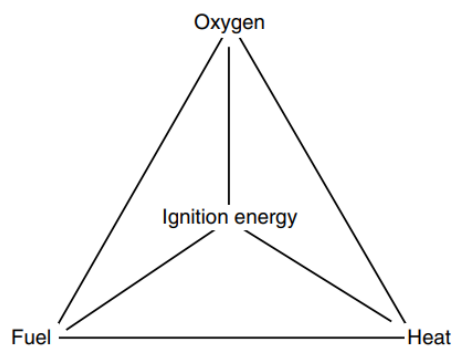
## 2 Proces hoření a požární vyšetřování

### 2.1 Proces hoření

#### 2.1.1 Požár a hoření

Požárem označujeme jakékoliv nežádoucí hoření, které vede jak k hmotným škodám, tak ke zranění či usmrcení osob (případně zvířat). Příkladem nežádoucího hoření je požár v Národním parku České Švýcarsko z léta roku 2022, kde došlo k poškození 1100 ha plochy, především lesního porostu. Hoření je naopak žádoucí v případě účelného spalování nebo výrobě. Příkladem může být spalování paliva v cementárně pro ohřev rotační pece. [1]

Hoření je exotermická chemická reakce, při které dochází k uvolňování značného množství energie do svého bezprostředního okolí. Vznik této energie je podmíněn interakcí tří složek: paliva, oxidantu a iniciačního zdroje zapálení. Poslední složku bychom mohli ještě rozdělit na dvě části, a to na teplo a iniciační energii. V grafickém znázornění jde o tzv. trojúhelník hoření. V podrobnějším rozdělení bychom ho nazývali tetraedr hoření (firme triangle), viz obr. 1. Mimo to se energie projevuje i ve formě světla. Mezi další produkty hoření se řadí vývin zplodin hoření. [2-4]



Obrázek 1 Diagram požáru - fire triangle [2]

Oxidantem rozumíme přístup kyslíku v daném prostoru. Je to prvek, který hraje významnou roli v tomto procesu. Pokud budeme mít oxidantu příliš málo, bude hoření probíhat tlumeně a nebude se uvolňovat tak velké množství tepla. Pokud budeme mít opačnou situaci, je dynamika hoření výrazněji ovlivněna druhou složkou - palivem. [2]

#### 2.1.2 Palivo

Palivo je hlavním zdrojem pro proces hoření, tedy čím více ho máme, tím více toho může hořet. Základní rozdělení podle jeho skupenství je na tuhá, kapalná a plynná. Současně může jít jak o jednoduché, tak i o velmi komplexní sloučeniny. Původ může být přírodního (např. zemní plyn, dřevo), syntetického (např. polyuretan, ředidla) nebo semi-syntetického (např. benzín, mouka) charakteru. Semi-syntetickými látkami se rozumí technicky zpracované přírodní látky. Každé z těchto paliv vyžaduje specifické podmínky pro hoření, reakci s kyslíkem a způsob uvolňování tepla a produktů hoření. U tuhých a kapalných paliv nejprve dochází k přeměně paliva na plynné skupenství, které se pak projevuje jako plamenné hoření. Samotné plamenné hoření je pouze plynnou fází. U kapalných paliv je toho zajištěno dosažením teploty varu na povrchu tekutiny a tím uvolňování plynů. U pevných paliv je tento proces přeměny o něco složitější a je nazýván pyrolýzou neboli tepleným rozkladem. Zároveň je pro něj potřeba dodat větší energii a následkem toho jsou vyšší povrchové teploty. [2]

Mezi vybrané charakteristiky hoření patří limit hořlavosti, meze výbušnosti, teplota vzplanutí a vznícení, tepelná setrvačnost a HRR/RHR. [2]

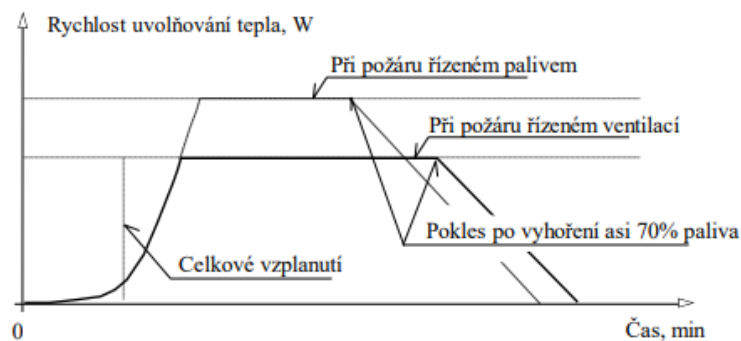
Limity hořlavosti (meze výbušnosti) je směs hořlavých plynů rozptýlených ve vzduchu v příslušné koncentraci. Pokud je koncentrace mimo tyto limity, nedojde k zapálení nebo výbuchu. V uzavřených prostorech jsou hodnoty mezi hořlavosti a výbušnosti shodné, v otevřených prostorech hrají roli další faktory jako je teplota okolí pro stanovení meze hořlavosti. [2]

Teplota vzplanutí (bod vzplanutí) je nejnižší teplota kapaliny, kdy se za určitých podmínek uvolňují páry, které svým množstvím mohou vytvořit zápalnou směs. [2, 5]

Teplota vznícení (bod vznícení) je nejnižší teplota horkého povrchu, kde za určitých podmínek dojde ke vznícení hořlavé kapaliny nebo plynu ve směsi se vzduchem. [2, 5]

Tepelná setrvačnost je vlastnost materiálu závisící na hustotě, tepelné kapacitě a součiniteli tepelné vodivosti. Tepelná vodivost udává, jak dobře materiál vede teplo. Hustota a tepelná kapacita nebo měrné teplo udávají, jak moc tepla je potřeba dodat na zahřátí materiálu. Samotná tepelná kapacita udává rychlost prohřívání materiálu, a to včetně povrchových teplot, které přímo souvisí s následným vznícením. Energie materiálem prochází od exponované strany k té neexponované a rychlost je dána i teplotním rozdílem povrchu materiálu a prostředí, kterému je vystaven. Čím je tepelná setrvačnost větší, tím pomaleji dochází k nárůstu povrchové teploty. Vlivem změny teploty, které je materiál vystaven, se mění hodnoty všech tří vlastností. Nejvýraznější je projev tepelné setrvačnosti před dosažením celkového vzplanutí v uzavřeném prostoru. [2]

Rychlost uvolňování tepla, neboli HRR (heat release rate) / RHR (rate of heat release), je množství uvolněné energie pro specifické palivo při jeho spalování. Přímo ovlivňuje rozvoj teploty v zasaženém prostoru. Pro modelování požáru se využívá např. t-kvadratický model (obr. 2). Fáze rozvoje je znázorněna jako exponenciální funkce a fáze útlumu jako lineární. Pro aplikaci skutečných hodnot RHR/HRR jsou dostupné databáze již odzkoušených předmětů, např. databáze NIST Fire Calorimetry Database (FCD), viz obr. 3. [2, 6, 7]



Obrázek 2 Model rychlosti uvolňování tepla v čase [8]



Obrázek 3 Skutečné hodnoty RHR/HRR (NIST FCD) [7]

### 2.1.3 Přestup tepla

Přestup tepla je fyzikální mechanismus sdílení energie v podobě tepla mezi jednotlivými hmotami s rozdílnými teplotami. Těleso o vyšší teplotě sdílí energii s tělesem o nižší teplotě, dokud nedojde k vyrovnání teplot obou těles na stejnou úroveň. Přestup tepla probíhá ve všech látkových skupenstvích a rozdělujeme ho na tři složky: vedení, proudění a radiaci. [2, 3]

Vedení tepla (conductive heat transfer) je proces, který probíhá pouze v pevných látkách. Podstatou je rozkmitání molekul vlivem teploty ve struktuře a jeho šíření hmotou. Typickým případem je vystavení např. stěnové konstrukce požárem pouze na jedné straně. Vedením se šíří teplo skrze konstrukci a postupně ohřívá nevystavenou stranu. Mezi faktory ovlivňující tento mechanismus patří rozdílné povrchové teploty a tepelná vodivost materiálu. [2]

Proudění tepla (convective heat transfer) je proces, který probíhá pouze v kapalinách a plynných látkách. Jde o fyzikální pohyb ohřáté látky prostředím s jinou teplotou (a tedy rozdílných fyzikálních vlastnostech). Omezujícím parametrem jsou ohraničující konstrukce prostředí, ve kterém k proudění dochází. [2]

Radiace (radiative heat transfer), také označovaná jako sálání, je proces probíhající zejména v plynném prostředí (a může probíhat i ve vakuu). Jde o šíření energie pomocí elektromagnetických vln mezi objekty s různými teplotami. Šíření probíhá vždy od tělesa s vyšší teplotou (např. požár) k příjemci (např. stěna). Mezi faktory, ovlivňujícími tento mechanismus, patří teplota povrchu emitujícího objektu, rychlost uvolňování tepla (HRR/RHR), teplota povrchu tělesa přijímajícího teplo, povrchová úprava a barva tělesa přijímajícího teplo a polohový faktor mezi tělesy (úhel). [2]

### 2.1.4 Proces hoření

Proces hoření lze rozdělit na několik typů a to žhnutí, plamenné hoření a hoření spojené s explozí. Pro každý typ je výrazný rozdíl v jeho dynamice a vlivu na okolní konstrukce. [2]

Pro žhnutí je charakteristické nedostatečné uvolňování hořlavých plynů při pyrolýze, a proto nemůže dojít k plamennému hoření. Obdobně se tak děje u omezeného přístupu oxidantu. Doprovodným produktem žhnutí je doutnání a je typické výraznou tvorbou kouře a malým vývojem tepla. Přechod z fáze žhnutí na plamenné hoření je nejvíce ovlivněn právě množstvím oxidantu v daném prostoru. [2]

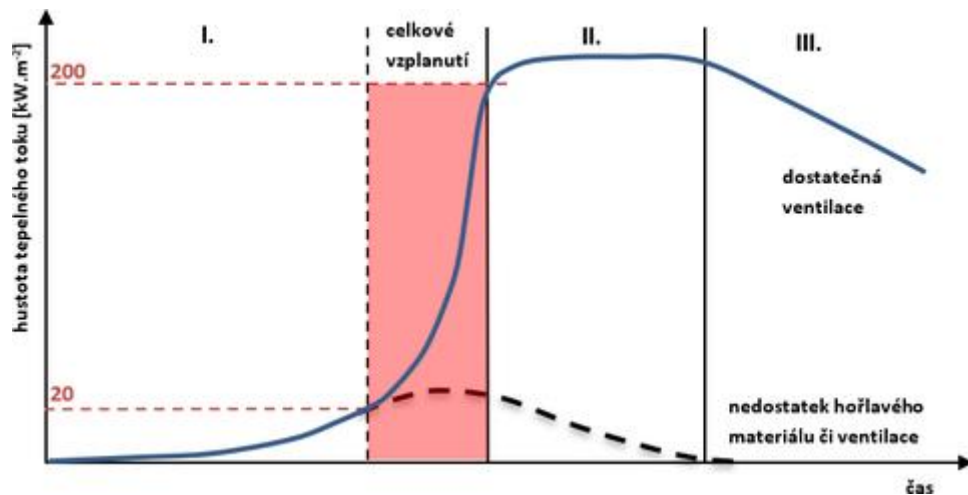
Plamenné hoření je nejčastěji pozorovatelné a rozeznatelné při požáru. Jde výhradně o hoření plynné fáze, tedy horkých plynů uvolňovaných při pyrolýze z paliva. Barva plamene nám indikuje, zda se jedná o dokonalé či nedokonalé spalování. Plamen modré barvy je charakteristický pro



dokonalé spalování, což je typické v případě čistého plynu uhlovodíku míseného se vzduchem. Plamen barvy oranžové, žluté, červené nebo bílé je charakteristický pro nedokonalé spalování. [2]

### 2.1.5 Rozvoj požáru v uzavřených prostorech

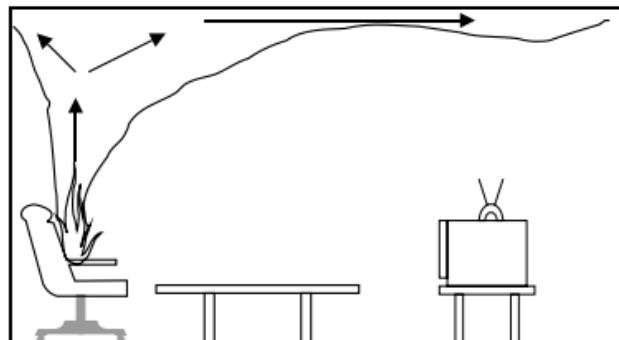
Požáry v uzavřených prostorech můžeme rozdělit na čtyři fáze: iniciace, rozvoj, flashover, ustálené hoření a dohořívání. V následujícím grafu (obr. 4) je znázorněn průběh požáru včetně vyznačení jednotlivých fází. Pro porovnání jsou znázorněny dvě křivky, jedna pro případ dostatečné ventilace zasaženého prostoru a druhá pro případ nedostatečného větrání nebo nedostatek hořlavého materiálu. [2]



Obrázek 4 Graf rozvoje požáru [9]

#### 2.1.5.1 Fáze iniciace

V úplném počátku musí dojít k iniciaci paliva a přítomnosti oxidantu. Dojde k plamennému hoření a i při odebrání zdroje zapálení hoření pokračuje. Z ohniska stoupají horké plyny obsahující vodní páru, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, saze a další toxické plyny. Fáze iniciace požáru je znázorněna na obr. 5. [2]



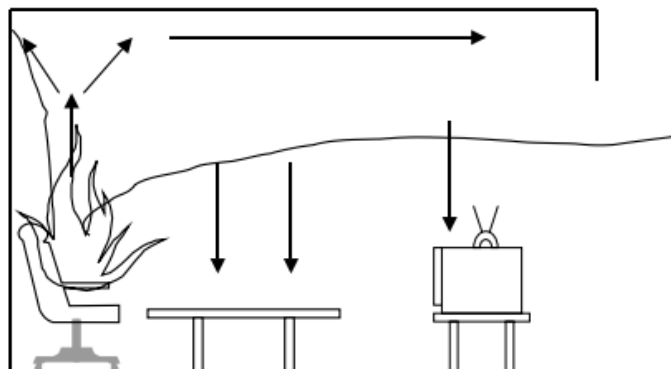
Obrázek 5 Fáze iniciace požáru [2]

#### 2.1.5.2 Fáze rozvoje

Plameny generují značné množství tepla v podobě tepelného toku. Nejvýrazněji probíhá sdílení tepla prouděním, kdy horké plyny stoupají směrem vzhůru prostorem. Jakmile narazí na vodorovnou ohraničující konstrukci, začnou se pohybovat horizontálně pod její úrovní do všech stran. Dále se tyto plyny začnou akumulovat a vytvářet vrstvu pod stropní úrovní. Ve fázi kumulace vrstvy se projeví výrazně i druhá složka sdílení tepla, a to radiace mezi horkou vrstvou kouře a zplodin hoření a okolním nezasaženým prostorem. Následkem je postupné ohřívání všech předmětů a

konstrukcí umístěných v prostoru, aniž by byly přímo zasaženy plamenným hořením. Fáze rozvoje požáru je znázorněna na obr. 6. [2]

Pokud u předmětů dojde k jejich ohřátí na teplotu vznícení, dojde u nich k plamennému hoření. Takto se postupně rozšiřuje požár z původního ohniska na další objekty v zasaženém prostoru. Rozvoj je zpravidla dynamický a progresivní. Tato vlastnost je patrná v grafu průběhu požáru na obr. 4. [2]



Obrázek 6 Fáze rozvoje požáru [2]

### 2.1.5.3 Fáze celkového vzplanutí - Flashover

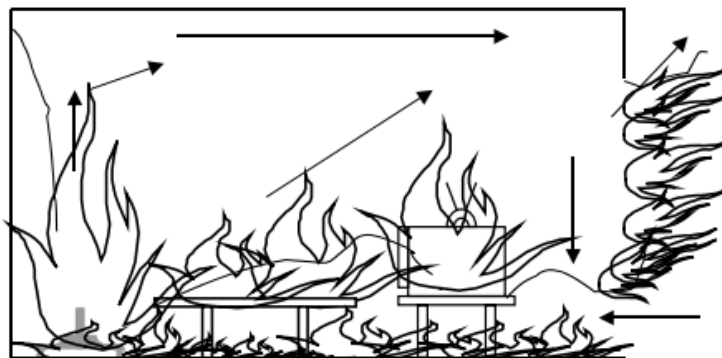
Při fázi rozvoje se účinek radiace neustále zvyšuje a způsobuje tak výrazné ohřívání okolních konstrukcí a všech předmětů umístěných v prostoru. Pod úrovní stropu se stále nachází akumulovaná vrstva kouře a její teplota se také zvyšuje. Pokud dosáhne teploty okolo 500 až 600 °C (generuje tepelný tok přibližně 20 kW/m<sup>2</sup>), dojde ke vznícení všech hořlavých předmětů v prostoru. Tento jev celkového vzplanutí je označován též jako *flashover efekt*. Požár v tuto chvíli přechází z lokálního ohniska (nebo vícero lokálních ohnisk) na požár celého prostoru a hoří vše, co může hořet. V grafu rozvoje požáru je tato fáze charakteristická téměř vertikálním nárůstem jak teplot, tak i hustoty tepelného toku. Fáze celkového vzplanutí je znázorněna na obrázku 7. [2]



Obrázek 7 Fáze celkového vzplanutí – flashover [2]

### 2.1.5.4 Fáze ustáleného hoření - Post-flashover

Po celkovém vzplanutí je hlavním regulátorem procesu hoření parametr ventilace (přístup oxidantu) společně s množstvím paliva. Fáze celkového vzplanutí je znázorněna na obrázku 8. [2]



Obrázek 8 Fáze ustáleného hoření - post-flashover [2]

### 3 Účinky požáru na stavební konstrukce

Při požáru jsou stavební materiály přímo ovlivněny procesem hoření. Vysoké teploty spolu s produkty hoření způsobují degradaci těchto hmot. Tu můžeme sledovat jak na povrchu materiálů, tak i uvnitř v jejich struktuře. V oblasti požárního vyšetřování se využívají termíny jako stupeň poškození požárem (DOFD), účinky požáru a vzorce požáru. Vymezení a definice těchto pojmů je uvedena v tab. 1. [10]

**Tabulka 1 Pojmy v oblasti požárního vyšetřování a účinků požáru na konstrukce [10, 11]**

anglický název	český název	definice
degree of fire damage	stupeň poškození požárem	stupeň poškození požárem je souhrnný popis konstrukce po požáru
fire effect	účinek požáru	účinky požáru jsou viditelné nebo měřitelné změny ve struktuře materiálu a na jeho povrchu následkem vystavení požáru
fire pattern	vzorec požáru	vzorce požáru jsou viditelné nebo měřitelné změny nebo tvary vzniklé účinky požáru

Stupeň poškození, kdy je materiál vystaven rozvíjejícímu se požáru, je funkce interakce materiálových vlastností, teploty generované procesem hoření a dobou vystavení požáru. Prvky, kterými je materiál ovlivněn, je mnoho. Patří mezi ně například kouř, tepelný tok, aerosoly atd. Úbytek objemu materiálu je závislý zejména na struktuře materiálu a tepelnému namáhání. [10]

### 3.1 Účinky požáru - Fire effects

Pro nás nejdůležitějším pojmem je účinek požáru (*fire effect*), kterým definujeme pozorovatelné a měřitelné změny ve struktuře materiálu nebo na jeho povrchu. Základní seznam účinků požáru podle NFPA je uveden v tabulce 2. [10]

**Tabulka 2 Základní seznam účinků požáru (NFPA, 2014) [10]**

účinek požáru (fire effect)	pozorovatelný	měřitelný
dosažená teplota	X	
úbytek hmotnosti	X	X
uhelnatění	X	X
odštěpování	X	
změna barvy	X	
tavení materiálu	X	
teplotní rozpínání a deformace	X	X
oxidace	X	
usazování částic	X	
čisté hoření	X	
kalcinace	X	X
okenní sklo	X	
nábytkové pružiny	X	
žárovky	X	
zranění osob	X	
duhový efekt	X	
zvýšené množství sazí v požárním hlásiči	X	

Pro lepší představu jednotlivých účinků požáru byly sestaveny jejich definice a jsou uvedeny v následující tabulce 3.

Tabulka 3 Definice účinků požáru [12–15]

účinek požáru (fire effect)	popis
dosažená teplota	Hodnocení na základě poškozených předmětů v zasaženém prostoru. Vhodným příkladem jsou plastové předměty, které se vlivem vysoké teploty taví.
úbytek hmotnosti	Redukce hmoty v závislosti na odhoření, tepelném rozkladu a probíhajícími chemickými reakcím.
uhelnatění	Proces tepelného rozkladu hmoty, kdy zůstává tzv. zuhelnatělá vrstva.
odštěpování	Dochází k němu vlivem pórových tlaků a napětí vzniklého od vysokých teplot. Výsledkem je vystřelování částí povrchových vrstev betonu.
změna barvy	Vlivem vystavení materiálů vysokým teplotám dochází k chemickým změnám a výsledkem mohou být změny barvy. Tuto změnu lze sledovat jak na povrchu konstrukce, tak i v jejím profilu.
tavení materiálu	Jde o fyzikální změnu, kdy vlivem vysokých teplot přechází hmota z pevného skupenství v taveninu.
teplotní rozpínání a deformace	Jde o fyzikální procesy při ohřevu hmoty.
oxidace	Jedná se o chemickou reakci materiálů vystavených požáru, zanechává pozorovatelné charakteristiky na jeho povrchu. Může jít např. o tenkou vrstvu oxidu na povrchu ocelové konstrukce.
usazování částic	Při nedokonalém spalování se vyvíjí kouř a saze. Jedná se o malé částice, které se usazují na chladnějším povrchu. Hnědé usazeniny jsou od kouře, černé usazeniny od sazí.
čisté hoření	Stopy po kouři a sazích odhoří z povrchu nehořlavé konstrukce zpravidla vlivem přímého působení plamene na konstrukci.
kalcinace	Kalcinace je proces dehydratace spolu s fyzikálními a chemickými změnami struktury sádry.
okenní sklo	U skleněných tabulí lze pozorovat roztavené části, praskliny nebo zcela poškozené skleněné tabule.
nábytkové pružiny	Následkem vystavení tepelnému namáhání dochází k poklesu tahové funkce pružin.
žárovky	U žárovek lze pozorovat jejich deformace tvaru vlivem vystavení vysokým teplotám, které může později přecházet až v úplné roztavení. Deformace probíhá zpravidla vně žárovky a jde o rozpínání „baňky“ žárovky.
zranění osob	Zranění či usmrcení osob při požáru může pomoci určit charakteristiky požáru a jeho šíření.
duhový efekt	Jde o vizuální barevný projev při pyrolýze, např. asfaltu, plastů a dřeva.
zvýšené množství sazí v požárním hlásiči	Saze jsou produktem nedokonalého spalování a tvoří je malé černé částičky uhlíku. Kouř společně se sazemi se ve zvýšené míře usazují na chladnějším povrchu.

### 3.2 Vyhodnocení účinků požáru

Data o poškození materiálů a konstrukcí slouží vyšetřovatelům jako podklad pro posouzení příčin požáru a jeho šíření. Příčinou požáru je iniciační předmět, u kterého došlo k prvotnímu zahoření a je označován jako ohnisko. Rozlišujeme zde pojmy jako *linie poškození* a *plocha poškození*. *Plocha poškození* je část povrchu konstrukce, kde došlo ke stejnému charakteru poškození. *Linie poškození* je hranice oddělující plochy rozdílných charakterů poškození. Tyto prvky specifikujeme na základě vizuálních (viz obrázek 9) nebo změřených parametrů. [10]

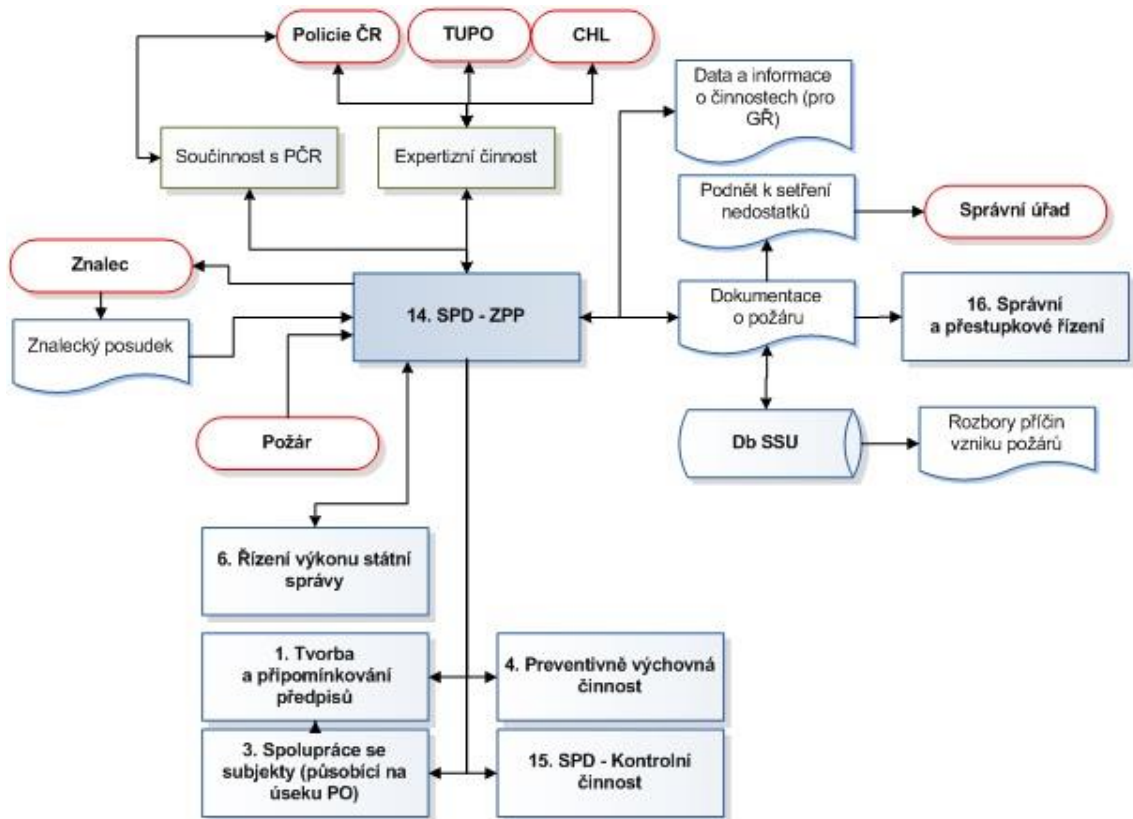


Obrázek 9 Konstrukce po požáru - viditelné účinky požáru [16]

### 3.3 Požární vyšetřování v České republice

Požární vyšetřování (Fire investigation) je název pro proces počínající u inspekce požářiště až po vydání znaleckého posudku. Cílem je zjistit iniciační zdroj požáru, neboli místo, odkud se dále šířil a jakým způsobem se šířil.

V České republice se požárním vyšetřováním zabývá Státní požární dozor (SPD) a činnost je nazývána Zjišťování příčin požáru (ZPP). První fází je návštěva na místě události označovaného jako požářiště. Součástí je ověření, zda nedošlo k porušení předpisů souvisejících s místem požáru. Provádí se listinná dokumentace, fotodokumentace a dokumentace audiovizuální. Podle potřeby může být na místo přizván i další orgán státní správy nebo další osoby s odbornou způsobilostí. Dále může být vyžádána spolupráce s Technickým ústavem požární ochrany, chemické laboratoře a orgánu Policie ČR. V další fázi vyšetřování je možné pokračovat i mimo místo události, které může zahrnovat laboratorní posouzení, stanovení příčin vzniku a jejich ověření. Po celou dobu procesu se zpracovává dokumentace zvaná Dokumentace o požáru. Zahrnuje spis o požáru, vyjádření expertizního pracoviště, znalecký posudek soudního znalce. Výsledky vyšetřování jsou rovněž evidovány do statistického sledování událostí a následně zaneseny do Statistické ročenky HZS ČR. Dále se výsledky ZPP využívají při likvidaci pojistných událostí. Celý proces výkonu SPD je znázorněn na obrázku 10. [17]

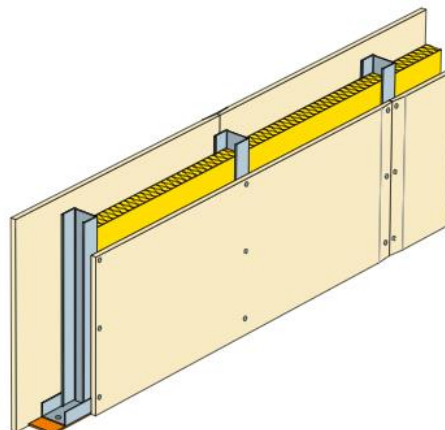


Obrázek 10 Proces výkonu Státního požárního dozoru - zjišťování příčin vzniku požárů [17]

Výkon ZPP má velmi cennou úlohu i pro oddělení požární prevence. Z výsledků lze vysledovat trendy příčin požárů a v případě potřeby zanést jistá opatření do příslušných právních předpisů. [17]

## 4 Deskové materiály používané jako opláštění

Pro dnešní dobu je typické stavět co nejrychleji a nejefektivněji. A ideálně ještě formou tzv. suché výstavby. Tyto požadavky perfektně splňují montované konstrukce tvořené nosným roštem a opláštěním deskovým materiálem, viz obrázek 11. Nosný rošt může tvořit například nosná konstrukce dřevěného lehkého systému nebo ocelové pozinkované profily. Díky popsáním výhodám našly tyto konstrukce velké uplatnění ve výstavbě a je pravděpodobné, že tomu tak bude i nadále.



Obrázek 11 Příklad využití deskového materiálu jako opláštění - sádkartonová příčka [18]

Dále je potřeba tyto konstrukce hodnotit i z hlediska požární bezpečnosti staveb. Pro posuzování konstrukcí a jejich návrh nám mohou posloužit katalogy výrobců na základě odzkoušených sestav. Nicméně tuto možnost můžeme uplatnit primárně pro posuzování požární odolnosti těchto konstrukcí. A navíc v těchto případech jsou používány zejména desky určené pro vystavení vysokým teplotám. Pro účely požárního vyšetřování a analýzy konstrukce po požáru nám tedy tyto podklady stačit nebudou a je potřeba se podrobněji těmito konstrukcemi zabývat.

### 4.1 Druhy deskových materiálů

Pro všechny dále zmíněné typy desek jsou projevy při požáru odlišné. Závisí to zejména na jejich struktuře a užití hořlavých hmot bez další ochrany. Sádrovláknité, cementovláknité a cementotřískové desky jsou klasifikovány třídou reakce A1-A2, tedy jako nehořlavé stavební hmoty. OSB desky spadají do skupiny třídy reakce na oheň D a jde o hořlavé stavební hmoty. [19–22]

#### 4.1.1 Sádkartonové desky

Sádkartonové desky se vyrábí ze směsi sádry, kartonu a příměsí. Hlavní surovinou je dihydrát síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Při výrobě desek se tekutá směs sádry nanáší mezi vrstvy papíru, následně se lisuje a umísťuje do sušičky. Finální úpravou je ořezávání desek na požadované rozměry. Mezi hlavní výhody sádry patří objem vody vázaný ve struktuře, který výrazně přispívá k odolnosti vůči vysokým teplotám. [23, 24]

#### 4.1.2 Sádrovláknité desky

Sádrovláknité desky se vyrábějí ze směsi sádry a papírových vláken získaných např. z recyklace. Pod vysokým tlakem se tato homogenní směs (bez dalších pojidel) stlačuje na pevné desky, které se později suší a řežou na požadované rozměry. Charakteristická je pro tyto desky vysoká objemová hmotnost, velká pevnost a odolnost, a také vyšší odolnost na účinky požáru (odolnost zajišťuje sádra). [25]



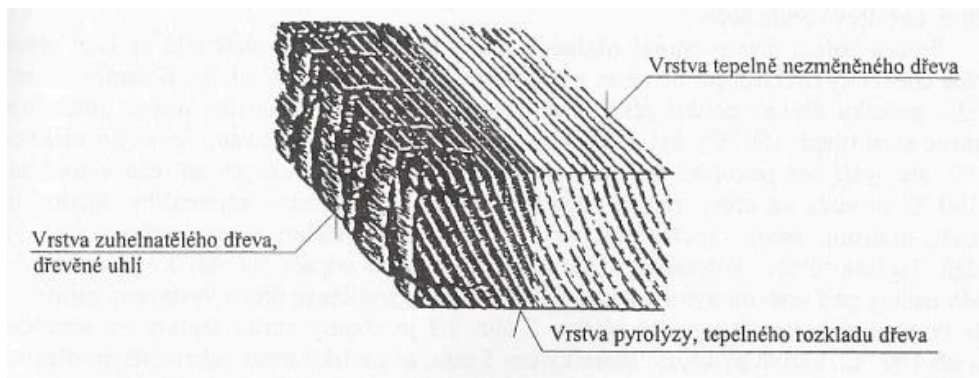
### 4.1.3 Cementovláknité desky

Cementovláknité desky se vyrábějí z kompozitní cementové směsi a celulózových vláken. Cementotřískové desky se vyrábějí lisováním dřevěných třísek a cementové směsi. Oba typy desek vykazují dobré pevnostní charakteristiky a soudržnost při požáru, nicméně odolnost na účinky požáru je nižší než například u desek na bázi sádry. [19, 20]

### 4.1.4 Desky na bázi dřeva

Do kategorie dřevěných desek spadají zejména OSB desky a všechny jejich obdobná provedení. OSB (oriented strand board) je deska z orientovaných plochých dřevěných třísek spojených lepidlem (např. umělé pryskyřice). Při výrobě jsou lisovány v několika vrstvách. Mezi charakteristické vlastnosti patří velká tuhost a pevnost. [21]

U OSB desek je charakteristickým účinkem požáru uhelnatění a úbytek hmotnosti. Při expozici dřevěné konstrukce požáru nejprve vzplane a silně hoří povrchová vrstva, dokud se nevytvoří zuhelnatělá vrstva dřevní hmoty. Ta se při dalším hoření chová jako izolační bariéra, omezuje přístup oxidantu, tepelně izoluje a tlumí hoření. Díky této vlastnosti si zbytkový průřez zachovává stále stejné vlastnosti jako při běžném stavu. Pod zuhelnatělou vrstvou se nachází vrstva pyrolýzy, kde dochází k tepelnému rozkladu dřevní hmoty (viz obrázek 12). [22]



Obrázek 12 Odhořívání dřeva při požáru [22]

## 5 Sádrokartonové desky

### 5.1 Sádrokarton

Sádrokartonovou desku tvoří sádrové jádro, ke kterému jsou z obou stran pevně připojeny kartony (silný trvanlivý papír) a zároveň vytvářejí rovnou pravoúhlou plochu na povrchu. Dle účelu užití desky lze volit různé typy kartonů a současně přidávat příměsi do jádrové směsi pro dosažení požadovaných vlastností. Další specifickou úpravou jsou profily hran desek. Ty mohou mít tvar kolmé, zkosené, snížené, polokulaté, polokulaté snížené a kulaté hrany. Běžné jmenovité tloušťky desek jsou 9,5 mm, 12,5 mm, 15 a 18 mm. [26–28]

Definice, požadavky a zkušební metody pro sádrokartonové desky jsou uvedeny v normě ČSN EN 520+A1. [26]

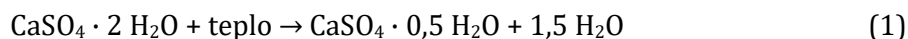
### 5.2 Výroba desek

Sádra a následné produkty z ní se vyrábí ze základní přírodní suroviny, která se nazývá sádrovec. Jedná se o dihydrát síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (viz obrázek 13) a v chemicky čisté podobě obsahuje 20,9 % chemicky vázané vody. Alternativou je využití syntetického sádrovce jako základní suroviny. [29]

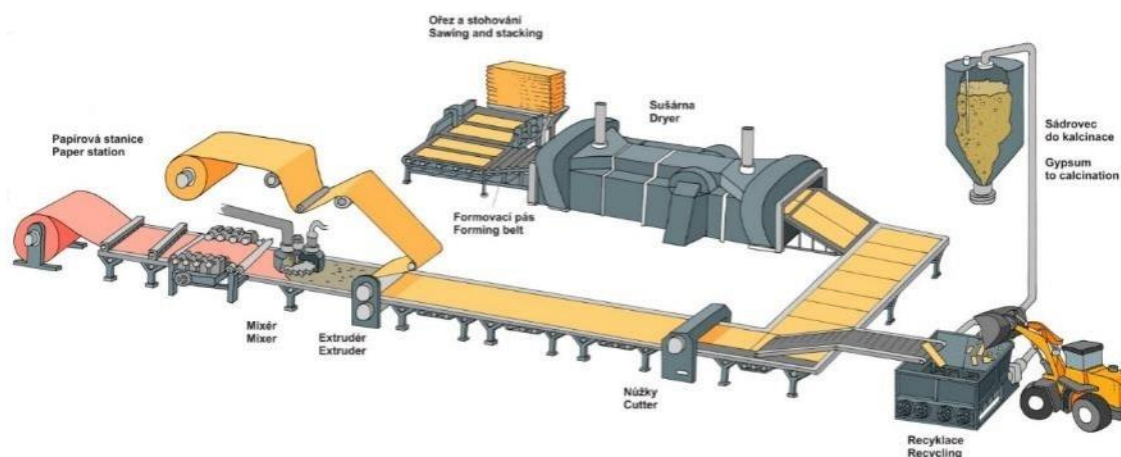


Obrázek 13 Sádrovec (dihydrát síranu vápenatého) [30]

Sádra se vyrábí přeměnou dihydrátu síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  na polohydrát síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ . Tento proces se nazývá kalcinace (dehydratace) a probíhá podle následující rovnice 1. [29]



Z hlediska materiálu rozlišujeme dva typy sádry, a to přírodní a průmyslově vyrobenou. Přírodní hemihydrát síranu vápenatého se vyskytuje jako minerál bassanit. Průmyslově vyráběná sádra se vyznačuje menšími krystaly oproti té přírodní, ale jinak je jejich chemické složení identické. Sádrokartonové desky se vyrábí ze směsi sádry, kartonu a příměsí. Tekutá směs sádry a příměsí se nanáší na spodní vrstvu papíru. Po rozprostření směsi se přiklopí horní vrstvou papíru a následuje válcování do požadované tloušťky. Po vytáhnutí sádry jsou desky umístěny v sušičce, aby se odpařila přebytečná chemicky nevázaná voda. Finální úpravou je ořezávání desek na požadované rozměry. Celý proces výroby je znázorněn na obrázku 14 [23, 24, 31]



Obrázek 14 Proces výroby sádrokartonových desek [23]

### 5.3 Využití sádrokartonových desek

Existuje více typů sádrokartonových desek pro různé účely, např. požární, akustické, do vlhkého prostředí. Tloušťka sádrokartonových desek se pohybuje v rozmezí 9 až 30 mm. Nejběžněji používané desky v ČR jsou tloušťky 12,5 mm a 15 mm. Jejich využití je jako opláštění konstrukce příček, stěn a podkroví nebo jako obklady pro konstrukce, které je potřeba chránit před nepříznivými vlivy, jako například požár. [24, 27, 28]

### 5.4 Konstrukce a montáž sádrokartonových konstrukcí

Sádrokartonové desky lze využít jako opláštění pro více typů konstrukcí. Může jít jak o svislé konstrukce, tak i horizontální nebo konstrukce ve sklonu. Nejčastěji se desky připevňují na nosný rošt (nosný v rámci této konstrukce). Jako další využití lze provádět obklady sádrokartonovými deskami, které chceme chránit před účinky vnějšího prostředí. Pod tím si můžeme představit například mechanické poškození, ochranu proti vlhkému prostředí, nebo jako ochranu proti účinkům vysokých teplot.

Mezi svislé konstrukce s využitím sádrokartonových desek patří zejména příčky a předstěny. Ty se nejčastěji připevňují na nosný rošt provedený z lehkých ocelových pozinkovaných profilů nebo dřevěných sloupků. U ocelových profilů se rozlišuje několik typů, základní z nich jsou uvedeny v následující tabulce (tabulka 4). [28, 32]

Tabulka 4 Ocelové profily sádrokartonových konstrukcí [32, 33]

označení profilu	tl. plechu	popis
UW	0,6 mm	vodící profil pro stěnové konstrukce (obrázek 16)
CW	0,6 mm	stěnové konstrukce a konstrukce podhledů (obrázek 15)
UA	2,0 mm	stěnové konstrukce, konstrukce podhledů a místní vyztužení konstrukcí
CD	0,6 mm	konstrukce podhledů a předsazených stěn
UD	0,6 mm	konstrukce podhledů a předsazených stěn

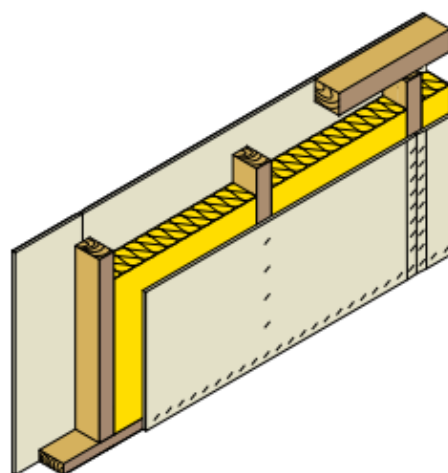


Obrázek 15 Profil CW [32]



Obrázek 16 Profil UW [32]

Dále je možné využít sádrokartonové desky jako opláštění dřevěného skeletu (zejména lehkého, viz obrázek 17). Nosný rošt zde tvoří dřevěné sloupky v rozteči zpravidla odpovídající rozměrům poloviny šířky desky. [34]



Obrázek 17 Systém lehkého dřevěného skeletu opláštěného sádrokartonovými deskami [34]

Pro konstrukce podhledů se používají různé typy závěsu z pozinkovaného plechu. Roznášecí rošt může být tvořen plechovými profily, nebo dřevěnými hranoly.

Pro připevnění desek k podkladu se využívají různé typy šroubů nebo sponky. Šrouby jsou ocelové a rozlišují se hlavně podle typu podkonstrukce a případně tloušťky plechu profilu. Sponky jsou ocelové a využívají se pro dřevěnou podkonstrukci. [28, 32, 34]

## 5.5 Vlastnosti a požadavky na sádrokartonové desky

Významnou složku sádrokartonových desek hraje velké množství vázané vody ve struktuře desky a její vlhkosti. Sádra sama o sobě je nehořlavá a 21 % její hmotnosti tvoří voda. Obsah volné vody je zhruba 3 % a závisí na teplotě okolí a vlhkosti prostředí. Orientačně jeden metr čtvereční desky o tloušťce 12,5 mm obsahuje okolo dvou litrů vody. Její vypařování při tepelné expozici vyžaduje značné množství energie a času a lze tomuto procesu přisoudit až 90 % odolnosti při vystavení požáru. Díky tomu si sádrokartonové desky dlouho drží svou celistvost a současně přispívají i k požární odolnosti celé konstrukce. [24, 35]

Požadavky na vlastnosti sádrokartonových desek včetně zkušebních postupů, popřípadě odkazů na další zkušební postupy v jiných normách, jsou uvedeny v normě ČSN EN 520+A1: Sádrokartonové desky - Definice, požadavky a zkušební metody. [26]

### 5.5.1 Mechanické vlastnosti

V následující tabulce (tabulka 5) jsou uvedeny požadavky na mechanické vlastnosti sádrokartonových desek podle ČSN EN 520+A1.

**Tabulka 5 Požadavky na mechanické vlastnosti [26]**

mechanické vlastnosti	popis
pevnost ve smyku	pevnost spojení kartonu se sádrovým jádrem (zkouškou není změřena skutečná pevnost, ale spíše pevnost spojení desky a subkonstrukce, do které je upevněna) zkušební metoda podle normy ČSN EN 520+A1
pevnost v tahu za ohybu	zatížení v tahu za ohybu (hodnoceno v příčném i podélném směru) zkušební metoda podle normy ČSN EN 520+A1
průhyb pod zatížením	pouze pokud je požadováno zkušební metoda podle normy ČSN EN 520+A1

### 5.5.2 Chování při požáru

V následující tabulce (tabulka 6) jsou uvedeny požadavky na chování sádrokartonových desek při požáru podle ČSN EN 520+A1.

**Tabulka 6 Požadavky na chování při požáru [26]**

chování při požáru	popis
reakce na oheň	klasifikace možná podle ČSN EN 520+A1 přílohy B bez dalších zkoušek, nebo podle zkoušek a klasifikace podle EN 13501-1
požární odolnost	vztahuje se na celý systém konstrukce (například příčka v celé skladbě) stanovení a klasifikace požární odolnosti podle normy EN 13501-2

### 5.5.3 Odolnost proti rázu

Vztahuje se na celý smontovaný systém (nikoliv na jednotlivý výrobek) a zkušební postup je uveden v normě ISO 7892. [26]

#### 5.5.4 Propustnost vodní páry

Vyjadřuje se jako difúzní odpor proti prostupu vodní páry a mohou se použít navržené hodnoty podle EN 12524. Zkušební metoda pro prostup vodních par je uvedena v EN ISO 12572. [26]

#### 5.5.5 Průvzdušnost

Pro sádrokartonové desky, použité jako obložení vnějších stěn, musí být splněna hodnota uvedená v ČSN EN 520+A1. Stanovení průvzdušnosti se provádí podle EN 12114. [26]

#### 5.5.6 Akustické vlastnosti

V následující tabulce (tabulka 7) jsou uvedeny požadavky na akustické vlastnosti sádrokartonových desek podle ČSN EN 520+A1.

**Tabulka 7 Požadavky na akustické vlastnosti [26]**

akustické vlastnosti	popis
vzduchová neprůzvučnost	vztahuje se na celý systém konstrukce (například příčka v celé skladbě) zkušební metody podle norem EN ISO 140-3 a EN ISO 717-1
zvuková pohltivost	vztahuje se na celý systém konstrukce (například příčka v celé skladbě) zkušební metody podle normy EN ISO 354

#### 5.5.7 Tepelná odolnost

Vyjadřuje se jako tepelná vodivost a mohou se použít navržené hodnoty podle EN 12524. Zkušební metoda pro stanovení tepelné vodivosti je uvedena v EN ISO 12664. [26]

#### 5.5.8 Nebezpečné látky

Sádrokartonové desky (materiály použité pro její výrobu) nesmí uvolňovat v konečných podmínkách nadlimitní hodnoty. [26]

#### 5.5.9 Druhy sádrokartonových desek

V normě ČSN EN 520+A1 jsou uvedeny druhy sádrokartonových desek včetně jejich popisu, viz tabulka 8. Toto rozdělení odpovídá klíčovým vlastnostem a účelu použití jednotlivých druhů. Zároveň je možná kombinace více označení (druhů) pro jeden výrobek. Příkladem může být Protipožární impregnovaná deska RFI (DFH2) Activ'Air® od firmy Saint-Gobain Construction Products CZ a.s., kde nese současně označení druhu desky D+F+H2. [26, 36]

Tabulka 8 Druhy sádrokartonových desek [26]

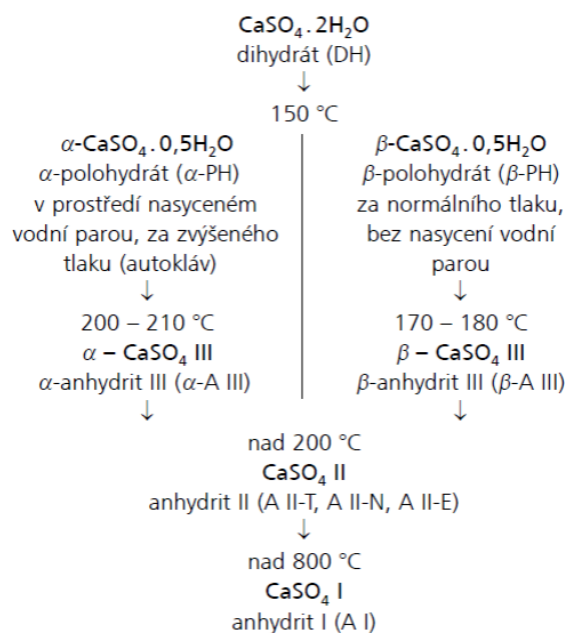
druh	název	popis
A	stěnová deska	čelní plocha vhodná pro provedení sádrové omítky nebo dekorace
H	stěnová deska se sníženou absorpcí vody	obsahují přísady přispívající ke snížení absorpce vody podle míry absorpce jsou rozděleny na druh H1, H2 a H3
E	plášťová deska	plášťové desky pro vnější stěny, ale nesmí být trvale vystaveny vlivům počasí snížená absorpce vody a minimální prostupnost vodní páry
F	stěnová deska se zvýšenou pevností jádra při zvýšených teplotách	lícová plocha vhodná pro provedení sádrové omítky nebo dekorace obsahují minerální vlákna nebo jiné příměsi pro zvýšení soudržnosti jádra při vysokých teplotách
P	deska (druh P)	lícová plocha vhodná pro provedení sádrové omítky možné spojení s dalšími materiály ve formě desek nebo panelů
D	deska s kontrolovanou objemovou hmotností	lícová plocha vhodná pro provedení sádrové omítky deska pro speciální účely
R	deska se zvýšenou pevností	lícová plocha vhodná pro provedení sádrové omítky nebo dekorace zvýšená podélná i příčná lomová pevnost
I	deska se zvýšenou tvrdostí povrchu	lícová plocha vhodná pro provedení sádrové omítky nebo dekorace vyšší odolnost povrchu (speciální výrobní postup)

## 5.6 Chování sádrokartonu při požáru

### 5.6.1 Fyzikální a chemické změny

Při vystavení sádrokartonových desek vysokým teplotám dochází jak k fyzikálním, tak i chemickým změnám. Obecně můžeme celý proces nazvat dehydratací nebo také kalcinací. Zásadní chemickou změnou je úbytek vody z materiálu. Nejprve mizí ze sádry volně vázaná voda a později i chemicky vázaná voda. Volná voda se začne odpařovat při dosažení teploty 100 °C. Následně mezi 100 °C až 200 °C se přeměňuje i chemicky vázaná voda a začne se odpařovat. Toto rozmezí se může mírně lišit o cca ± 50 °C podle chemického složení původního sádrovce. Po dosažení teploty 200 °C (včetně zmíněné tolerance vlivem původního chemického složení) už nezůstává v materiálu žádná voda a nazýváme ho anhydrit. Současně s v průběhu odpařování chemicky vázané vody dochází i k fyzikálním změnám v krystalické struktuře materiálu. Nejprve jde o poškození původních krystalů, které při dalším zvýšení teploty až nad 800 °C zcela změní strukturu. [29, 37]

Celý proces včetně prvotní přeměny dihydrátu síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  na polohydrát síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  je znázorněn na následujícím schématu (obrázek 18). [29]



Obrázek 18 Schéma dehydratace sádrovce a procesu kalcinace [29]

## 5.6.2 Vlastnosti závislé na teplotě

### 5.6.2.1 Měrné teplo (specific heat)

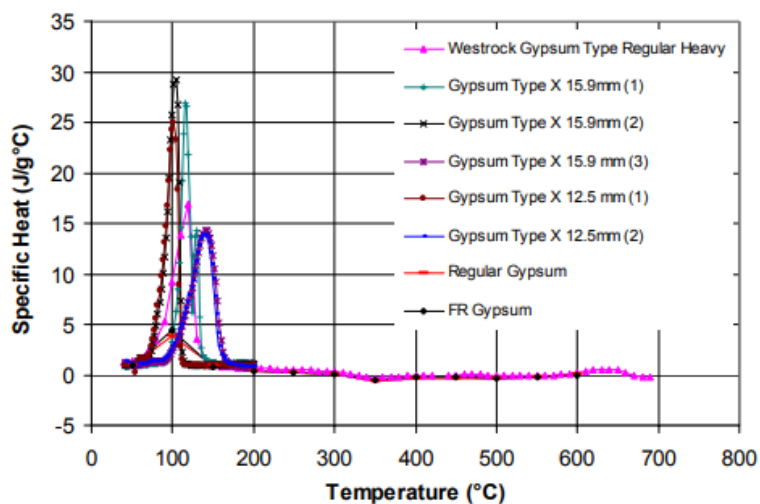
Měrné teplo materiálu je definováno jako množství tepla potřebného k ohřátí jednoho kilogramu hmoty o jeden teplotní stupeň. Veličina se značí písmenem  $c$  a jednotky jsou  $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$  ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ).

Hodnota měrného tepla sádrokartonu se může lišit v závislosti na typu desky, a to jak při teplotě 20 °C, tak i při zahřívání na vyšší teploty. [38]

Hlavním parametrem, který ovlivňuje hodnoty měrného tepla při tepelné expozici, je obsah vázané vody ve struktuře sádrokartonové desky. V grafech odzkoušených desek je to patrné jako výrazný nárůst hodnoty měrného tepla až klidně na 25násobek počáteční hodnoty. Interval tohoto nárůstu probíhá přibližně v rozmezí teplot 80 °C až 200 °C. Po skončení tohoto rozmezí se hodnota měrného tepla opět ustálí na podobné hodnotě jako při teplotě do 80 °C a pokračuje dále s narůstající teplotou téměř konstantně. Graf průběhu měrného tepla je vykreslen v obrázku 19. [39, 40]

V některých grafech se uvádí i dva po sobě jdoucí výrazné nárůsty s následným poklesem. K prvnímu dochází okolo teploty 100 °C a dosahuje hodnoty až cca 25násobku počáteční hodnoty. V tu chvíli se jedná zejména o odpařování volně vázané vody. Současně s nadále stoupající teplotou se okolo teploty 150 °C přidává i odpařování chemicky vázané vody. Následuje druhý okolo teploty 200 °C a ten dosahuje okolo 12násobku počáteční hodnoty. V tomto případě se jedná o vypařování chemicky vázané vody. [39]





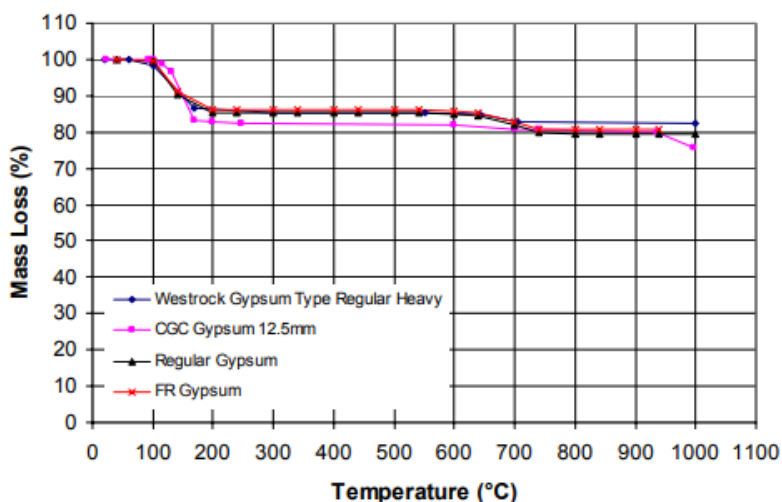
Obrázek 19 Měrné teplo (specific heat) sádrokartonové desky [40]

### 5.6.2.2 Úbytek hmotnosti (mass loss)

Úbytek hmotnosti je definováno jako procentuální úbytek vztažený k původní hmotnosti. Parametr je bez písmenného označení a bez jednotek. Počáteční hodnota je vždy stejná a to 100 %.

Hlavním parametrem ovlivňujícím úbytek hmotnosti desky je množství volné a chemicky vázané vody. Objem volné vody závisí na dlouhodobých podmínkách prostředí, ve kterém je deska vystavena. Chemicky vázaná voda je dána již výrobním procesem desek. Graf průběhu měrného tepla je vykreslen v obrázku 20.

Blízkou veličinou je objemová hmotnost, která se značí písmenem  $\rho$  a jednotky jsou  $kg/m^3$ . Avšak její měření při vyšších teplotách může být obtížné s ohledem na objemovou degradaci materiálu. [41]

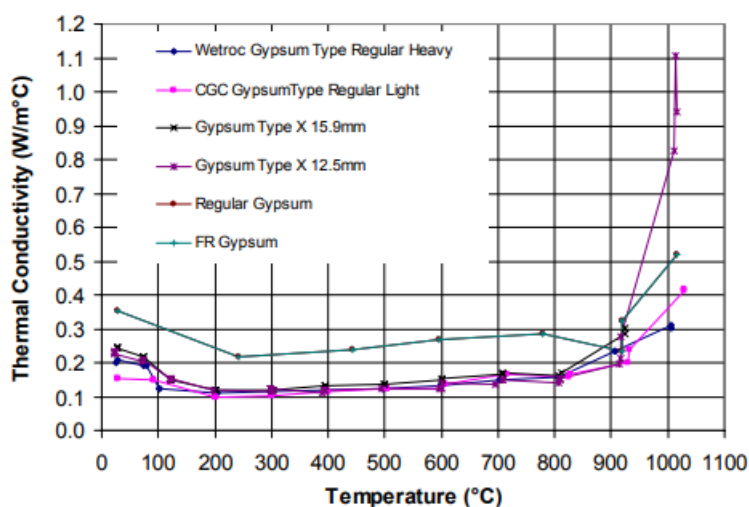


Obrázek 20 Úbytek hmoty (mass loss) sádrokartonové desky [40]

### 5.6.2.3 Tepelná vodivost (Thermal Conductivity)

Tepelná vodivost materiálu je definována jako schopnost materiálu vést teplo. Udává rychlost šíření tepla mezi jednotlivými místy materiálu o rozdílných teplotách. Součinitel tepelné vodivosti se značí písmenem  $\lambda$  a jednotky jsou  $W/m \cdot ^\circ C$  ( $W/m \cdot K$ ). [42]

Tepelnou vodivost materiálu velmi ovlivňuje mikrostruktura daného materiálu. Tím je myšleno uskupení mikročástic jednotlivých složek, ze kterých se materiál skládá. Příkladem je velikost a orientace jednotlivých zrn kompozitního materiálu. Graf průběhu měrného tepla je vykreslen v obrázku 21. [40]



Obrázek 21 Teplená vodivost (thermal conductivity) sádrokartonové desky [40]

### 5.6.3 Účinky požáru na sádrokartonové konstrukce

Mezi vizuální projevy sádrokartonové konstrukce zasažené požárem můžeme zařadit změnu barvy, usazování sazí na povrchu, ohořelý karton nebo zcela odhořelá vrstva kartonu. [10, 16]

Prvním pozorovatelným jevem při vystavení sádrokartonové desky účinkům požáru je zuhelnatění a následně odhoření papíru (kartonu) na exponovaném povrchu. Sádra pod povrchem papíru postupně vlivem dehydratace mění svou barvu. Dochází k postupnému zesvětlování ve směru od exponované strany. Při delším vystavení požáru může dojít k zuhelnatění papíru na neexponované straně. [10, 16]

### 5.6.4 Měření hloubky kalcinace pro účely požárního vyšetřování

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, při kalcinaci sádrokartonu dochází až k jeho úplné dehydrataci. Dehydrovaná vrstva se nazývá anhydrit a je typická svojí nesoudržností při mechanickém zásahu. Celý proces probíhá v rozmezí teplot od 100 °C až do přibližně 250 °C.

Hloubka kalcinace je úměrná celkové tepelné expozici při vystavení sádrokartonové desky účinkům požáru. Jde o měřitelný účinek požáru a výsledky lze vyhodnotit pomocí některé ze zobrazovacích metod. Metoda měření kalcinace má uplatnění v lokalizaci ohniska požáru. [10, 16]

První zmínka o kalcinaci sádrokartonových desek pro účely požárního vyšetřování se objevila ve Spojených státech amerických již v roce 1955. Z počátku šlo pouze o vizuální vyhodnocení na základě hodnocení změny zbarvení průřezů desek. První kvantifikace hloubky kalcinace proběhla až roku 1999. V roce 2001 byl uveden postup systematického vyhodnocení hloubky kalcinace pro účely požárního vyšetřování v publikaci NFPA 921. [10, 16]

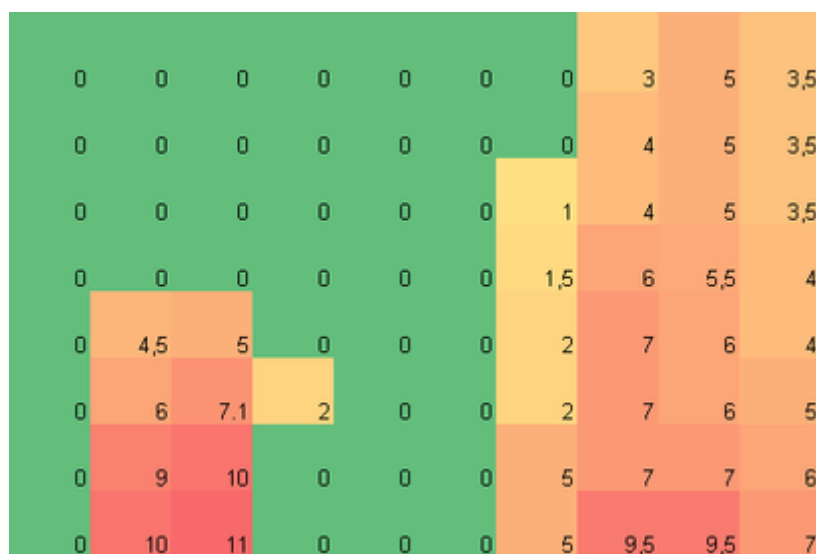
Metoda měření hloubky kalcinace má specifické použití a je potřeba zvážit faktory jako deformace stěn vlivem požáru nebo hasební vody, které mohou výsledky znehodnotit. Pro měření se využívá přístroj nazývaný hloubkoměr, viz obrázek 22. Jedná se o jednoduché zařízení s měřícím trnem. Trn projde vrstvou, kde proběhla kalcinace a zastaví se o vrstvu, kde ještě neproběhla a její pevnost je výrazně vyšší. Měření se provádí v požadovaných bodech na konstrukci. [10, 16]



Obrázek 22 Hloubkoměr pro měření hloubky kalcinace [16]

Měření hloubky kalcinace hloubkoměrem není vhodné pro velké plochy vzhledem k četnosti provedení měření tak, aby byl zaznamenán profil pro celou plochu. Vhodnější je použití pro lokální část plochy, kde se předpokládá, že došlo k největší tepelné expozici.

Výsledky měření lze dobře vykreslit grafickými metodami. Vhodné je využít tabulkového programu, kde zaznamenáváme naměřené hodnoty podle provedeného rastru na konstrukci v jednotlivých buňkách. Pak lze využít podbarvení buněk dle zapsaných hodnot, viz obrázek 23. [10, 16]



Obrázek 23 Grafické znázornění hloubky kalcinace na konstrukci [16]

Další metodou měření hloubky kalcinace je pozorování změn zbarvení průřezu desky. Mezi vrstvou, kde již proběhla kalcinace a zbytkem průřezu, je patrná tmavší linie. Jedná se o vizuální metodu hodnocení a je závislá zejména na šetrném způsobu vyjmutí vzorku z konstrukce. Pokud bychom vzorek vyřezávali, dojde ke znehodnocení příčného řezu. Je tedy lepší jednotlivé vzorky opatrně vylamovat.

Poslední možností, jak měřit hloubku kalcinace, je lokální odstranění vrstvy anhydritu (dehydrované sádry) a změření její hloubky vůči okolnímu povrchu. Na odstranění vrstvy je vhodné použít hrubší plastový kartáč. Metoda je vzhledem ke své pracnosti vhodná spíše pro lokální účely, nikoliv pro větší části konstrukce. Navíc je potřeba si vždy ponechat plochu původní tloušťky desky pro porovnání. [10, 16]

## 6 Ověření chování sádrokartonových desek při požárních zkouškách

Následující kapitola zahrnuje praktickou část této práce a je rozdělena na dvě dílčí části. První z nich (kapitola 6.1) je zaměřena na asistenci při výrobě nových hořáků pro zkušební pec miniFUR. Realizace nových hořáků navazovala na jejich předchozí návrhy, které nejsou součástí této práce a byly zkoušeny mimo zkušební pec. Výsledkem je jejich odzkoušení a vyhodnocení teplotního pole uvnitř zkušební pece, a současně porovnání s původní konfigurací jednoho hořáku.

Druhá část (kapitola 6.2) se věnuje zkoušení sádrokartonových desek vystavených požáru a jejich následnému hodnocení po tepelné expozici (viz obrázek 24). Příprava a zkoušky byly zajištěny na zkušební peci miniFUR v prostorách fireLAB na Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB). Odzkoušené desky byly podkladem pro zhodnocení z hlediska degradace sádrokartonu (procesu kalcinace). Toto měření probíhalo ve spolupráci s nrap. Ing. Jakubem Bacou, který zajistil i metodu měření a potřebné pomůcky. V závěru jsou interpretovány výsledky požárních zkoušek sádrokartonových desek a měření kalcinace.



Obrázek 24 Degradace sádrokartonových desek při požární zkoušce [35]

## 6.1 Zkušební pec miniFUR

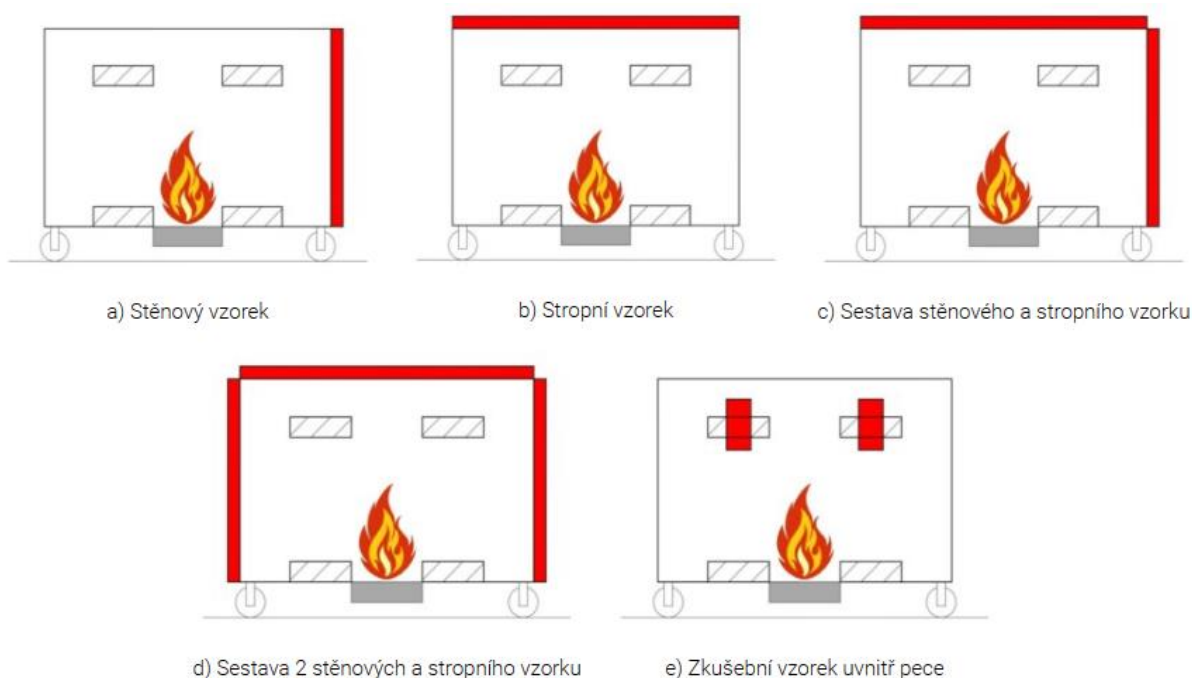
### 6.1.1 Malá zkušební pec miniFUR

Pec miniFUR (viz obrázek 25) je určena pro středněrozměrové indikativní zkoušky požární odolnosti a je umístěná v požární laboratoři FireLAB na UCEEB v Buštěhradu. Jedná se o přemístitelný demontovatelný mobilní box o rozměrech 1,2 m × 0,8 m × 0,8 m. Zkušební vzorky je možné umístit jak ve vertikální rovině (stěnový vzorek 0,8 m × 0,8 m), tak i v horizontální rovině (stropní vzorek 1,2 m × 0,8 m). Zároveň lze tyto varianty kombinovat a zkusit současně stěnový i stropní vzorek. Dále je možné umístit zkušební vzorek do pece, všechny varianty viz obrázek 26. [43]



Obrázek 25 Malá zkušební pec miniFUR (UCEEB) [44]

Větrání pece je zajištěno přirozenými otvory v nedemontovatelných stěnách. Pro měření teplot v peci je umístěno osm pláštěových termočlánků. Vždy čtveřice je umístěna v jedné výškové úrovni, první je ve výšce 0,25 m nad podlahou pece a druhá je ve výšce 0,7 m nad podlahou pece. [44]



Obrázek 26 Možnosti umístění zkušební vzorky na pec miniFUR [45]

### 6.1.2 Úprava hořáků v peci miniFUR

Před provedením požárních zkoušek, kterým se věnujeme dále (kapitola 6.2), bylo cílem provést několik úprav na zařízení pece. První z nich byla výměna stávajícího plynového hořáku za nové.

V peci byl původně instalován pouze jeden pískový hořák umístěný na středu podlahy pece. Důvodem výměny bylo jeho neefektivní fungování, a to jak z hlediska spotřeby plynu při požárních zkouškách, tak i nerovnoměrnému rozložení teplot v peci. Původní pískový hořák vytvářel difúzní plamen, viz obrázek 27.



**Obrázek 27 Difúzní plamen - pískový hořák [44]**

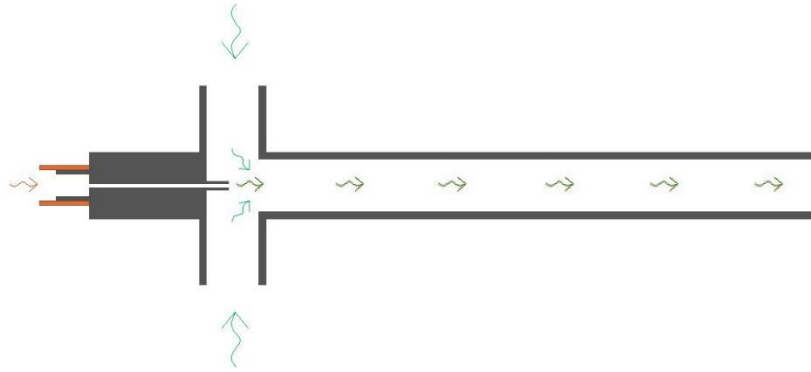
Teplotní pole uvnitř pece, vytvořené tímto hořákem, je značně nerovnoměrné po výšce pece (v závislosti na výšce umístěných měřících zařízeních, viz obr. 31). Nedochozí k dostatečnému promíchání horkých plynů v celém objemu a tepelný tok generovaný hořákem stoupá přímo pod stropní rovinu. Vytváří dvě výškové teplotní úrovně. Nižší úroveň (ve výšce 0,25 m nad podlahou pece) dosahuje nižších teplot oproti horní rovině. Tato konfigurace vytváří vhodné teplotní podmínky pouze pro zkoušení stropního vzorku.

Nové hořáky byly vyrobeny svépomocí v požární laboratoři fireLAB na UCEEB v Buštěhradu ve spolupráci s vedoucím práce, panem doc. Ing. Vladimírem Mózerem, PhD. Návrh navazuje na již dříve zkoušené hořáky mimo zkušební pec, kde bylo zkoušeno jejich technické provedení a funkčnost.

Celková délka nového hořáku je přibližně 0,6 m. Hlavní část tvoří pozinkovaná trubka o délce 0,5 m profilu 1". Na konci, ze kterého vychází plamen, je našroubována rozšiřující pozinkovaná koncovka. Na opačné straně trubky je našroubován pozinkovaný kříž. Převod z hadicového plynového vedení je proveden pomocí mosazných součástí a uvnitř kříže je zakončen kontaktní špičkou (tryskou). Všechny šroubované spoje bylo potřeba řádně zatěsnit teflonovou páskou, aby nedocházelo po trase k únikům plynu.

Na obrázku 28 níže je znázorněn schematický řez proudovým hořákem. Červené šipky označují proudění plynu a zelené proudění (přisávání) vzduchu. Ke smísení a tzv. předmíchání směsi plynu a vzduchu dochází uvnitř kříže a dále tato předmíchaná směs proudí k vyústění proudového hořáku. Po zapálení předmíchané směsi na konci hořáku dojde k plamennému hoření, viz obrázek 29.





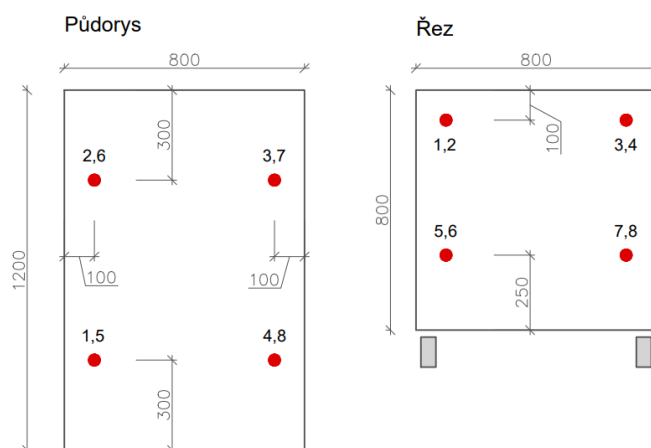
**Obrázek 28 Schematický řez proudovým hořákem**

Další důležitou otázkou bylo jaký vliv má délka proudového hořáku na stálost plamenu. Původní délka (zhruba 0,6 m) výrazně zvětšuje pracovní plochu zkušební pece. Proto jsme dva hořáky zkrátili, jeden o 0,1 m a druhý o 0,2 m. Ty jsme společně s jedním o původní délce odzkoušeli mimo pec miniFUR.



**Obrázek 29 Předmíchaný plamen - proudový hořák**

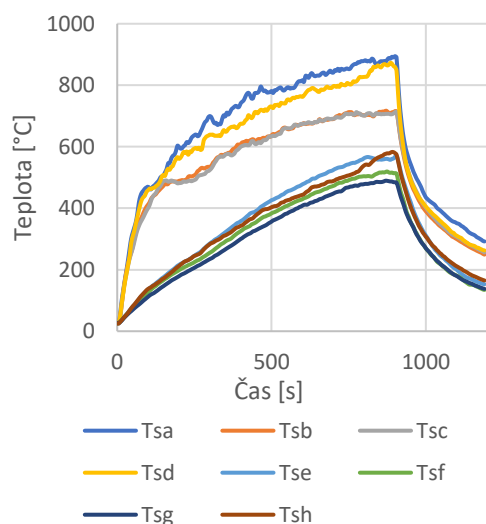
Výsledkem bylo, že do pece budou umístěny čtyři proudové hořáky o délce cca 0,6 m. Délka tak zůstala stejná jako původní návrh, protože plamen vykazoval nejlepší stálost, a to i při nižším výkonu hořáku. V tomto uspořádání byl proveden první zkušební test, kdy byly zapojeny plášťové termočlánky pro měření teplot uvnitř pece. Umístění termočlánku je zobrazeno na obrázku 30. Proudové hořáky byly instalovány na provizorní pomocnou konstrukci. Ovládání pece probíhalo z vedlejší místnosti pomocí řídicí jednotky.



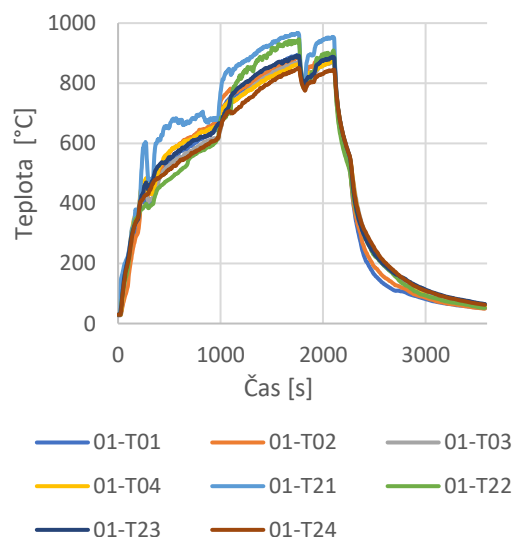
Obrázek 30 Umístění termočlánků v peci miniFUR

Po provedené zkoušce byly porovnány naměřené hodnoty z termočlánků. Na obrázku 31 je vidět teplotní pole při starší zkoušce, kdy byl v peci umístěn pouze jeden pískový hořák. Jeho rozložení odpovídá dvěma výškovým polím a souvisí i s umístěním termočlánků. Teplotní pole v peci je výrazně nerovnoměrné, kdy rozdíly mezi hodnotami jsou až 200 °C. Po výměně hořáků je rozložení teplot mnohem více rovnoměrné (viz obrázek 32) a rozdíly mezi teplotami nejsou tak velké. Nové hořáky jsou vhodněji umístěny a současně dochází k lepšímu promíchání plynů uvnitř pece.

Termočlánky označené Tsa až Tsd (u původní zkoušky s pískovým hořákem) a 01-T01 až 01-T04 (u zkoušky s novými hořáky) jsou umístěny 100 mm pod stropem pece. Termočlánky označené Tse až Tsh (u původní zkoušky s pískovým hořákem) a 01-T21 až 01-T24 (u zkoušky s novými hořáky) jsou umístěny 250 mm pod podlahou pece. Označení termočlánků u zkoušek je pouze informativní pro rozlišení polohy termočlánku a souvisí se zapojením konektoru do ústředny. Ústředna má více konektorů pro zapojení termočlánků jak v peci, tak i na zkoušených vzorcích.



Obrázek 31 Rozložení teplot v peci miniFUR (původní pískový hořák)



Obrázek 32 Rozložení teplot v peci miniFUR (nové hořáky)

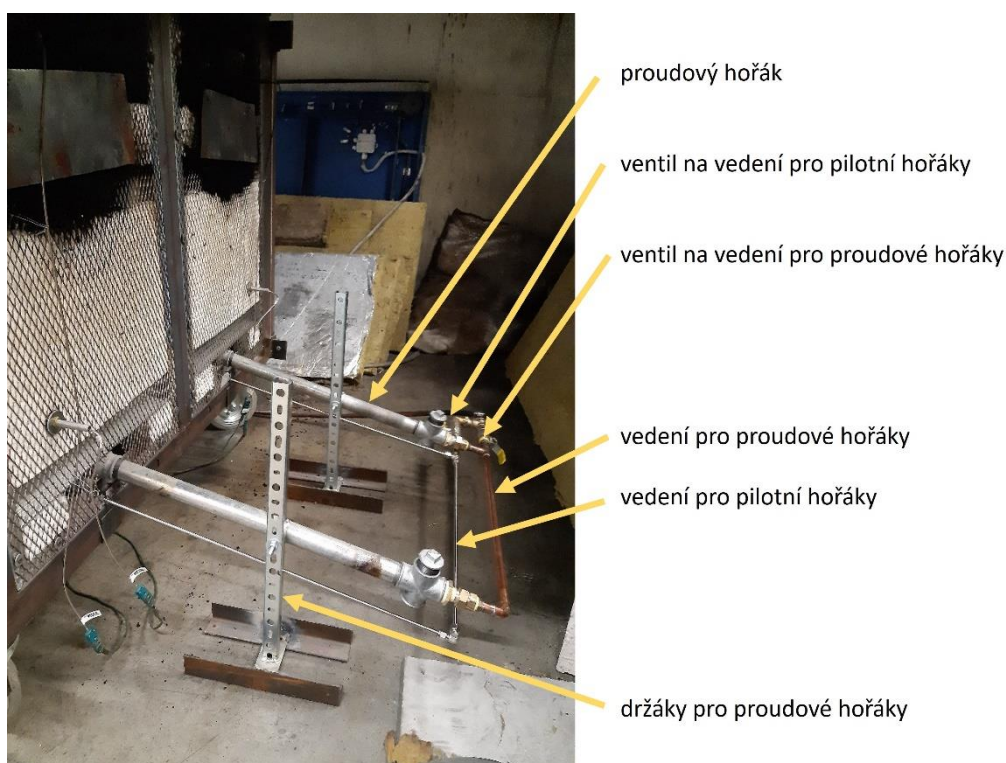


### 6.1.3 Doplnění pilotních hořáků a výsledná konfigurace

Ke stávajícím hořákům bylo doplněno oddělené vedení pilotních hořáků. Provedeno bylo pomocí trubiček z nerezové oceli o malém vnitřním průměru (do 5 mm). Konec trubičky je před vyústěním v peci zahnutý před koncové rozšíření proudového hořáku. Na vedení pro pilotní hořáky je osazen ventil pro možnost redukce výkonu.

Současně byla tryska uvnitř kříže, ve kterém dochází k mísení přiváděného plynu a vzduchu, vyměněna za novou s větším vnitřním průměrem (z  $\varnothing$  1 mm na  $\varnothing$  2 mm). Důvodem byla nestálost a omezení výkonu hořáku sledované při předchozích zkouškách.

Plynová cesta (vedení) od zdroje je provedena nejprve hadicovým vedením a následně kovovým vedením k hořákům. Vždy dva hořáky umístěné na jedné z podélných stran pece mají společné kovové vedení pro přívod plynu. Vzájemné spojení mezi zdrojem a dvojicí hořáků je provedeno hadicovým vedením. Na počátku kovové trasy je umístěna odbočka pro pilotní hořáky se svým vlastním redukčním ventilem. Na pokračování trasy je dále umístěn (za odbočkou pro pilotní hořáky) redukční ventil pro proudové hořáky. Celá tato konfigurace (kovové vedení) je vzájemně permanentně propojeno. Každý proudový hořák má svůj vlastní držák, který slouží zároveň jako podpora pro kovové vedení plynové trasy. Celá konfigurace hořáků na jedné straně pece je vidět na obrázku 33.



Obrázek 33 Finální konfigurace hořáků pro zkušební pec miniFUR

### 6.1.4 Zkouška hořáků ve výsledné konfiguraci

Cílem bylo ověřit fungování hořáků při postupném navyšování jejich výkonu a současně jejich stálost během zkoušení. Pro zkoušku výsledné konfigurace byla sestavena pouze jedna dvojice hořáků umístěné na jedné podélné straně (viz obrázek 33).

Stálost a funkčnost proudových hořáků za vyšších výkonů byla zajištěna novou (zvětšenou) tryskou pro přívod plynu na vstupu do hořáku. Nedošlo tak k omezení výkonu, který jsme

sledovali u předchozích zkoušek na hodnotě okolo 125 kW. Po úpravě již bylo možné výkon zvýšit až na 150 kW bez jakéhokoliv omezení. Průběh zkoušky s postupným navyšováním výkonu dokumentují obrázky 34 až 37.

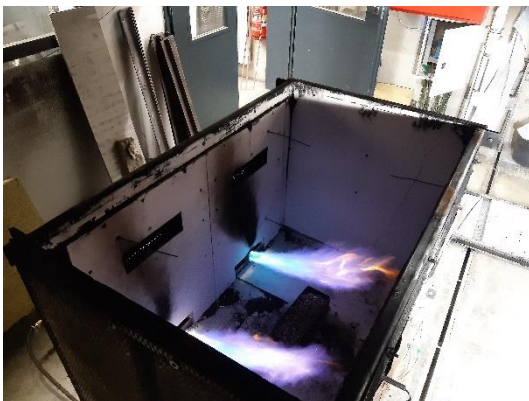
Pilotní hořáky fungovaly také dle předpokladu a jen bylo nutné regulovat výkon ventilem osazeným na jejich vedení. Při plném otevření ventilu a výkonu 15 kW generovaly pilotní hořáky příliš velký plamen, který přesahoval horní hranu otevřené zkušební pece. Bez omezení by tak bylo každé manuální zapalování pilotních hořáků nebezpečné pro provádějícího technika.



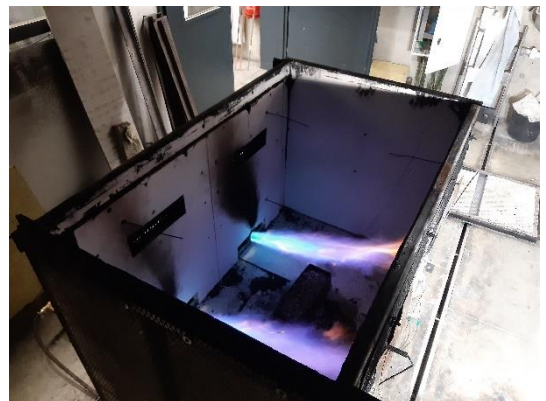
Obrázek 34 Hořáky při výkonu 15 kW



Obrázek 35 Hořáky při výkonu 50 kW



Obrázek 36 Hořáky při výkonu 100 kW



Obrázek 37 Hořáky při výkonu 150 kW

## 6.2 Zkoušky sádrokartonových desek na peci miniFUR

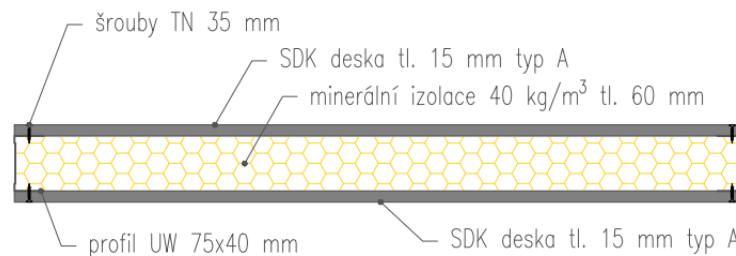
### 6.2.1 Výběr sádrokartonových desek pro zkoušení

V první fázi výběru pro zkoušení jsme se zaměřili na vhodné typy desek. Z nich jsme vybrali desky typu A a typu F. Typ desky A vzhledem k jeho velkému uplatnění. Jedná se o desku „základních“ vlastností. Tím rozumíme desku bez významných příměsí upravujících její následné vlastnosti. Dále typ desky F vzhledem jejímu uplatnění v konstrukcích, u kterých je požadavek na odolávání vysokým teplotám. Další typy desek jsme pro požární zkoušky nezvažovali, zejména kvůli svým specifickým vlastnostem a míře jejich využití při suché výstavbě.

Dostupnost tloušťky desek typu A a F byla dohledána u výrobců sádrokartonových desek v České republice. Desku typu A je možné zajistit v tloušťkách 9,5 mm, 12,5 mm, 15 mm, 18 mm a 25 mm. Deska typu F je možné zajistit v tloušťkách 12,5 mm, 15 mm, 18 mm. [27, 28]

Po zhodnocení dostupnosti jednotlivých desek (pro objednání) jsme se rozhodli v rámci této práce zkoušet pouze typ desky A v tloušťce 15 mm v provedení jednoduchého opláštění (pouze jedna deska). Výběr byl brán i s ohledem na časovou náročnost provedení zkoušek a následného měření degradace desek.

Dále bylo potřeba zvážit provedení vzorku tak, aby co nejvíce reprezentovalo reálný stav stavební konstrukce, která by byla vystavena účinkům požáru. Proto jsme navrhli skladbu příčky podle příslušných katalogů výrobců desek (a zároveň systémového řešení). Nosné profily konstrukce tvoří ocelové tenkostěnné pozinkované profily UW 75 mm a CW 75 mm, oboje tloušťky 0,6 mm. Vnitřní prostor je vyplněn minerální izolací o objemové hmotnosti  $40 \text{ kg/m}^3$  v tloušťce 60 mm. Opláštění je provedeno z každé strany jednou deskou typu A tloušťky 15 mm. Spojovací prostředky jsou šrouby TN 35 mm. Celková tloušťka skladby zkušební vzorku je 105 mm a je zobrazena na následujícím obrázku (obrázek 38)



Obrázek 38 Skladba vzorku pro zkoušky

Celkem budou provedeny dvě série zkoušek sádrokartonových desek. Obě série budou obsahovat tři identické zkušební vzorky a budou odzkoušeny na požadovaný časový interval.

### 6.2.2 Sledovaný časový interval

Časový interval pro zkoušení sádrokartonových desek byl vhodně zvolen s ohledem na čas porušení desek (celistvost desky) při vystavení vysokým teplotám. Časy porušení desek byly převzaty podle výpočtu v eurokódu EN 1995-1-2 přílohy C kap. C.2.3. Uvedený postup je v příloze přímo určen pro konstrukce s obvodovým pláštěm a nosnými dřevěnými sloupky. Nicméně vzhledem k tomu, že jde o čas porušení samotného opláštění, byla tato rovnice převzata pro stanovení orientačního maximálního času ke zkoušení sádrokartonových desek. Výpočty času porušení jsou určeny pro obvodové pláště provedené ze sádrokartonových desek typu A, H a F podle příslušných rovnic. Pro desky typu A je použita rovnice C.8 z EN 1995-1-2 v následujícím znění (rovnice 2). [46]

$$t_f = 2,8 \times h_p - 14 \quad (2)$$

$t_f$  čas porušení desky [min]

$h_p$  tloušťka desky [mm]

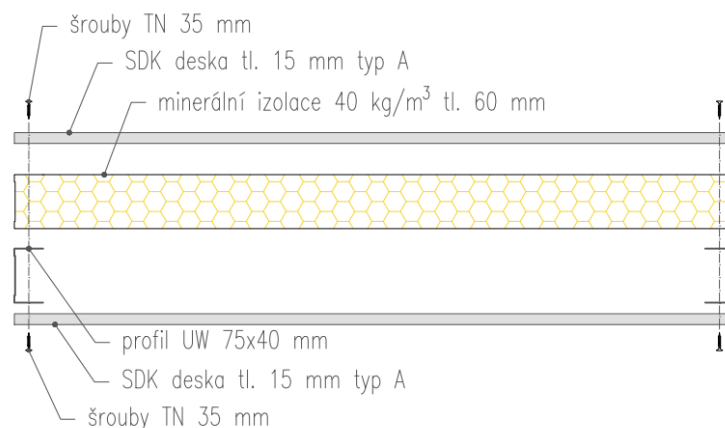
Pro desku typu A tloušťky 15 mm dojde k porušení desky v čase 28 minut podle výpočtu z rovnice 2. Současně s ohledem na průběh kalcinace desky byl první čas zkoušení zvolen na 15 minut (900 s). Po provedení první série zkoušek byl určen i druhý čas, a to shodně na 15 minut. Při měření hloubky kalcinace bude porovnán vzorek, který byl změřen v ten samý den po zkoušce a vzorek, který byl uskladněn ve vnitřních prostorách laboratoře po dobu jednoho týdne. Přehled zkoušených vzorků s návazností na měření kalcinace je uveden v následující tabulce (tabulka 9).

**Tabulka 9 Přehled zkoušených vzorků s návazným měřením kalcinace**

série vzorků	označení vzorku	doba zkoušení [min]	měření kalcinace
01	vzorek 01	15 minut	týden po provedení zkoušky
	vzorek 02		
	vzorek 03		
02	vzorek 04	15 minut	v den zkoušky po vychladnutí vzorku
	vzorek 05		
	vzorek 06		

### 6.2.3 Montáž zkušebních vzorků

Montáž všech vzorků probíhala v prostorách hlavní haly UCEEB v druhé polovině listopadu. Skladba zkoušené konstrukce je znázorněna v rozloženém stavu (rozdělená na jednotlivé části) na obrázku 39. Celkové půdorysné rozměry vzorku jsou 1250 mm × 1000 mm. Vzorky byly připraveny tak, aby do nich v den zkoušení bylo možné umístit termočlánky pro měření teplot uvnitř skladby. Proto nebyla horní vrstva SDK přišroubována k ocelovým profilům.



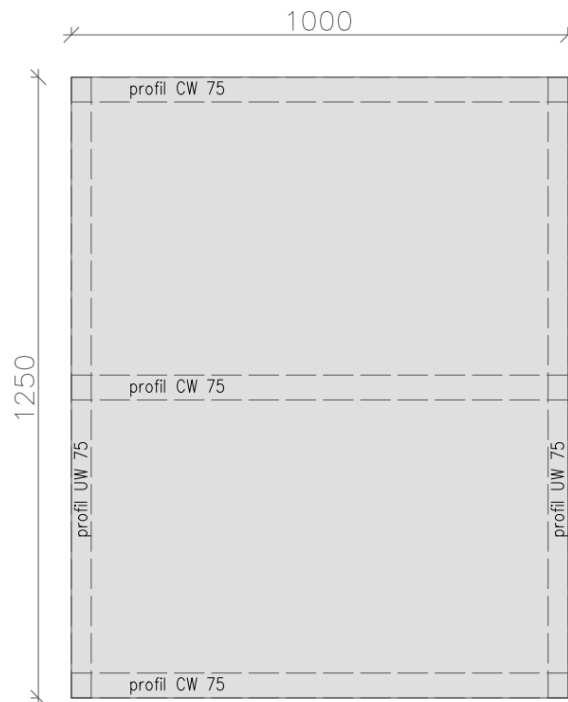
**Obrázek 39 Skladba zkušebního vzorku – rozdělená na jednotlivé části**

Na každý vzorek připadala jedna SDK deska typu A tloušťky 15 mm o rozměrech 2000 mm × 1250 mm. Ta byla rozdělena na polovinu tak, aby bylo vytvořeno opláštění z obou stran.



Hlavní část konstrukce tvořil rošt z ocelových tenkostěnných pozinkovaných profilů UW a CW. Profily byly nastříhány pomocí nůžek na plech na požadované rozměry. Profily UW byly uloženy na okrajích delší hrany, tedy v délce 1250 mm. A profily CW byly umístěny dva na krajích a jeden uprostřed, všechny v délce 995 mm. Délka u profilů CW byla snížena o 5 mm tak, aby bylo možné jejich vsunutí do profilu UW a šířka celého vzorku měla 1000 mm. Zároveň byly oba krajní profily CW uloženy otevřením ven pro vytvoření madel pro další manipulaci se vzorkem.

Následně byl rošt sestaven podle nákresu z obr. 40 a z horní strany se provedlo zaklopení SDK deskou. Deska se upevnila k ocelovým profilům pomocí šroubů TN 35 mm po celém obvodu a včetně středového sloupku.



**Obrázek 40 Rozmístění UW a CW profilů**

Vzniklý prostor mezi ocelovými profily byl vyplněn minerální izolací v tloušťky 60 mm (viz obrázek 41 a obrázek 42). Vyplněny byly i dutiny v profilech CW, aby bylo zabráněno tepelným mostům.



**Obrázek 41 Umístění minerální izolace mezi ocelové profily**



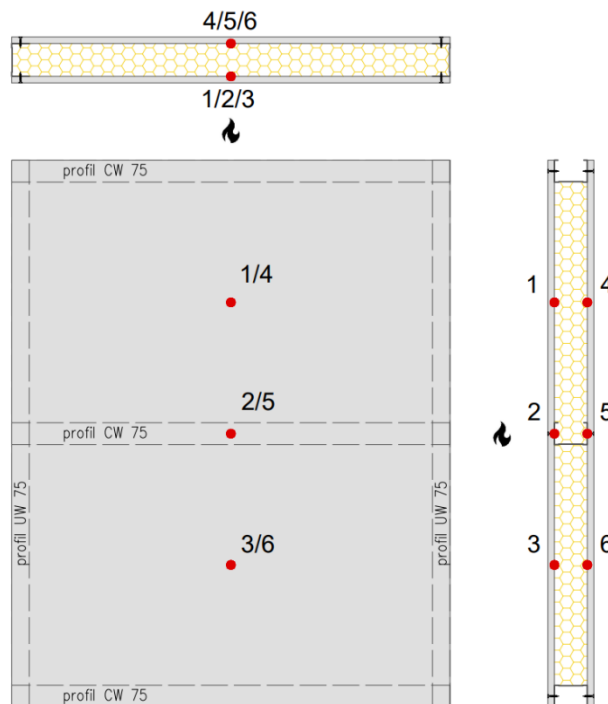
**Obrázek 42 Vnitřní skladba před zaklopením desky z horní strany**

Následně po umístění termočlánků do skladby vzorku bylo provedeno opláštění deskou z horní strany a připevnění opět šrouby TN 35 mm po celém obvodu.

Všechny vzorky byly umístěny na paletu a uskladněny v prostorách hlavní haly UCEEB do doby provedení zkoušek.

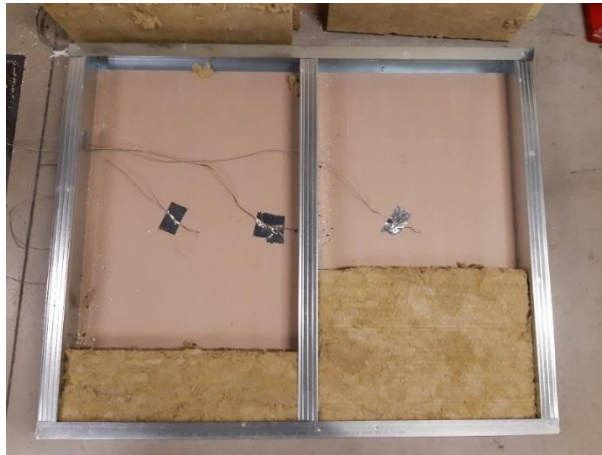
#### 6.2.4 Umístění měřících zařízení – termočlánků

Do každého zkušebního vzorku bylo umístěno celkem 6 termočlánků typu K. Vždy tři zevnitř na povrchu exponované desky a druhá trojice zevnitř na povrchu neexponované desky. Z každé trojice termočlánků na povrchu desky byly dva umístěny na střed plochy segmentu desky a třetí byl umístěn mezi středový profil CW a desku. Každý termočlánek byl zafixován na požadovaném místě hliníkovou páskou, která byla nalepena zhruba 3 cm od konce termočlánku. Rozmístění termočlánků ve zkušebním vzorku je zakresleno na následujícím obrázku (obrázek 43).



**Obrázek 43 Umístění termočlánků uvnitř vzorku**

Pro zapuštění všech termočlánků do vnitřku vzorku byl využit otvor v krajním CW profilu. Ve středovém profilu byla potřeba vyvrtat díru o průměru 8 mm, aby bylo možné protáhnout termočlánek i na druhou polovinu vzorku. Takto byly nejprve umístěny termočlánky č. 1,2,3 (viz obrázek 44). Poté byl prostor mezi profily vyplněn minerální izolací a následně byly umístěny zbylé tři termočlánky na povrch horní desky. Pouze termočlánek na středovém profilu CW bylo vhodnější umístit přímo na něj (viz obrázek 45). Následně byla konstrukce zaklopena horní deskou a přišroubována k profilům.



Obrázek 44 Umístění termočlánků uvnitř vzorku



Obrázek 45 Detail umístění termočlánku – na středovém profilu CW

Měřena byla vždy teplota těsně za povrchem místa, kde byl termočlánek připevněn. Data byla zaznamenávána po celou dobu zkoušky pomocí ústředny, kterou se ovládá zkušební pec. Výstupy byly v tabulkovém formátu.

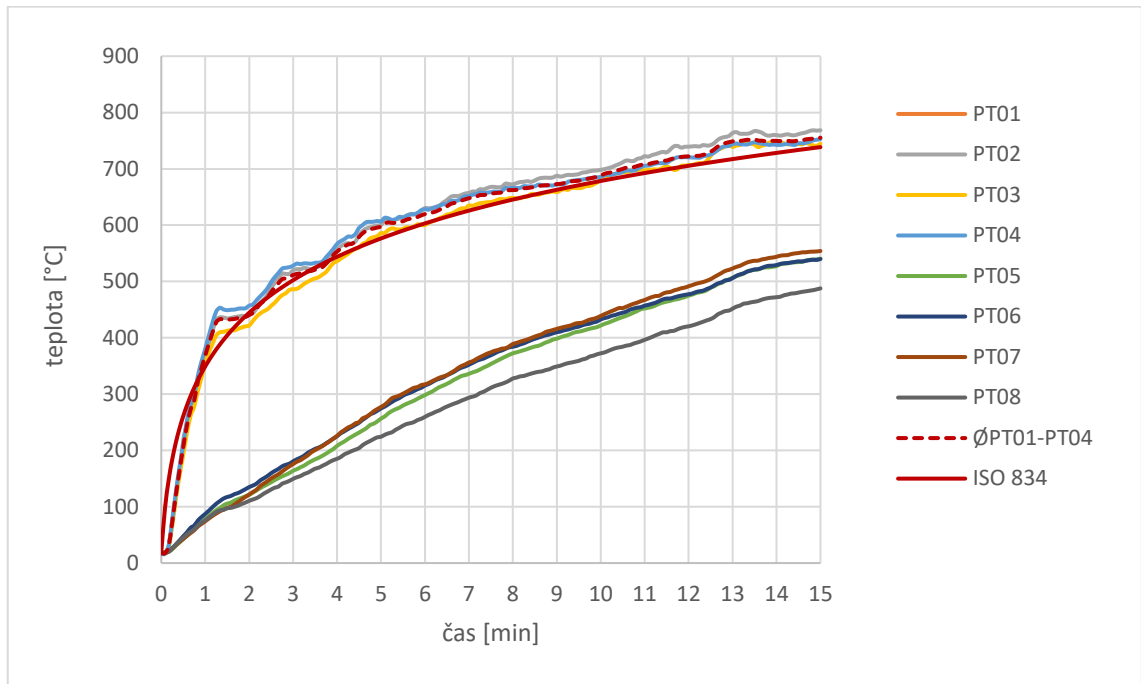
### 6.2.5 Provedení zkoušek

Zkoušky sádrokartonových desek byly provedeny na malé zkušební peci miniFUR umístěné v požární laboratoři FireLAB na UCEEB. Vzhledem k tomu, že v době zkoušek byly nové hořáky pro pec ještě v rozpracované verzi, byl v peci ponechán jeden pískový hořák. Na zkoušení to nemělo negativní vliv vzhledem k tomu, že se zkoušel stropní vzorek a bylo tedy dosaženo požadovaných teplot v celé ploše vzorku podle normové teplotní křivky (ISO 834).

V průběhu zkoušky byly měřeny teploty plynů v peci a teploty uvnitř skladby zkušebních vzorků. Termočlánky umístěné v peci, které měří teplotu plynů, jsou označeny PT01 až PT08. První čtveřice PT01 až PT04 odpovídá termočládkům 100 mm pod stropem pece. Druhá čtveřice PT05 až PT08 odpovídá termočládkům 250 mm nad podlahou pece. Termočlánky umístěné uvnitř skladby vzorku jsou označeny T01 až T06 a jejich umístění odpovídá zakresu na obrázku 43.

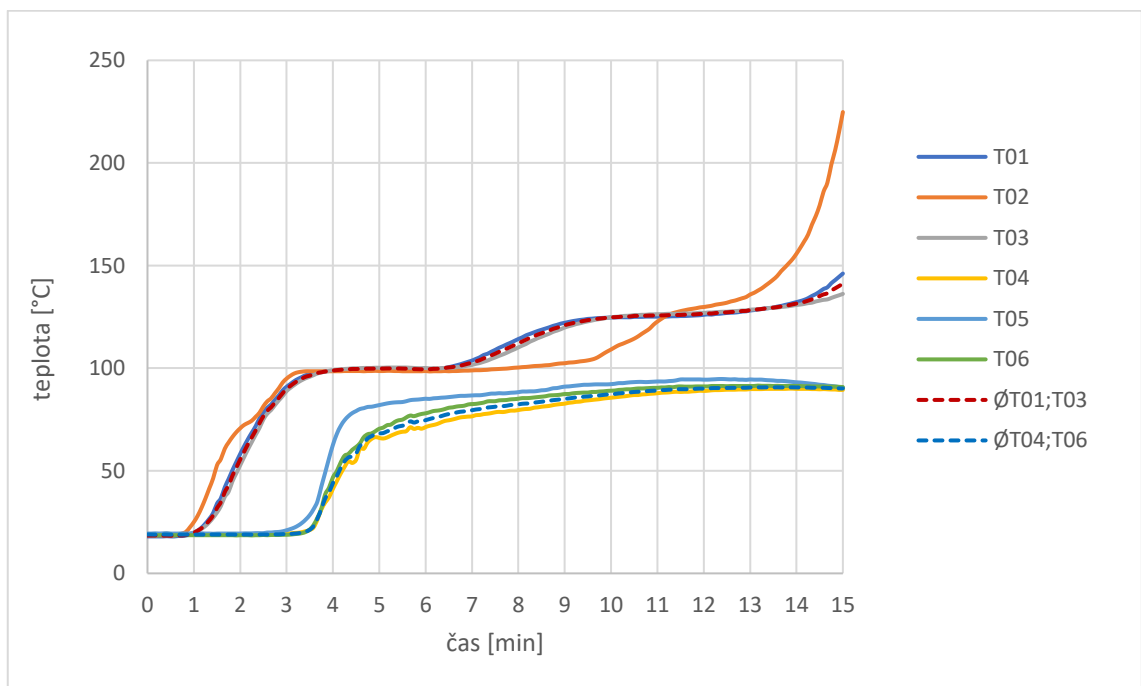
V následujících podkapitolách jsou pro každý vzorek graficky znázorněny teploty ve zkušební peci a teploty uvnitř skladby vzorku s doplňujícím popisem (obrázek 46 až obrázek 57).

## 6.2.5.1 Vzorek 01



Obrázek 46 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 01

Teplotní pole u stropu zkušební pece sleduje normovou teplotní křivku (ISO 834), záznam teplot viz obrázek 46.

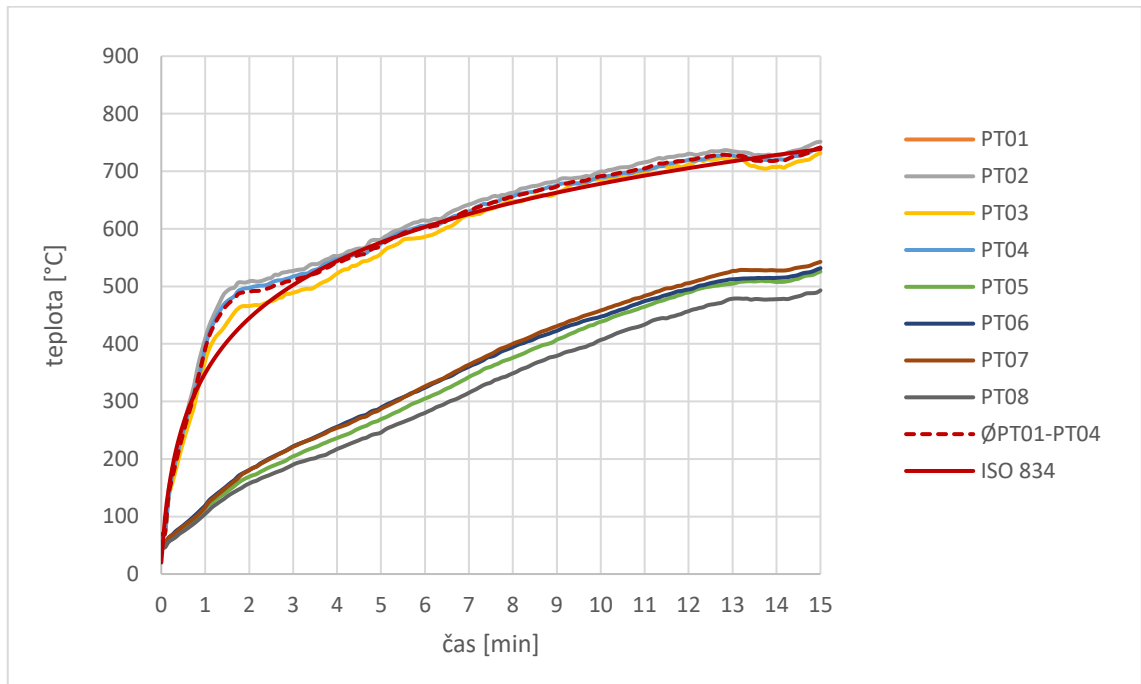


Obrázek 47 Záznam teplot uvnitř vzorku 01

Nárůst teploty po 13. minutě na termočlánku T02 je způsoben zvýšeným tepelným tokem trhlinou v místě jeho umístění na středovém profilu, záznam teplot viz obrázek 47.

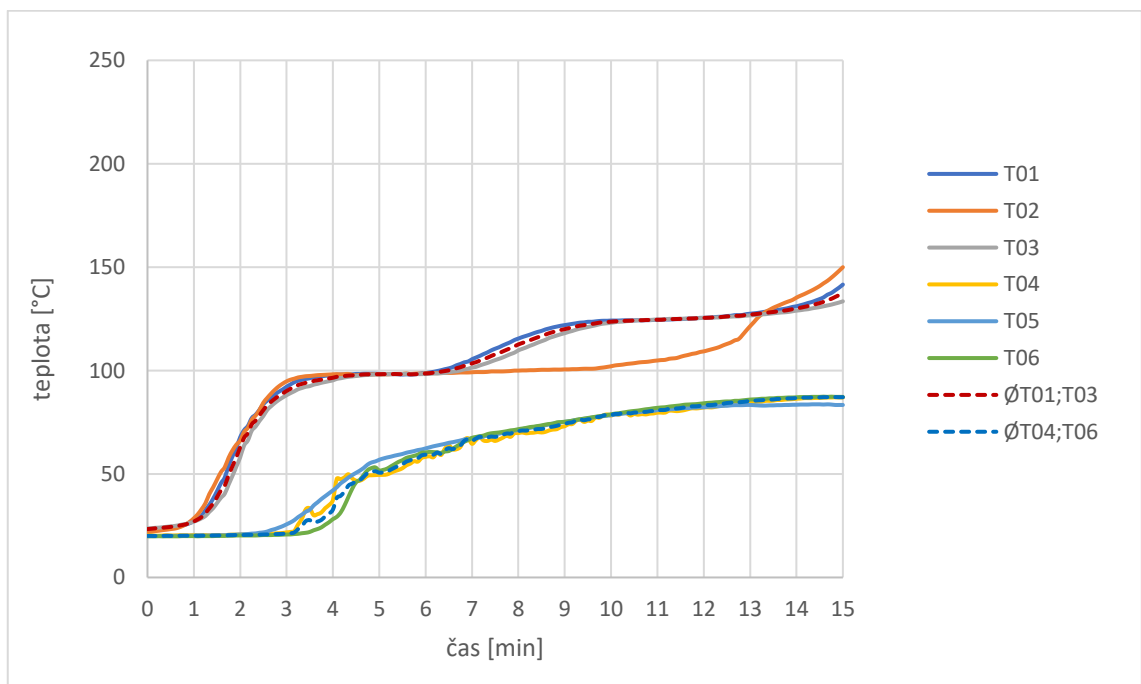


## 6.2.5.2 Vzorek 02



Obrázek 48 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 02

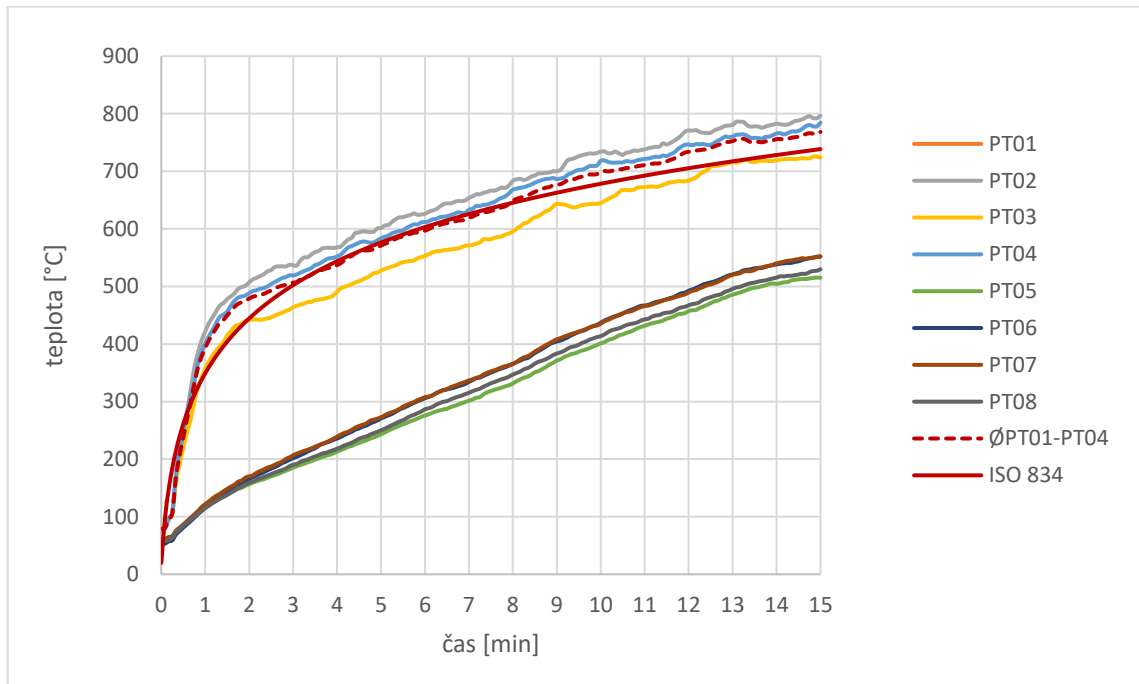
Teplotní pole u stropu zkušební pece sleduje normovou teplotní křivku (ISO 834), záznam teplot viz obrázek 48.



Obrázek 49 Záznam teplot uvnitř vzorku 02

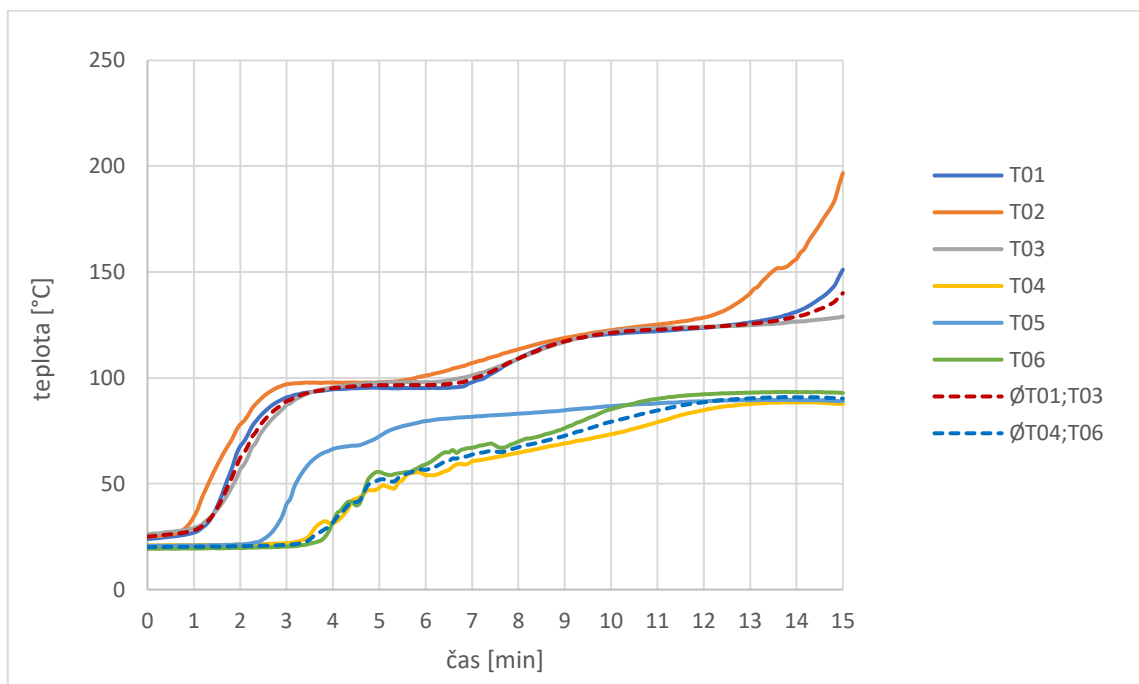
Teploty termočlánku T02 nebyly ovlivněny zvýšeným tepelným tokem (vliv trhlin) v místě jeho umístění na středovém profilu, záznam teplot viz obrázek 49.

## 6.2.5.3 Vzorek 03



Obrázek 50 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 03

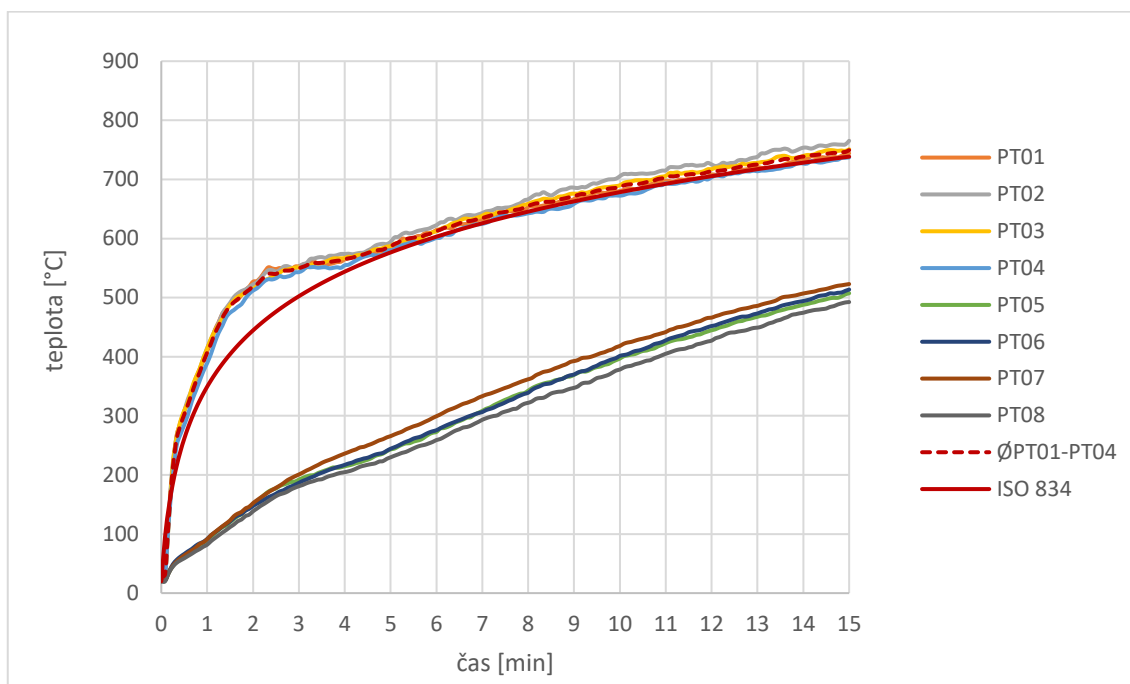
Teplotní pole u stropu zkušební pece sleduje normovou teplotní křivku (ISO 834), záznam teplot viz obrázek 50.



Obrázek 51 Záznam teplot uvnitř vzorku 03

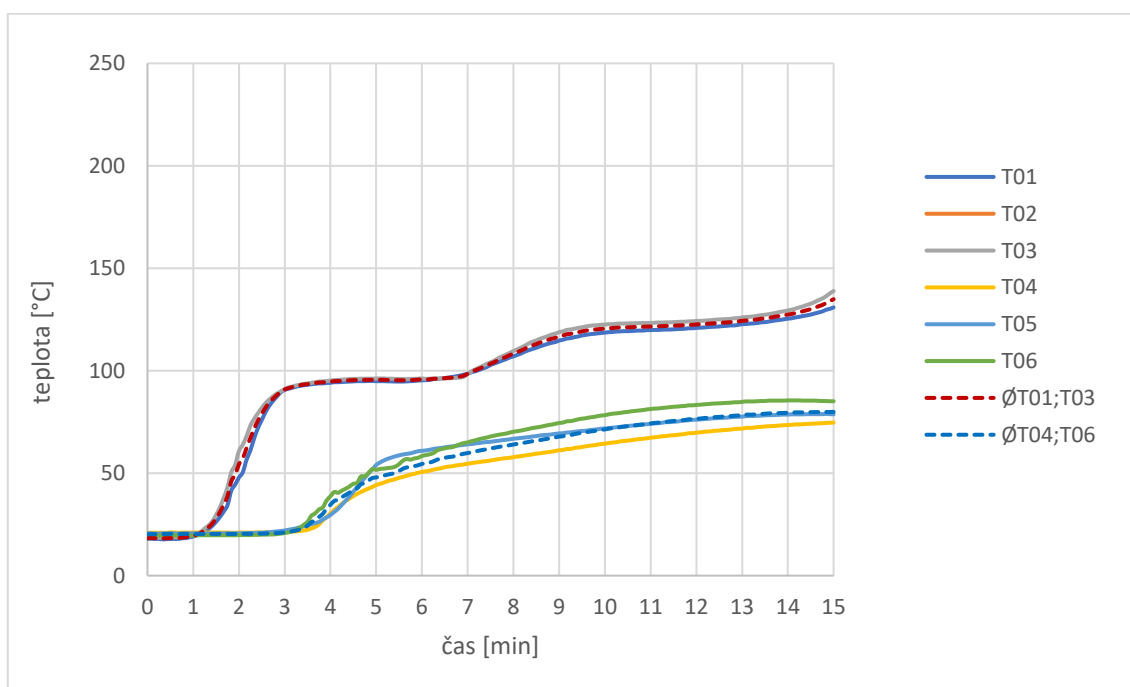
Nárůst teploty po 12. minutě na termočlátku T02 způsoben zvýšeným tepelným tokem trhlinou v místě jeho umístění na středovém profilu, záznam teplot viz obrázek 51.

## 6.2.5.4 Vzorek 04



Obrázek 52 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 04

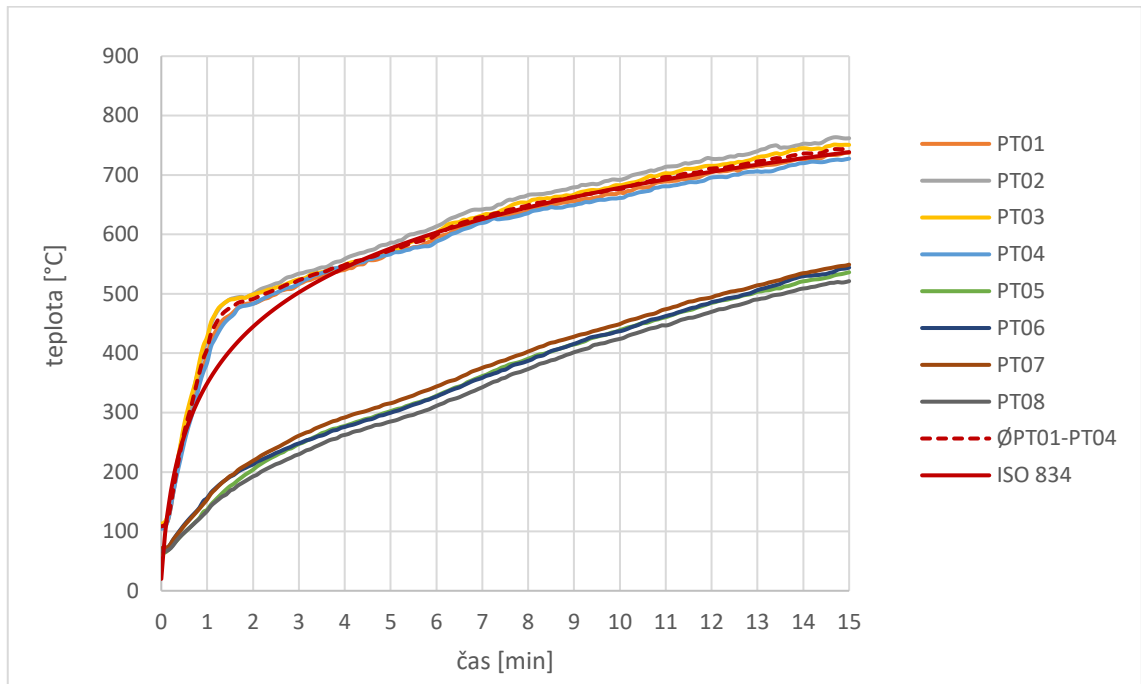
Teplotní pole u stropu zkušební pece sleduje normovou teplotní křivku (ISO 834), záznam teplot viz obrázek 52.



Obrázek 53 Záznam teplot uvnitř vzorku 04

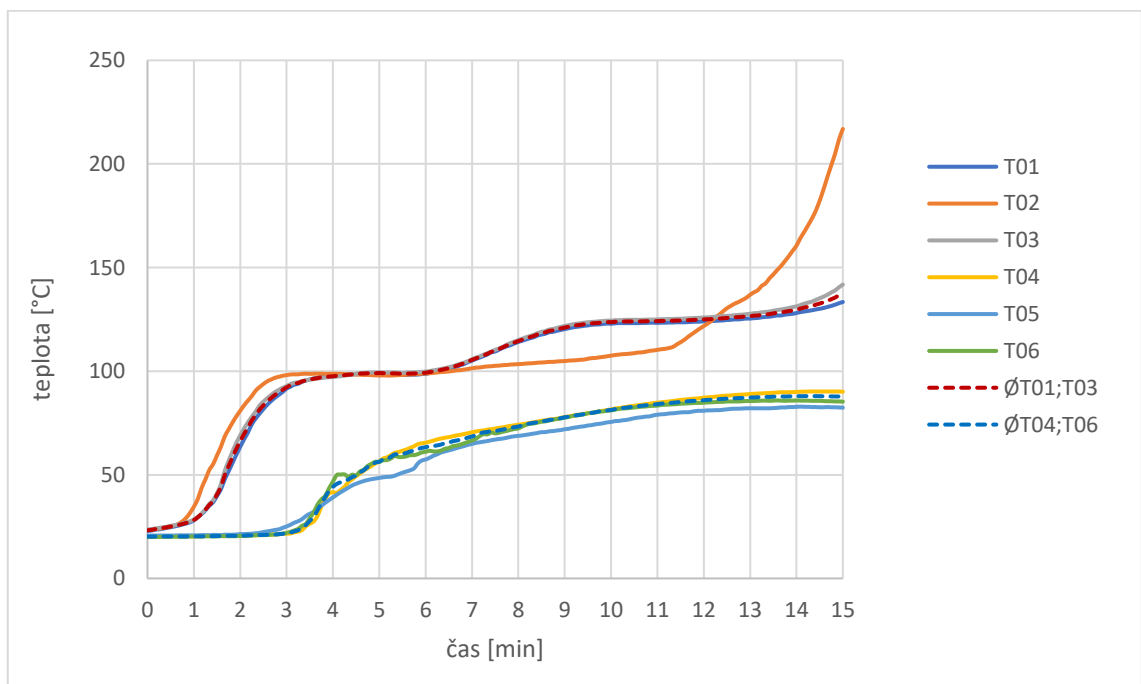
Pro termočlánek T02 chybí data vlivem poškození trasy vedení termočlátku (identifikováno až po provedení zkoušky), záznam teplot viz obrázek 53.

## 6.2.5.5 Vzorek 05



Obrázek 54 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 05

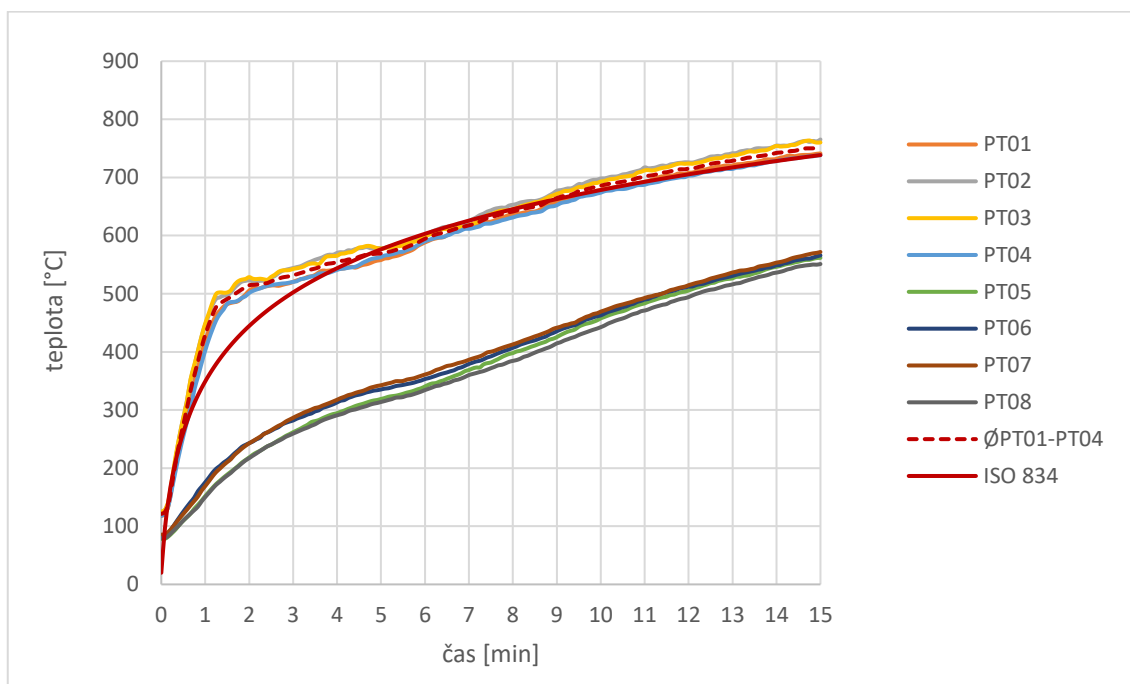
Teplotní pole u stropu zkušební pece sleduje normovou teplotní křivku (ISO 834), záznam teplot viz obrázek 54.



Obrázek 55 Záznam teplot uvnitř vzorku 05

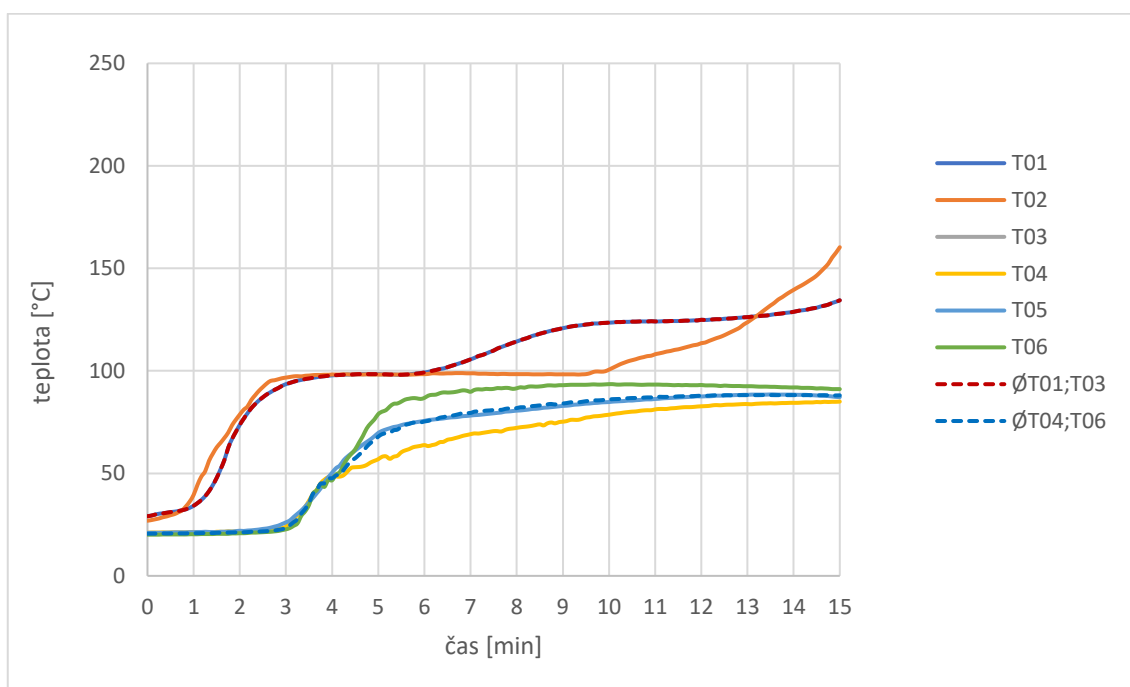
Nárůst teploty po 12. minutě na termočlátku T02 způsoben zvýšeným tepelným tokem trhlinou v místě jeho umístění na středovém profilu, záznam teplot viz obrázek 55.

## 6.2.5.6 Vzorek 06



Obrázek 56 Záznam teplot v peci miniFUR při zkoušení vzorku 06

Teplotní pole u stropu zkušební pece sleduje normovou teplotní křivku (ISO 834), záznam teplot viz obrázek 56.

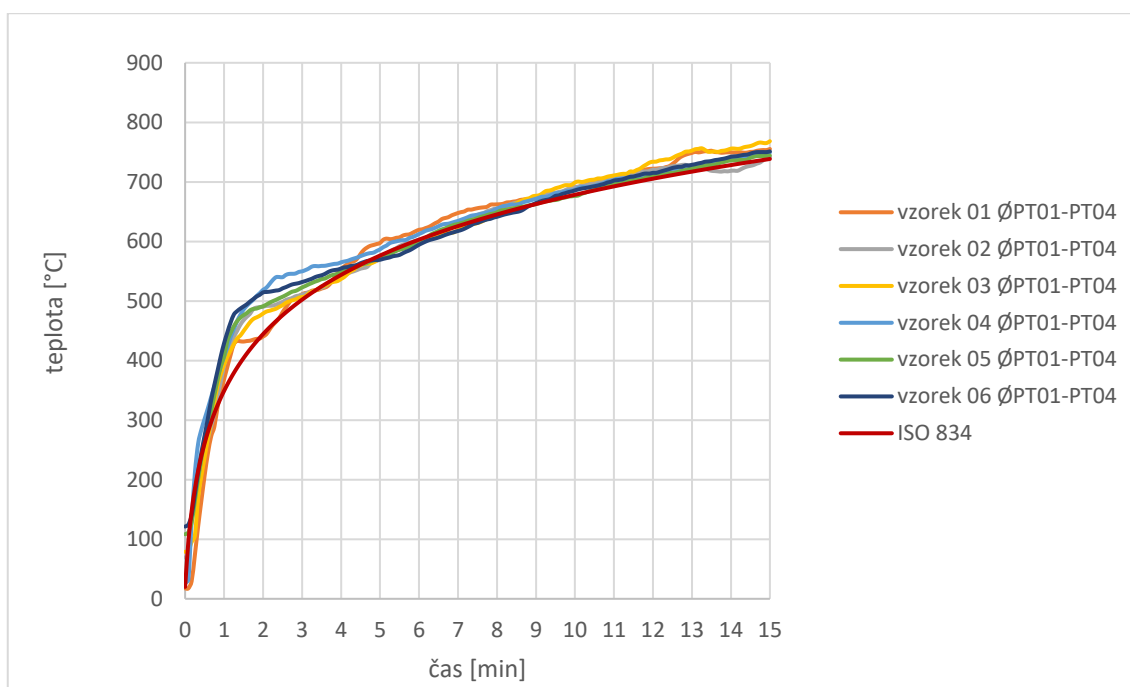


Obrázek 57 Záznam teplot uvnitř vzorku 06

Pro termočlánek T03 chybí data vlivem poškození trasy vedení termočlátku při umístění vzorku na pec před zahájením zkoušky (nový termočlánek se neumístoval). Mírný nárůst teploty po 13. minutě na termočlátku T02 způsoben zvýšeným tepelným tokem trhlinou v místě jeho umístění na středovém profilu, záznam teplot viz obrázek 57.

### 6.2.6 Vyhodnocení tepelného namáhání vzorků

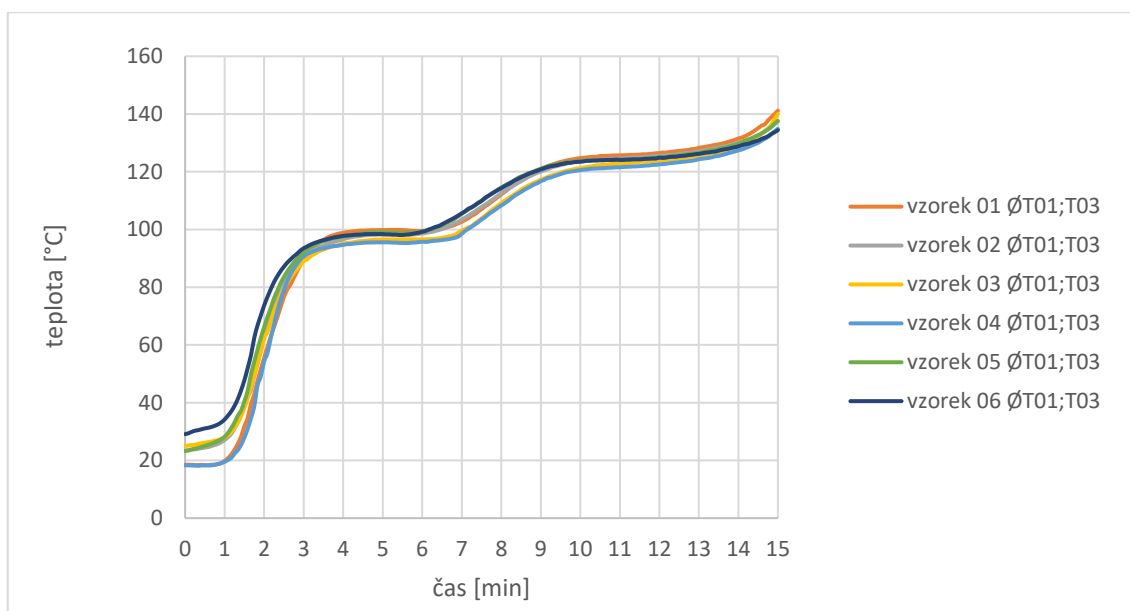
Všechny zkoušené vzorky byly vystaveny vzájemně srovnatelným podmínkám tepelného namáhání. Teploty ve zkušební peci při všech zkouškách odpovídaly průběhu normové teplotní křivky (ISO 834) s mírnými odchylkami (viz obrázek 58). Ve vyhodnocení byly srovnány průměry teplot z termočlánků PT01 až PT04 spolu s požadovanou křivkou. Do čtvrté minuty zkoušky byla odchylka teplot větší (až 120 °C). Přičemž největší hodnoty byly způsobené opakovaným používáním pece při sérii zkoušek. Termočlánky nestačily dostatečně vychladnout až na původní počáteční teplotu (při zahájení první zkoušky ze série). Tento faktor však významně neovlivnil zkoušené vzorky. Po čtvrté minutě až ke konci zkoušky se odchylka teplot pohybovala maximálně do 37 °C, a nejčastěji se pohybovala v rozmezí 10 °C až 20 °C. Následující graf (obrázek 58) znázorňuje výše popsané srovnání.



**Obrázek 58 Vyhodnocení teplotního pole (pouze horní teplotní pole) pro všechny vzorky**

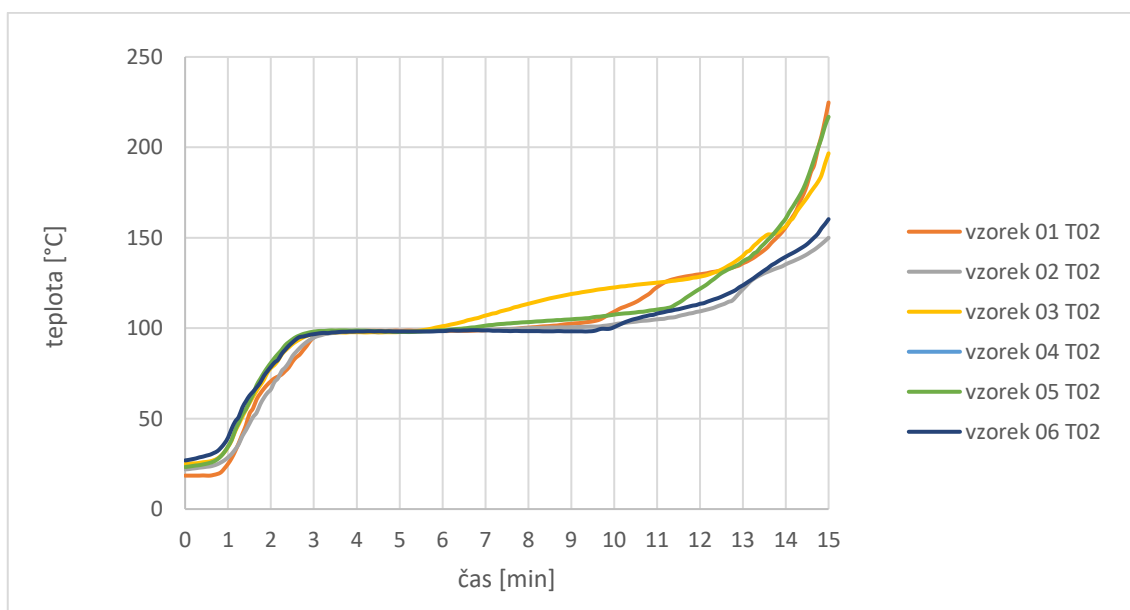
V dalším grafu (obrázek 59) jsou zobrazeny teploty na odvráceném povrchu exponované desky z místa měření uprostřed plochy desky. Hodnoty teplot z termočlánku, umístěného mezi středovým plechovým profilem a exponovanou deskou, byly vykresleny v samostatném grafu kvůli opakovanému vlivu zvýšeného tepelného toku trhlinou (obrázek 60). Trhлина na exponované sádrokartonové desce se u většiny vzorků nejvíce rozevírala právě v místě středového profilu a šroubů.

Teploty vykazují u všech zkoušených vzorků stejný trend. Rozdíly teplot v počátku jsou způsobeny opakovaným používáním pece při sérii zkoušek a exponovaná deska se stihla mírně ohřát v mezičase po umístění vzorku na pec a zahájením zkoušky. Nicméně tyto rozdíly jsou minimální. První úsek dehydratace započal po 3. minutě a teploty se držely okolo hodnoty 100 °C přibližně 4 minuty. Následně došlo k mírnému nárůstu a opětovnému ustálení po 9. minutě, teploty se držely okolo hodnoty 125 °C a po 13. minutě teploty opět začaly mírně narůstat.



Obrázek 59 Vývoj teplot na odvrácené straně exponované sádrokartonové desky

V dalším grafu (obrázek 60) jsou zobrazeny teploty na odvráceném povrchu exponované desky z místa měření mezi ocelovým profilem a deskou. U vzorku 04 chybí data z T02 následkem poškození měřicí trasy termočlánku. Z porovnání je u termočlánků na vzorku 01, vzorku 03 a vzorku 05 patrný výrazný nárůst teplot po 13. minutě. Je to způsobeno vlivem většího tepelného toku trhlinou v sádrokartonové desce. U ostatních vzorků je nárůst teplot na T02 pozvolný.



Obrázek 60 Vývoj teplot na odvrácené straně exponované sádrokartonové desky v místě ocelového profilu

Z provedených požárních zkoušek je patrné, že k rychlejší degradaci sádrokartonové desky docházelo v blízkosti osy umístění středového CW profilu. Právě v blízkosti této osy se tvořily nejčastěji výraznější trhliny, které ve více případech procházely skrze místa, kde byla deska přišroubovaná k ocelovému profilu. Předpokládanou příčinou této degradace bylo rychlejší prohřívání desky v místě ocelového profilu a současně přímé působení plamene hořáku uprostřed zkoušeného vzorku.

### 6.2.7 Měření kalcinace na odzkoušených vzorcích

Měření hloubky kalcinace proběhlo v asistenci nprap. Ing. Jakuba Baci, vyšetřovatele požáru a současně studenta Fakulty bezpečnostního inženýrství v Ostravě, který zajistil všechna potřebná měřicí zařízení (včetně hloubkoměrů). Metodiku zhodnocení kalcinace sádrokartonové desky po tepelné expozici mi vysvětlil včetně názorné ukázky. Všechny vzorky, zejména vzorky z druhé série, byly po tepelné expozici ponechány k vychladnutí minimálně 15 před začátkem přípravných prací pro měření hloubky kalcinace.

Při měření hloubky kalcinace byly použity celkem dva hloubkoměry, označené jako hloubkoměr 1 (viz obrázek 61) a hloubkoměr 2 (viz obrázek 62). Jejich konstrukce včetně nastavení pružiny byly totožné, odlišnost byla pouze v barevném provedení.



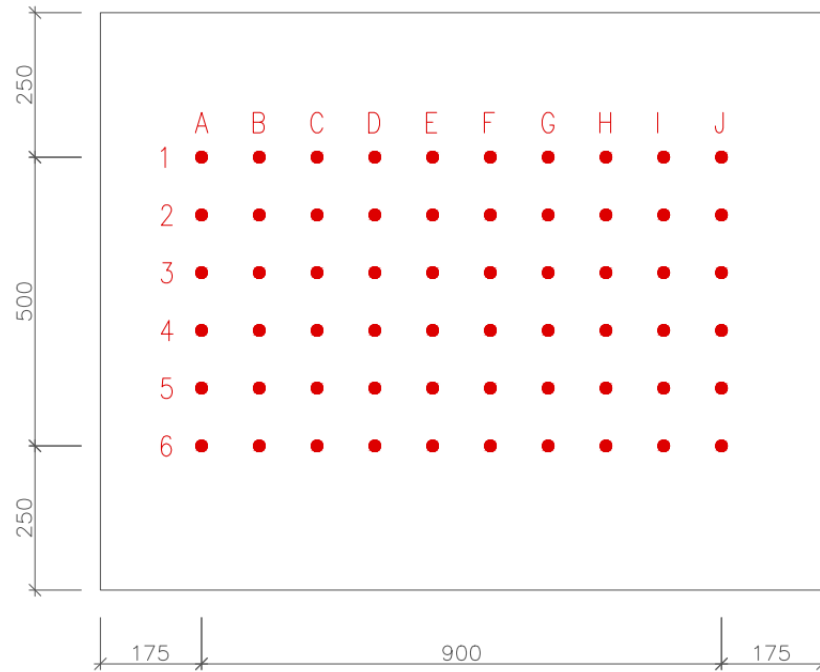
Obrázek 61 Hloubkoměr č. 1 [47]



Obrázek 62 Hloubkoměr č. 2 [47]

Místa pro měření kalcinace jsme zvolili v mřížce 10 cm × 10 cm. Poloha 0,8 m × 1,2 m, vymezená pro měření byla daná vnitřními rozměry zkušební pece miniFUR. Svislá osa byla označena číselně od 1 do 8 a vodorovná osa byla označena písmeny A až J. Vodorovná osa současně odpovídala delší odzkoušené straně. Na jednu desku tak připadalo celkem 80 měření. Místa měření byla předem označena pomocným sprejem (akrylátový sprej). Rozměry vzhledem k okraji zkušebního vzorku jsou na obrázku 63 spíše orientační, u každého zkoušeného vzorku bylo jeho půdorysné uložení na zkušební pec mírně odlišné (cca v rozsahu 5 až 10 cm).





**Obrázek 63** Místa pro měření hloubky kalcinace na vzorcích

Při měření hloubky kalcinace byl přiložen hloubkoměr vždy kolmo k desce a jeho jehla byla tlakem zapuštěna do desky. Objektivní měření v tomto případě zajišťuje pružina připevněná na hloubkoměru a nejde tak silou protlačit jehlu více než odpovídá vrstvě, kde došlo ke kalcinaci.

Zpočátku byla měřena hloubka kalcinace uprostřed sprejem naznačených terčů. Z důvodu možného zkreslení výsledků vrstvou naneseného spreje bylo u vzorku 02 provedeno kontrolní měření mimo terče, avšak vždy v jeho těsné blízkosti. Rozdíl v naměřených hodnotách byl patrný, a proto další vzorky (vzorek 03 až vzorek 06) byly měřeny vždy už jen mimo terče.

Přesnost měření hloubkoměrem 1 i hloubkoměrem 2 je 1 mm. V případě hodnoty mezi celými milimetry byla hloubka vždy zaokrouhlena na vyšší celý milimetr. Pro kontrolu bylo v každém měřeném místě provedeno více vpichů pro omezení vlivu trhlin na výsledek.

Pro názorné vyhodnocení hloubky kalcinace byla zaznamenaným hodnotám přiřazená barevná stupnice (viz obrázek 64). Při všech měřeních nebyly zaznamenány hodnoty vyšší než 5 mm, proto byla stupnice zvolena od 0 mm až po 5 mm.



**Obrázek 64** Barevná stupnice vyhodnocení hloubky kalcinace na zkušebních vzorcích

## 6.2.7.1 Vzorek 01



Obrázek 65 Vzorek 01 s označením míst měření kalcinace

Měření kalcinace na vzorku 01 bylo provedeno pomocí hloubkoměru 1 ve vyznačených místech podle obrázku 65. Hloubka kalcinace byla měřena pouze ve středech terčů. V následující tabulce (tabulka 10) je vidět rozložení naměřených hloubek kalcinace na ploše desky.

Tabulka 10 Hloubka kalcinace vzorku 01, použit hloubkoměr 1, měřeno v terči

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
hloubka kalcinace [mm]	0										
	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
	7										
8											
	1	2	3	2	3	3	3	2	2	2	3
	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2	2
	3	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3
	4	2	2	2	3	3	2	3	2	2	2
	5	2	2	2	2	4	2	2	2	2	2
	6	3	2	2	3	3	3	3	2	2	3
	7	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3
	8	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2

## 6.2.7.2 Vzorek 02



Obrázek 66 Vzorek 02 s označením míst měření kalcinace

Měření kalcinace na vzorku 02 bylo provedeno pomocí hloubkoměru 1 ve vyznačených místech podle obrázku 66. Hloubka kalcinace byla měřena jednou ve středech terčů (tabulka 11) a podruhé mimo terče v jeho těsné blízkosti (tabulka 12).

Tabulka 11 Hloubka kalcinace vzorku 02, použit hloubkoměr 1, měřeno v terči

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
hloubka kalcinace [mm]	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	3	2	3	2	2	2
	2	2	3	3	2	3	3	2	2	2	2
	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2
	5	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2
	6	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2
	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabulka 12 Hloubka kalcinace vzorku 02, použit hloubkoměr 1, měřeno okolo terče

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
hloubka kalcinace [mm]	0	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3
	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	2	3	2	3	2	2	3	3	3	3
	4	3	2	2	3	3	2	3	3	3	2
	5	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3
	6	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
	7	2	2	3	3	2	2	3	3	2	3

## 6.2.7.3 Vzorek 03



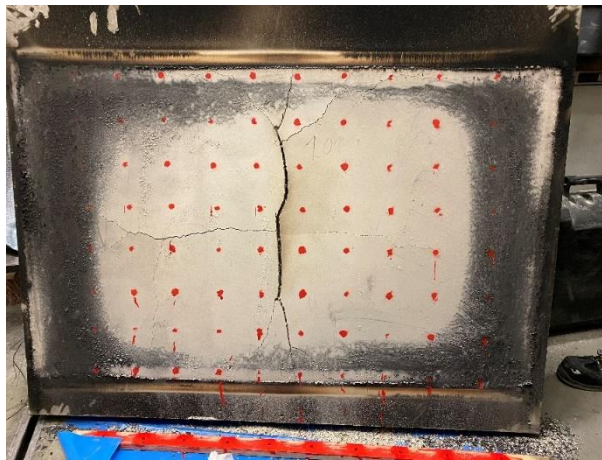
Obrázek 67 Vzorek 03 s označením míst měření kalcinace

Měření kalcinace na vzorku 03 bylo provedeno pomocí hloubkoměru 1 ve vyznačených místech podle obrázku 67. Hloubka kalcinace byla měřena pouze mimo terče v jeho těsné blízkosti. V následující tabulce (tabulka 13) je vidět rozložení naměřených hloubek kalcinace na ploše desky.

Tabulka 13 Hloubka kalcinace vzorku 03, použit hloubkoměr 1, měřeno okolo terče

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
hloubka kalcinace [mm]	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	1	3	3	3	3	3	4	3	4	3	2
	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
	4	2	3	3	3	3	2	2	3	3	2
	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	

## 6.2.7.4 Vzorek 04



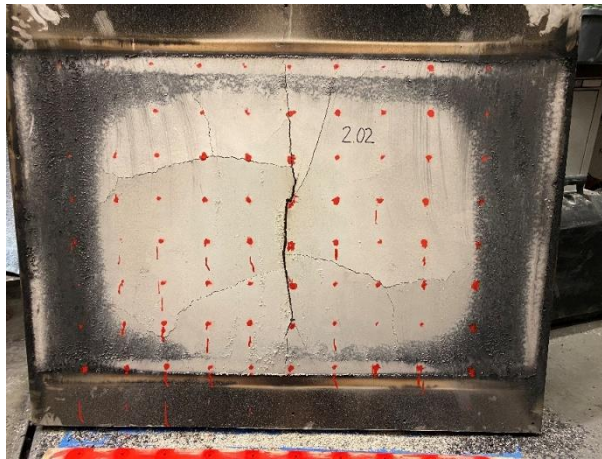
Obrázek 68 Vzorek 04 s označením míst měření kalcinace

Měření kalcinace na vzorku 04 bylo provedeno pomocí hloubkoměru 2 ve vyznačených místech podle obrázku 68. Hloubka kalcinace byla měřena pouze mimo terče v jeho těsné blízkosti. V následující tabulce (tabulka 14) je vidět rozložení naměřených hloubek kalcinace na ploše desky.

Tabulka 14 Hloubka kalcinace vzorku 04, použit hloubkoměr 2, měřeno okolo terče

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
hloubka kalcinace [mm]	0	3	2	3	2	3	2	3	3	2	2
	1	3	3	3	2	3	3	2	3	3	2
	2	3	3	3	2	3	2	2	2	2	2
	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2
	4	3	2	3	2	2	2	2	2	2	3
	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	6	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2
	7	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2
8	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	

## 6.2.7.5 Vzorek 05



Obrázek 69 Vzorek 05 s označením míst měření kalcinace

Měření kalcinace na vzorku 05 bylo provedeno pomocí hloubkoměru 2 ve vyznačených místech podle obrázku 69. Hloubka kalcinace byla měřena pouze mimo terče v jeho těsné blízkosti. V následující tabulce (tabulka 15) je vidět rozložení naměřených hloubek kalcinace na ploše desky.

Tabulka 15 Hloubka kalcinace vzorku 05, použit hloubkoměr 2, měřeno okolo terče

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
hloubka kalcinace [mm]	0										
	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
	7										
8											
	1	3	3	2	2	2	3	2	2	2	1
	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	1
	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	2
	4	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2
	5	2	2	3	2	2	3	2	2	2	2
	6	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2
	7	3	2	2	2	2	2	2	2	1	2
	8	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2

## 6.2.7.6 Vzorek 06



Obrázek 70 Vzorek 06 s označením míst měření kalcinace

Měření kalcinace na vzorku 06 bylo provedeno pomocí hloubkoměru 2 ve vyznačených místech podle obrázku 70. Hloubka kalcinace byla měřena pouze mimo terče v jeho těsné blízkosti. V následující tabulce (tabulka 16) je vidět rozložení naměřených hloubek kalcinace na ploše desky.



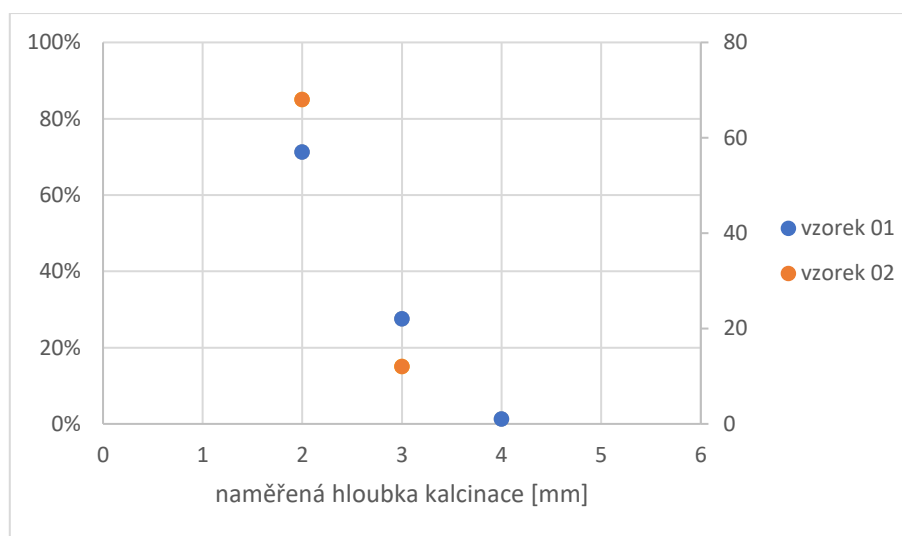
Tabulka 16 Hloubka kalcinace vzorku 06, použit hloubkoměr 2, měřeno okolo terče

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
hloubka kalcinace [mm]	0	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3
	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	7	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	

### 6.2.8 Vyhodnocení měření kalcinace

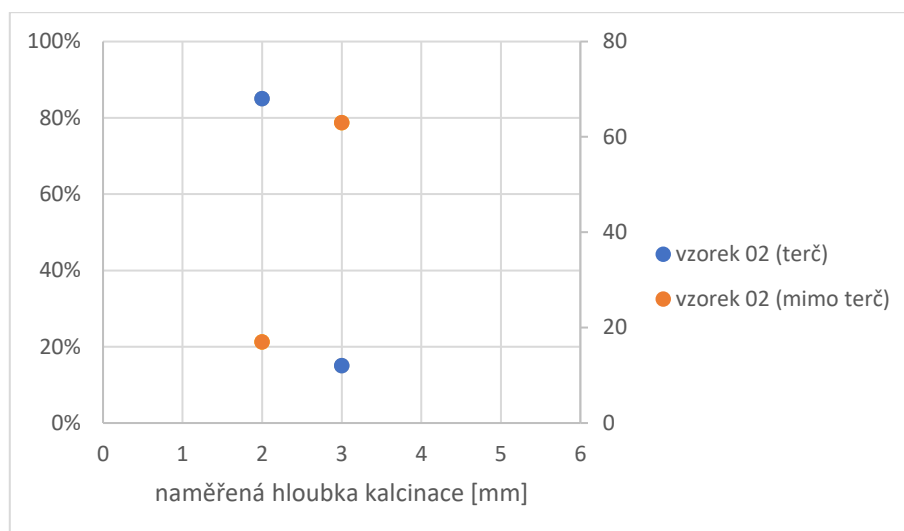
Výsledky měření hloubky kalcinace na jednotlivých deskách, prezentované v předchozích tabulkách, byly vzájemně porovnány pomocí vyjádření četností naměřených hodnot. V každém grafu jsou na levé ose vyjádřeny relativní četnosti v procentech (hodnoty 0 % až 100 %) a na pravé ose absolutní četnosti (hodnoty 0 až 80). Absolutní četnost odpovídá celkovému počtu naměřených míst se stejnou hloubkou kalcinace na jedné desce.

V prvním grafu (obrázek 71) je zobrazena četnost měření na vzorku 01 a vzorku 02 při měření v terči. Výsledky jsou vzájemně velmi podobné. Nejvyšší četnost vykazuje hodnota hloubky kalcinace 2 mm.



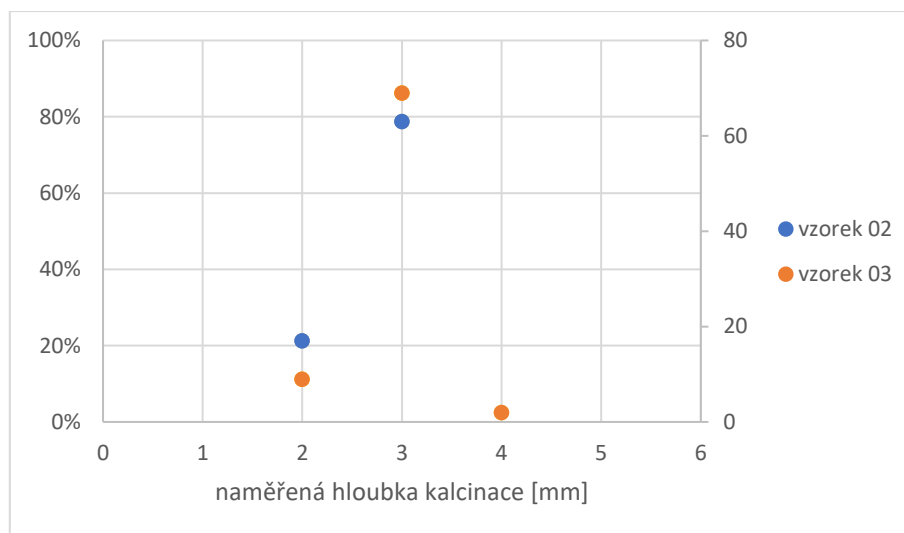
Obrázek 71 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 01 a vzorek 02 při měření v terči

V dalším grafu (obrázek 72) je porovnáno měření v terči a mimo terč pouze na vzorku 02. Tato kontrola proběhla s cílem ověřit, zda akrylátový sprej označující místa, měření ovlivňuje hloubku kalcinace. Z četností hodnot je právě patrné, že předpoklad byl potvrzen a následná měření na dalších deskách probíhala již pouze v okolí terče. Nejvyšší četnost při měření v terči vykazuje hodnota hloubky kalcinace 2 mm, a při měření mimo terč 3 mm.



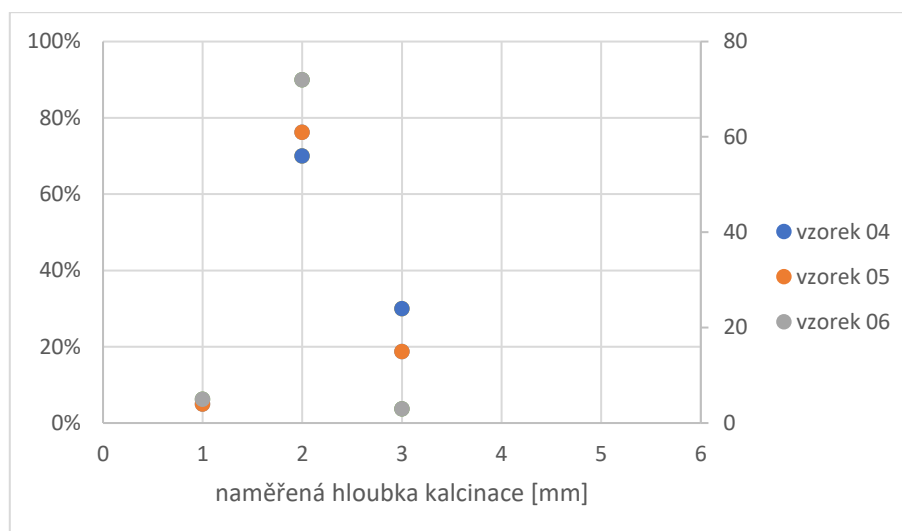
**Obrázek 72 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 02 při měření v terči a mimo terč**

V dalším grafu (obrázek 73) je zobrazena četnost měření na vzorku 02 a vzorku 03 při měření mimo terč. Výsledky jsou vzájemně velmi podobné. Nejvyšší četnost při měření vykazuje hodnota hloubky kalcinace 3 mm.



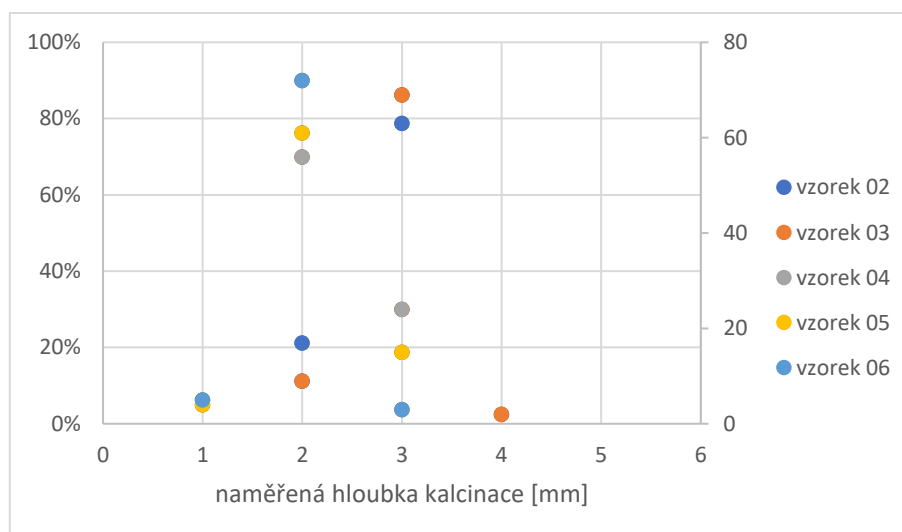
**Obrázek 73 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 02 a vzorek 03 při měření mimo terč**

V dalším grafu (obrázek 74) je zobrazena četnost měření na vzorku 04, vzorku 05 a vzorku 06 při měření mimo terč ve stejný den, kdy proběhla zkouška. Výsledky jsou opět vzájemně velmi podobné, nicméně je vidět jiný trend než u předchozí série, kdy se měřilo týden po provedení zkoušek. Nejvyšší četnost při měření vykazuje hodnota hloubky kalcinace 2 mm.



**Obrázek 74 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 04, vzorek 05 a vzorek 06 při měření mimo terč**

V posledním grafu (obrázek 75) je zobrazena četnost měření na všech vzorcích, kromě vzorku 01, při měření mimo terč. Ve výsledcích je patrný rozdíl mezi vzorky z první série (měření kalcinace týden po zkoušce) a druhé série (měření kalcinace ihned po zkoušce). Nejvyšší četnost při měření vykazují hodnoty hloubky kalcinace 2 a 3 mm v souvislosti, kdy bylo provedeno měření.



**Obrázek 75 Četnost naměřených hodnot pro vzorek 02, vzorek 03, vzorek 04, vzorek 05 a vzorek 06 při měření mimo terč**

Při měření hloubky kalcinace bylo u většiny zkoušených desek pozorováno podobné rozložení naměřených hodnot. V blízkosti osy umístění středového profilu (mezi osou E a F) nebyly naměřeny výrazně vyšší hodnoty než v jiných místech. U okrajů desek byly častěji menší hodnoty oproti středu, kde docházelo k největšímu tepelnému namáhání.

Vliv na hloubku kalcinace může mít i způsob označení míst pro měření. V případě použití různých sprejů je vhodné měření hloubkoměrem provádět v těsné blízkosti značky, ale ne přímo v ní. Porovnávací měření bylo provedeno na vzorku 02 a z četností je patrný vliv mikrovrstvy akrylátového spreje na naměřené hodnoty (viz obrázek 72).

Významný rozdíl v rozložení hodnot byl pozorován při porovnání první série vzorků (měření hloubky kalcinace týden po zkoušce) a druhé série vzorků (měření hloubky kalcinace v den zkoušky). Větší hloubka kalcinace byla naměřena u první série vzorků a pravděpodobně tak došlo



během uskladnění k dalšímu vývoji degradace desek (patrné z grafu na obrázku 75). Po dobu jednoho týdne byly vzorky uloženy v požární laboratoři FireLAB na UCEEB a nebyly vystaveny vlivům jakékoliv další tepelné expozice. Pravděpodobným faktorem, který mohl ovlivnit další degradaci, může být vzdušná vlhkost. Pro ověření této hypotézy by bylo nutné provedení dalších experimentů.

### 6.2.9 Porovnání hloubky kalcinace na lomu deskou

Ze vzorku 01 jsme odebrali dva kusy pro změření hloubky kalcinace na příčném řezu (viz obrázek 76). První vzorek jsme zkoušeli vyřezávat, ale tím jsme poškodili rovinnost řezu a kalcinační linie nebyla patrná. Druhý vzorek jsme hledali v místě popraskání desky, tak abychom ho mohli vylomit a tuto část řezu v prasklině měli nepoškozenou.



Obrázek 76 Odebraný kus ze vzorku 01 pro měření kalcinace v řezu deskou (část vpravo dole)

Odebraný vzorek byl umístěn do svěráku a při focení byl přiložen svinovací metr pro získání měřítka (viz obrázek 77). Na vzorku 01 byla v místě měření hloubky kalcinace z příčného řezu desky naměřena hodnota 4,5 mm.



Obrázek 77 Příčný řez deskou vzorku 01 s patrnou čarou kalcinace

U dalších vzorků byl také odebrán kus pro měření kalcinace v řezu, ale ve většině případů nebyla kalcinační linie na fotografiích patrná nebo jednoznačná, přestože vizuálně byla identifikovatelná. Tato metoda je tak vhodnější pro měření přímo na místě či s využitím lepších fotografických zařízení.

## 7 Závěr

Použití hmot na bázi sádry, často v podobě deskových materiálů, je výhodné vzhledem k dobrým vlastnostem při vystavení požáru. Díky velkému množství jak chemicky vázané, tak i volné vody obsažené v deskách, dochází ke zpomalení prohřívání desky a současně také k vyšší odolnosti vůči vysokým teplotám. Sledování změn desky po tepelné expozici je možné několika způsoby. Nejefektivnějším z nich je měření hloubky kalcinace neboli dehydratované vrstvy sádry pomocí hloubkoměru. Tím lze poměrně snadno a rychle provádět měření i ve větších plochách, ale vhodnější je využití pro lokální hodnocení desek.

Při požárních zkouškách jsme odzkoušeli vzorky s opláštěním deskou typu A v tloušťce 15 mm z každé strany roštu z plechových profilů, a vnitřní dutina byla vyplněna minerální izolací. Všechny vykazovaly podobné teplotní nárůsty na měřených místech. I teplotní pole uvnitř zkušební pece bylo ve všech případech odpovídající normové teplotní křivce ISO 834. Zkoušky probíhaly u všech vzorků v délce patnáct minut.

Měření kalcinace hloubkoměrem bylo provedeno na každé desce v 80 místech a výsledky pro celou desku vykazovaly podobné hodnoty. Změřená hloubka se pohybovala v rozmezí 1 mm až 4 mm. Patrné rozdíly v rozložení četnosti hloubky kalcinace byly pozorovány ve dvou případech. V prvním případě šlo o vliv mikrovrstvy akrylátového spreje, kterým byla označena měřená místa a snižovala hloubku kalcinace. Ve druhém případě šlo o rozdílné rozložení četnosti naměřených hodnot při měření hloubky kalcinace ihned po zkoušce a týden po zkoušce. U vzorků měřených týden po zkoušce byla naměřena hloubka kalcinace vyšší a pravděpodobně šlo o vliv působení vzdušné vlhkosti během doby uskladnění vzorků.

Při dalším zkoumání je možné se zaměřit na více časů tepelné expozice a následně vzájemné porovnání vývoje hloubky kalcinace. Z vyhodnocení provedených experimentů by bylo také dobré ověřit hypotézu vlivu vzdušné vlhkosti na rozvoj degradace v delším časovém intervalu od provedené požární zkoušky. Dále je možné odzkoušet více typů desek a například sledovat, jestli je rozdíl mezi hloubkou kalcinace desky typu A a desky typu F při stejné délce tepelné expozice. Současně s tím je možné provést chemickou analýzu vzorků a také zlepšit metodu měření kalcinace v řezu včetně fotodokumentace.

---

## Literatura

- [1] HZS ČR. *Statistická ročenka 2022* [online]. B.m.: MV-GŘ HZS ČR. březen 2023. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/statisticke-rocenky-hasicskeho-zachranneho-sboru-cr.aspx>
- [2] DAEID, Niamh Nic. *Fire Investigation* [online]. 1. vyd. B.m.: CRC Press, 2004 [vid. 2023-03-09]. ISBN 978-0-429-23465-1. Dostupné z: doi:10.1201/9780203646953
- [3] *Požární ochrana* [online]. [vid. 2023-05-29]. Dostupné z: <http://fire.fsv.cvut.cz/vzdavani/index2.html>
- [4] *Teorie hoření* / [www.hasici-vzdelavani.cz](http://www.hasici-vzdelavani.cz) [online]. [vid. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.hasici-vzdelavani.cz/content/teorie-horeni>
- [5] Stanovení požárně-technických charakteristik (PTCH) kapalin. *COUP Ostrava* [online]. [vid. 2023-06-06]. Dostupné z: <https://www.coup-ostava.cz/sluzby/stanoveni-ptch-kapalin/>
- [6] Tepelná a mechanická zatížení konstrukcí při požáru. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8853-tepelna-a-mechanicka-zatizeni-konstrukci-pri-pozaru>
- [7] Fire Calorimetry Database (FCD). *NIST* [online]. 2020 [vid. 2023-06-06]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/el/fcd>
- [8] CÁBOVÁ, Kamila. *Ověřování modelů v požární bezpečnosti*. V Praze: České vysoké učení technické, ve spolupráci s Vysokým učením technickým v Brně, Vysokou školou báňskou - Technickou univerzitou Ostrava a Technickým ústavem požární ochrany, 2019. ISBN 978-80-01-06616-4.
- [9] Vyšetřování požáru v uzavřeném prostoru s významným vlivem ventilace. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/18891-vysetrovani-pozaru-v-uzavrenem-prostoru-s-vyznamnym-vlivem-ventilace>
- [10] GORBETT, Gregory E, Brian J MEACHAM, Christopher B WOOD a Nicholas A DEMBSEY. Use of damage in fire investigation: a review of fire patterns analysis, research and future direction. *Fire Science Reviews* [online]. 2015, 4(1), 4. ISSN 2193-0414. Dostupné z: doi:10.1186/s40038-015-0008-4
- [11] MADRZYKOWSKI, Daniel. FIRE PATTERN REPEATABILITY: nedatováno.
- [12] JOAKIM ALBREKTSSON, MATHIAS FLANSBJER, JAN ERIK LINDQVIST, a ROBERT JANSSON. *Assessment of concrete structures after fire* [online]. Borås: SP Technical Research Institute of Sweden, 2011. ISBN 978-91-86622-50-3. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962608/FULLTEXT01.pdf>
- [13] Fire Investigation Manual. *Marine Accident Investigators' International Forum* [online]. [vid. 2023-06-13]. Dostupné z: <https://maiif.org/resources/fire-investigation-manual/>
- [14] MEIER, Richard J, Patrick M KENNEDY, B MFIREE a John A KENNEDY. FIRE EFFECTS ON HIGH EFFICIENCY LIGHTING. nedatováno.
- [15] INVESTIGATORS, International Association of Arson. *Fire Investigator: Principles and Practice*. B.m.: Jones & Bartlett Learning, 2022. ISBN 978-1-284-24705-3.

- 
- [16] Lokalizace kriminalistického ohniska pomocí metody měření hloubky kalcinace sádrokartonových desek. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/16873-lokalizace-kriminalistickeho-ohniska-pomoci-metody-mereni-hloubky-kalcinace-sadrokartonovych-desek>
- [17] *Popis fungování procesu státního požárního dozoru – zjišťování příčin vzniku požárů - Hasičský záchranný sbor České republiky* [online]. [vid. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/popis-fungovani-procesu-statniho-pozarniho-dozoru-zjistovani-pricin-vzniku-pozaru.aspx>
- [18] *Vysokopevnostni-sadrokarton-Habito\_brozura.pdf. Rigips - Nextcloud* [online]. [vid. 2023-06-10]. Dostupné z: <https://data.rigips.cz/s/gNMy6YFbxdfgGPf>
- [19] *Fasádní obklady Hardie® Plank a Hardie® Panel* [online]. [vid. 2023-06-12]. Dostupné z: <https://www.fermacell.cz/Produkty/Cementovlaknite-desky/Fasadni-obklady-Hardie-Plank-a-Hardie-Panel>
- [20] *CETRIS BASIC. Cetrís* [online]. [vid. 2023-06-12]. Dostupné z: <https://www.cetris.cz/desky/bez-povrchove-upravy/deska-cetris-basic/www.cetris.cz/desky/bez-povrchove-upravy/deska-cetris-basic/>
- [21] *OSB / Dekwood* [online]. [vid. 2023-06-12]. Dostupné z: <https://dekwood.cz/produkty/osb>
- [22] Požadavky na požární bezpečnost dřevostaveb. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/drevostavby-nove/7184-pozadavky-na-pozarni-bezpecnost-drevostaveb>
- [23] *ESTAV.CZ. Sádrokarton slaví 125 let. Podívejte se, jak se vyrábí v ČR u Mělníka. ESTAV.cz* [online]. [vid. 2023-06-11]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/6178.jak-se-vyrabi-sadrokarton-u-melnika>
- [24] ALAR JUST, JOACHIM SCHMID, a JÜRGEN KÖNIG. *Gypsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database* [online]. Stockholm: SP Technical Research Institute of Sweden, 2010. ISBN 978-91-86319-67-0. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962547/FULLTEXT01.pdf>
- [25] *Sadrovlníkové desky* [online]. [vid. 2023-06-12]. Dostupné z: <https://www.fermacell.cz/Produkty/Sadrovlníkové-desky/Sadrovlníkové-desky>
- [26] *ČSN EN 520+A1 Sádrokartonové desky - Definice, požadavky a zkušební metody*. březen 2010
- [27] *Sádrokartonové desky a podlahové dílce | produkty. Rigips* [online]. [vid. 2023-06-11]. Dostupné z: <https://www.rigips.cz/produkty/kategorie/desky-a-podlahove-dilce/>
- [28] *Produkty | Knauf Praha spol. s r.o.* [online]. [vid. 2023-06-11]. Dostupné z: <https://www.knauf.cz/produkty>
- [29] LUBOŠ SVOBODA A KOLEKTIV. *Stavební hmoty* [online]. 2018. Dostupné z: <https://k123.fsv.cvut.cz/media/subjects/files/123SH01/kniha-stavebni-hmoty.pdf>
- [30] *Gypsum* [online]. 2023 [vid. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gypsum&oldid=1185332262>
-

- [31] *Hemihydrát síranu vápenatého* [online]. 2022 [vid. 2024-01-02]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hemihydr%C3%A1t\\_s%C3%ADranu\\_v%C3%A1penat%C3%A9ho&oldid=21561827](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hemihydr%C3%A1t_s%C3%ADranu_v%C3%A1penat%C3%A9ho&oldid=21561827)
- [32] Sádrokartonové profily a příslušenství suché výstavby. *Rigips* [online]. [vid. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.rigips.cz/produkty/kategorie/profil-y-a-prislusenstvi/>
- [33] *Ocelové CW profily | Knauf Praha spol. s r.o.* [online]. [vid. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.knauf.cz/cw-profil-y>
- [34] Dřevostavby. *Rigips* [online]. [vid. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.rigips.cz/reseni/drevostavby/>
- [35] Požární odolnost sádrokartonových konstrukcí. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/stavebni-desky/21425-pozarni-odolnost-sadrokartonovych-konstrukci>
- [36] SAINT-GOBAIN CONSTRUCTION PRODUCTS CZ A.S. *KATALOG PRODUKTŮ* [online]. červen 2023. Dostupné z: <https://www.rigips.cz/clanky/novy-online-cenik-a-katalog-produktu-rigips/>
- [37] KOPER, Artur, KAROL PRAŁAT, JUSTYNA CIEMNICKA a KATARZYNA BUCZKOWSKA. Influence of the Calcination Temperature of Synthetic Gypsum on the Particle Size Distribution and Setting Time of Modified Building Materials. *Energies* [online]. 2020, **13**(21), 5759. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13215759
- [38] *Měrná tepelná kapacita* [online]. 2023 [vid. 2023-10-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C4%9Brn%C3%A1\\_tepeln%C3%A1\\_kapacita&oldid=22838521](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C4%9Brn%C3%A1_tepeln%C3%A1_kapacita&oldid=22838521)
- [39] IMA RAHMANIAN. *THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GYPSUM BOARDS AND THEIR INFLUENCES ON FIRE RESISTANCE OF GYPSUM BOARD BASED SYSTEMS* [online]. 2011. Dostupné z: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:137521&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>
- [40] NOUREDDINE BÉNICHOU, MOHAMED A. SULTAN, CATHERINE MACCALLUM, a JOE HUM. *THERMAL PROPERTIES OF WOOD, GYPSUM, AND INSULATION AT ELEVATED TEMPERATURES* [online]. říjen 2001. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/44072098\\_Thermal\\_Properties\\_of\\_Wood\\_Gypsum\\_and\\_Insulation\\_at\\_Elevated\\_Temperatures\\_Internal\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/44072098_Thermal_Properties_of_Wood_Gypsum_and_Insulation_at_Elevated_Temperatures_Internal_Report)
- [41] *Hustota* [online]. 2023 [vid. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hustota&oldid=23408158>
- [42] *Tepelná vodivost* [online]. 2023 [vid. 2023-10-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tepeln%C3%A1\\_vodivost&oldid=23104818](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tepeln%C3%A1_vodivost&oldid=23104818)
- [43] *UCEEB ČVUT - Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze - Vyvinuli jsme pec miniFUR pro středněrozměrové požární zkoušky* [online]. [vid. 2023-06-01]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/cz/novinky/vyvinuli-jsme-pec-minifur-pro-strednerozmerove-pozarni-zkousky/>
- [44] SPÁČIL, Martin. Tlakové poměry a rychlost proudění plynů v podmínkách požáru [online]. 2021 [vid. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/93614>

- 
- [45] *miniFUR3 – Požární zkušební laboratoř AFIRE* [online]. [vid. 2023-06-01]. Dostupné z: <https://www.afire.cz/minifur3/>
- [46] *ČSN EN 1995-1-2 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. prosinec 2006
- [47] NPRAP. ING. JAKUB BACA. *Měření hloubky kalcinace sádrokartonových desek*. fotodokumentace. prosinec 2023