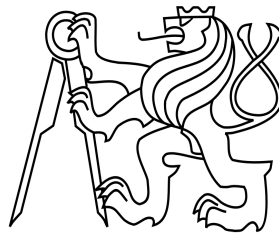


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STAVEBNÍ**

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb



**ANALÝZA STYČNÍKOVÉHO SPOJE  
PROVEDENÉHO POMOCÍ DESKY  
S OBOUSTRANNĚ PROLISOVANÝMI TRNY  
VLOŽENÉ MEZI DŘEVĚNÉ PRVKY**

ANALYSIS OF A TIMBER JOINT

WITH A DOUBLE-SIDED PUNCHED METAL PLATE FASTENER

EMBEDDED BETWEEN TIMBER ELEMENTS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Bc. Petra Schindlerová

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Velebil, Ph.D.

2021

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Schindlerová	Jméno: Petra	Osobní číslo: 410070
Zadávající katedra: K134 - Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	Analýza styčnickového spoje provedeného pomocí desky s oboustranně prolisovanými trny vložené mezi dřevěné prvky	
Název diplomové práce anglicky:	Analysis of a Timber Joint with a Double-Sided Punched Metal Plate Fastener Embedded between Timber Elements	
Pokyny pro vypracování:	Analytické řešení a numerický model spoje za požární situace.	
Seznam doporučené literatury:		
Jméno vedoucího diplomové práce:	Ing. Lukáš Velebil	
Datum zadání diplomové práce:	24. 9. 2020	Termín odevzdání diplomové práce: 4. 1. 2021
		<small>Údaj uveďte v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</small>
	Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem se při zpracování diplomové práce řídila metodickým pokynem ČVUT č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Práci jsem vypracovala samostatně a informace čerpala z uvedené literatury.

V Praze dne .....

.....

Bc. Petra Schindlerová

---

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala Ing. Lukáši Velebilovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost při konzultacích a udávání směru při zpracování této práce. Velmi si cením pomoci, bez které by nebyla získána potřebná experimentální data. Konkrétně se jednalo o zajištění zkušebních vzorků u firmy BOVA Březnice spol. s r.o., přípravu vzorků pro experiment a zdokumentování průběhu celého požárního experimentu.

Děkuji Ing. Marku Pokornému, Ph.D. za přínosné rady, vstřícnost, ochotu s provedením požární zkoušky v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze a předání zaznamenaných dat z oné zkoušky. Mé poděkování patří také prof. Ing. Františku Waldovi, CSc. za cenné rady. Dále děkuji Ing. Jakubu Šejnovi, který ochotně sdílel nabyté zkušenosti ohledně numerického modelování v programu ANSYS Workbench.

Nakonec bych ráda vyjádřila vděk všem akademickým pracovníkům, kteří předávají své znalosti s entusiasmem. Tento přístup je motivující, děkuji.

---



# Obsah

<b>Abstrakt</b>	7
<b>Abstract</b>	7
<b>Seznam použitých symbolů a zkratek</b>	<b>8</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 Současný stav poznání</b>	<b>11</b>
2.1 Ocel z požárního hlediska	11
2.2 Dřevo z požárního hlediska	11
2.3 Ocelová deska s oboustranně prolisovanými trny v nosném spoji	14
2.3.1 Dřevo-betonové stropy	14
2.3.2 Strop v CLT konstrukčním systému pro vícepodlažní stavby	15
<b>3 Cíle práce a metodika</b>	<b>16</b>
<b>4 Analyzovaný spoj</b>	<b>17</b>
4.1 Návrh spoje	17
4.1.1 Deska s oboustranně prolisovanými trny	17
4.1.2 Dřevěné prvky	18
4.1.3 Celkový popis a schéma navrženého spoje	18
4.2 Únosnost za běžné teploty	18
4.2.1 Materiálové charakteristiky dřevěných prvků	19
4.2.2 Materiálové charakteristiky ocelové spony	20
4.2.3 Výpočet tahové únosnosti dřevěných prvků za běžné teploty	20
4.2.4 Výpočet tahové únosnosti ocelové desky za běžné teploty	20
<b>5 Analytické řešení požární odolnosti spoje</b>	<b>21</b>
5.1 Tepelné zatížení	21
5.2 Únosnost za požární situace	22
5.2.1 Postup výpočtu únosnosti dřevěných prvků za požáru	22
5.2.2 Postup výpočtu únosnosti ocelové desky za požáru	23
5.2.3 Výpočet kritické teploty ocelového prvku	26
5.3 Výsledky analytického řešení	27
<b>6 Požární experiment</b>	<b>28</b>
6.1 Popis provedeného experimentu	28
6.1.1 Popis zkušební pece	28
6.1.2 Zkušební vzorky	29
6.1.3 Zatížení	30
6.1.4 Měření	30
6.1.5 Příprava vzorků	33
6.1.6 Umístění vzorků ve zkušební peci miniFUR	33
6.2 Výsledky experimentu a diskuze	34
6.2.1 Teplota v peci	34
6.2.2 Teploty ve vzorku „A“	35
6.2.3 Teploty ve vzorku „B“	37
6.2.4 Teploty u ocelové spony ve vzorku „C“	38

---

6.2.5	Teploty u ocelové spony ve vzorku „D“ .....	39
6.2.6	Vzorky po provedeném experimentu.....	39
6.2.7	Hloubka zuhelnatění .....	40
6.3	Vyhodnocení experimentu .....	40
<b>7</b>	<b>Numerická simulace.....</b>	<b>41</b>
7.1	Vstupní data.....	41
7.1.1	Materiály .....	41
7.1.2	Dřevo a jeho fyzikální vlastnosti pro tepelnou analýzu.....	42
7.1.3	Ocel a její fyzikální vlastnosti pro tepelnou analýzu.....	43
7.2	Tvorba modelu.....	44
7.2.1	Geometrie .....	44
7.2.2	Výpočetní síť .....	45
7.3	Řešení analýzy .....	46
7.3.1	Zatěžovací fáze a časový krok.....	46
7.3.2	Zatížení a okrajové podmínky .....	46
7.4	Výsledky numerické simulace.....	46
7.4.1	Okrajová část průřezu .....	47
7.4.2	Středová část průřezu.....	49
7.4.3	Středová část průřezu s mezerou ve stykové spáře.....	51
7.5	Shrnutí výsledků .....	52
<b>8</b>	<b>Analýza výsledků .....</b>	<b>53</b>
8.1	Rychlost a hloubka zuhelnatění.....	53
8.2	Průběh teplot v průřezu .....	54
8.2.1	Okrajová část průřezu .....	54
8.2.2	Středová část průřezu.....	54
8.2.3	Středová část s 3mm mezerou ve stykové spáře.....	55
8.3	Čas dosažení kritické teploty v ocelové desce .....	56
8.4	Vyhodnocení použitých metod.....	56
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>61</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>62</b>
	<b>Příloha 1 – Výsledky analytického řešení.....</b>	<b>64</b>
	<b>Příloha 2 – Výběr z fotodokumentace.....</b>	<b>94</b>

---

## Abstrakt

Cílem této práce je určení požární odolnosti styčnickového spoje provedeného pomocí ocelové desky s oboustranně prolisovanými trny vložené mezi dřevěné prvky. Uvažován je styčník tažených dřevěných prutů namáhaný normovým požárem. Zpracována je tepelná analýza, která sestává z analytického výpočtu, požárního experimentu a numerické simulace. Únosnost dřevěných prvků za požáru je posuzována metodou redukovaného průřezu podle Eurokódu 5 [1]. Požární odolnost ocelové desky je určena dobou dosažení kritické teploty podle Eurokódu 3 [2]. Požární experiment byl proveden ve středně-rozměrové zkušební peci. Pro numerickou simulaci byl zvolen software využívající metodu konečných prvků. Klasifikační doba požární odolnosti konstrukce se splněním kritéria R je předpokládána v délce 20 minut, stanoveno na základě výpočtů podle Eurokódů. Práce přináší podrobnější výsledky teplotní analýzy spoje dřevěných prvků se styčnickovou deskou s oboustranně prolisovanými trny.

### Klíčová slova

dřevo; ocel; spoj; spojovací prostředek; ocelová deska s oboustranně prolisovanými trny; požár; přenos tepla; tepelná analýza; experiment; simulace; požární odolnost

## Abstract

The aim of this paper is a determination of the fire resistance of a timber joint with a double-sided punched metal plate fastener embedded between two timber elements. A joint of timber members in tension under standard fire curve loading is considered. An elaborated thermal analysis consists of an analytical calculation, a fire experiment and a numerical simulation. The load bearing capacity of the timber members under fire conditions is assessed by reduced cross-section method according to Eurocode 5 [1]. The fire resistance of the steel member is defined by the time of reaching the critical temperature according to Eurocode 3 [2]. The fire experiment was performed in an intermediate-scale test furnace. The software uses finite element analysis was chosen for simulation. Fire resistance meeting the criteria R is expected for 20 minutes, based on analytical solution according to Eurocodes. This paper presents detailed thermal analysis results of a timber joint with a double-sided punched metal plate fastener embedded between two timber elements.

### Keywords

timber; steel; joint; fastener; double-sided punched metal plate; fire; heat transfer; thermal analysis; experiment; simulation; fire resistance

## Seznam použitých symbolů a zkratk

### Latinské a řecké symboly

$f_{m,k}$	Charakteristická pevnost v ohybu	MPa
$f_{t,0,k}$	Charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	MPa
$f_{t,90,k}$	Charakteristická pevnost v tahu kolmo k vláknům	MPa
$f_{c,0,k}$	Charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	MPa
$f_{c,90,k}$	Charakteristická pevnost v tlaku kolmo k vláknům	MPa
$f_{v,k}$	Charakteristická pevnost ve smyku	MPa
$E_{0,mean}$	Modul pružnosti	MPa
$E_{0,05}$	Hodnota 5% kvantilu modulu pružnosti	MPa
$E_{90,mean}$	Střední modul pružnosti kolmo na vlákna	MPa
$G_{mean}$	Modul pružnosti ve smyku	MPa
$\alpha_t$	Součinitel teplotní roztažnosti	1/K
$\rho$	Objemová hmotnost	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{mean}$	Průměrná hustota	kg/m <sup>3</sup>
$A$	Plocha	mm <sup>2</sup>
$f_y$	Mez kluzu oceli	MPa
$f_u$	Charakteristická mez pevnosti oceli v tahu	MPa
$A_{80}$	Tažnost oceli	%
$f_k$	Charakteristická pevnost za běžné teploty	MPa
$f_d$	Návrhová pevnost za běžné teploty	MPa
$f_{d,fi}$	Návrhová pevnost za požární situace	MPa
$f_{20}$	20% kvantil pevnostní vlastnosti při běžné teplotě	MPa
$\gamma_M$	Součinitel spolehlivosti materiálu za běžné teploty	
$\gamma_{M,fi}$	Součinitel spolehlivosti materiálu při požáru	
$k_{mod}$	Modifikační součinitel podle třídy provozu a trvání zatížení	
$k_{fi}$	Součinitel zatížení při požáru	
$k_{mod,fi}$	Modifikační součinitel při požáru	
$k_{p,02y,\theta}$	Redukční součinitel pevnosti pro tenkostěnný průřez závislý na teplotě	
$\sigma$	Napětí	MPa
$d_{char,n}$	Nominální hloubka zuhelnatění	mm

$\beta_n$	Nominální rychlost zuhelnatění	mm/min
$k_{flux}$	Součinitel zohledňující zvětšený tepelné tok skrz spojovací - prostředek	
$t_{req}$	Požadovaná normová doba požární odolnosti	min
$t$	Čas	min, s, hod
$k_0$	Součinitel tloušťky nulové pevnosti dle doby trvání požáru -	
$d_0$	Tloušťka vrstvy nulové pevnosti	mm
$d_{ef}$	Účinná hloubka zuhelnatění	mm
$\theta_g$	Teplota plynů	°C
$\Delta\theta_{a,t}$	Přírůstek teploty v oceli	°C
$\theta_{a,t}$	Teplota v oceli	°C
$\theta_{a,cr}$	Kritická teplota ocelového prvku	°C
$c_a$	Měrné teplo oceli	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$c_p$	Měrné teplo ochranného materiálu	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$d_p$	Tloušťka ochranného materiálu	mm
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$A_p/V$	Součinitel chráněného průřezu	m <sup>-1</sup>
$A_m/V$	Součinitel nechráněného průřezu	m <sup>-1</sup>
$h_{net}$	Tepelný tok	W.m <sup>-2</sup>
$E$	Youngův (statický) modul pružnosti v tahu	GPa
$\mu$	Poissonovo číslo	
$\alpha_l$	Koeficient teplotní délkové roztažnosti	°C <sup>-1</sup> nebo K <sup>-1</sup>
$\beta$	Koeficient teplotní objemové roztažnosti	°C <sup>-1</sup> nebo K <sup>-1</sup>
$\varepsilon$	Emisivita	

### Zkratky

CLT	Cross Laminated Timber / Křížem lepené masivní dřevo
MKP / FEM	Metoda konečných prvků / Finite Element Method
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze

# 1 Úvod

Ocelové desky s prolisovanými trny jsou známé svým využitím ve styčnicích příhradových vazníků, jedná se o tzv. gang-nail technologii. Desky s prolisovanými trny, nebo také spony, mají v tomto případě trny provedené z jedné strany a dvě stejné spony se zalisují do spojovaných dřevěných prvků ve styčnicí naproti sobě z vnější strany. Z požárně-bezpečnostního hlediska jsou konstrukce s tímto typem spoje nejméně spolehlivé [3]. Ke kolapsu příhradového vazníku se styčnicovými deskami s trny dochází přibližně po 10 minutách plně rozvinutého požáru [4 s. 21,31]. Tenká ocelová deska přímo vystavená vysokým teplotám měkne, ve styčnicích tak dochází k náhlému poklesu únosnosti. Po selhání kteréhokoli styčnicí v příhradové konstrukci ztrácí soustava rovnováhu a důsledkem toho nastává porušení mezního stavu požární odolnosti „R“ (únosnost a stabilita), který musí nosný prvek pro požadovanou dobu splňovat.

Návrhu ocelových prvků na požární situaci je třeba věnovat náležitou pozornost, protože ocel snadno vede do své struktury teplo a zároveň se jejím zahříváním zhoršují mechanické vlastnosti. V souvislosti s otázkou požární odolnosti je kombinace materiálů dřevo-ocel známá. Dřevo je dobrý tepelně-izolační materiál nejen za běžných podmínek, ale také za požáru. Při 300 °C se ze dřevní hmoty stává dřevěné uhlí, které propouští dále dovnitř průřezu méně tepla, neboť jeho tepelná vodivost je téměř o polovinu nižší, než je tepelná vodivost dřeva při 20 °C [1, 5]. U dřevěných prvků je potom značný teplotní rozdíl mezi stranou vystavenou tepelnému toku z požáru a odvrácenou stranou. Prostřednictvím obkladů ze dřeva nebo z materiálů na bázi dřeva je poskytována protipožární ochrana, protože zabraňují pronikání tepla k chráněnému prvku.

U spojů dřevěných konstrukcí s ocelovými spojovacími prostředky je z hlediska požární odolnosti rozhodující jejich průřezová plocha a uspořádání [3]. Modifikací tradičního styčnicového spoje s prolisovanými deskami, a to návrhem oboustranně prolisované desky a jejím vložením mezi dvojici dřevěných prvků, lze zajistit vyšší požární odolnost spoje z důvodů, které byly popsány v předchozím odstavci.

Inspirací tématu diplomové práce jsou probíhající výzkumy pro využití ocelové desky s oboustranně prolisovanými trny jako spřahovacího prostředku pro dřevěné nosníky s betonovou deskou. Při tomto využití je spodní část spony zalisovaná mezi dvojicí dřevěných trámů a část přesahující dřevěné prvky je určena pro spřažení s betonovou konstrukcí stropu. Z výsledků prací lze vyvodit, že oboustranně prolisovaná deska spolehlivě spojuje dřevěné prvky. [6]

Výpočtem požární odolnosti spoje s oboustranně prolisovanou deskou vloženou mezi dřevěné prvky se dosud žádná práce nezabývala. V této práci bude požární odolnost stanovena analytickým výpočtem i numerickou simulací, jejíž výsledky budou ověřeny daty získanými z požárního experimentu, který je součástí diplomové práce.

## 2 Současný stav poznání

Požární odolnost konstrukcí závisí na mechanicko-fyzikálních vlastnostech použitých materiálů. Vlivem vyšších teplot dochází ve stavebních materiálech k fyzikálně chemickým procesům, které se projeví změnou jejich vlastností. [7, 8]

Požární odolnost je určena dobou, po kterou je konstrukce schopna během požáru plnit požadovanou funkci, definovanou jako mezní stav podle ČSN EN 13501-2 [9]. Základními mezními stavy jsou únosnost a stabilita – s písmenným označením R, celistvost – E, a izolační schopnost – I nebo W.

### 2.1 Ocel z požárního hlediska

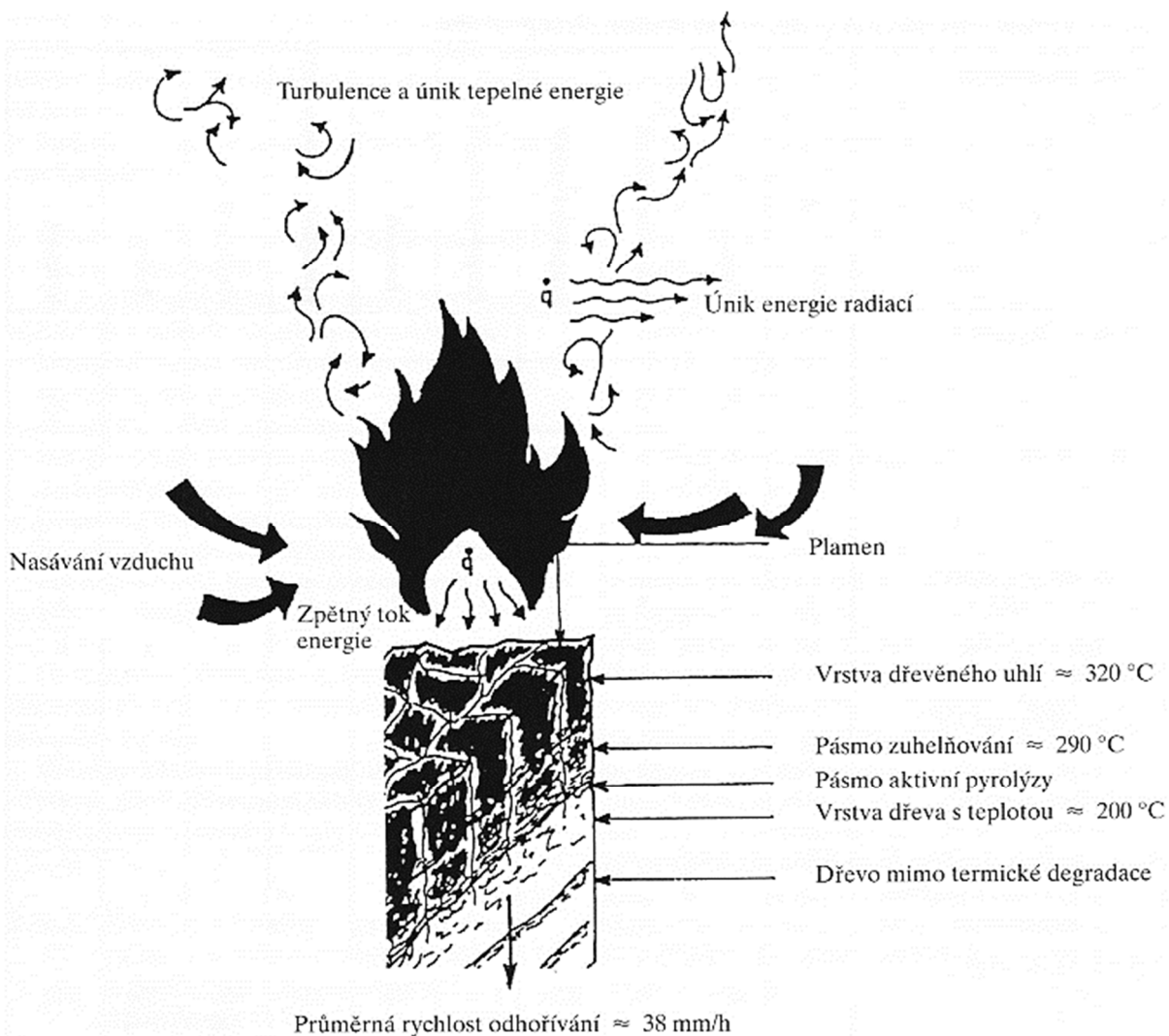
Ocel je nehořlavý stavební materiál s vysokou tepelnou vodivostí, která je  $53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při pokojové teplotě, při zahřívání dochází k poklesu na hodnotu cca  $27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  [2]. Pokud je tedy některá část ocelové konstrukce zahřívána, teplo je rychle vedeno do zbylých částí prvku. Z toho důvodu se při návrhu ocelových konstrukcí na účinky požáru navrhuje izolační obklady nebo protipožární nátěry a nástřiky. Izolačním obkladem může být například dřevěná deska.

Přibližně od teploty  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  dochází k poklesu mechanických vlastností oceli, které začínají ohrožovat statickou funkci konstrukce. Při teplotě kolem  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  klesá pevnost oceli k 30-50 % původní hodnoty. Dalšími nepříznivými jevy u oceli při požáru je nárůst deformace ocelových konstrukcí a vysoká teplotní roztažnost. [7, 8]

Požární odolnost ocelové konstrukce je určována časem dosažení kritické teploty, jejíž hodnota bývá uvažována  $470 \text{ }^\circ\text{C}$  [7]. Kritickou teplotu lze stanovit výpočtem podle ČSN EN 1993-1-2 [2]. Odolnost ocelové konstrukce při požární situaci je ovlivněna tzv. součinitelem průřezu. Stanovuje se podle ČSN EN 1993-1-2 [2], rozdílně pro nechráněnou konstrukci a chráněnou konstrukci požárně ochranným materiálem. S narůstajícím součinitelem průřezu klesá požární odolnost a roste tepelná pohltivost ocelového prvku. [7]

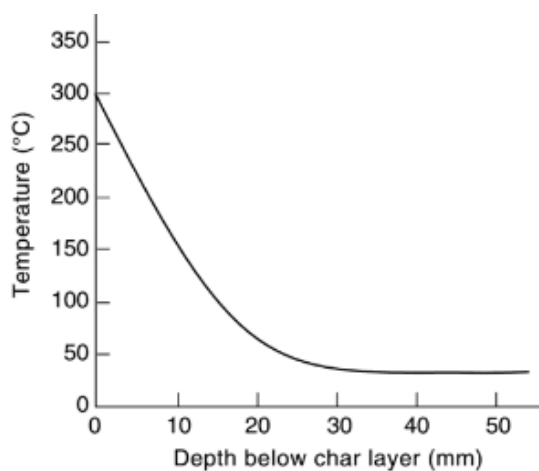
### 2.2 Dřevo z požárního hlediska

Dřevo se za běžných okolností vznítí při teplotě  $250\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Poté dochází k postupnému hoření povrchových vrstev dřeva a jejich přeměně na zuhelnatělou vrstvu. V zuhelnatělé vrstvě je teplota  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pod touto vrstvou dochází k pyrolýze dřeva, teplota dřeva je v této zóně přibližně  $200\text{--}290 \text{ }^\circ\text{C}$ . Přibližně  $15 \text{ mm}$  pod zuhelnatělou vrstvou je teplota ve dřevěném prvku nižší než  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vzniklé vrstvy ve dřevěném průřezu během hoření jsou zobrazeny na obr. 1. [1, 5]



Obr. 1 Schéma hoření dřeva [10]

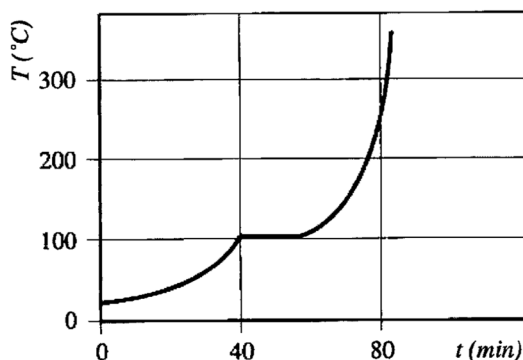
V hloubce 25 mm pod zuhelnatělou vrstvou není dřevo zvýšenou teplotou ovlivněno. Průběh teplot pod zuhelnatělou vrstvou v závislosti na hloubce od zuhelnatělé vrstvy je na obr. 2. [11]



Obr. 2 Teplotní profil pod zuhelnatělou vrstvou [11]



Teplota pod vrstvou pyrolýzy je ovlivněna vlhkostí, která je vázaná ve dřevě. Nejdříve dochází k vysoušení dřeva a růstu teploty na 100 °C, poté zůstává teplota pod vrstvou pyrolýzy konstantní na této hodnotě. K dalšímu vzrůstu teploty dochází v momentě, kdy se odpaří všechna vlhkost. Teplota pod vrstvou pyrolýzy dřeva vystaveného normovému požáru je na obr. 3. [5]



Obr. 3 Teplota pod vrstvou pyrolýzy dřeva, které je vystaveno požáru podle normové teplotní křivky [5]

Požární odolnost nosné dřevěné konstrukce je ovlivněna tvarem a rozměrem průřezu nosných prvků, rychlosti odhořívání povrchových vrstev (závisí na kvalitě povrchu dřevěných prvků, poréznosti dřeva), velikosti napětí v průřezu a těsnosti spojů. [3]

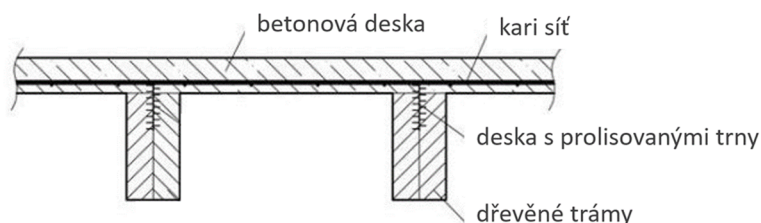
Pro únosnost dřevěných prvků za požární situace je rozhodující hloubka zuhelnatění, která je dána rychlostí zuhelnatění a dobou trvání požáru. U dřevěného prvku se pak rozeznává zuhelnatělá vrstva a zbytkový průřez, ve kterém nejsou mechanické vlastnosti dřeva výrazně ovlivněny.

Návrh dřevěných prvků podle ČSN EN 1993-1-2 lze provést pomocí tří metod. Výpočty se mohou provádět podle zjednodušené metody účinného průřezu, metody redukovaných pevností nebo obecné metody. U zjednodušené metody účinného průřezu se počítá s hloubkou zuhelnatění zvětšenou o vrstvu s nulovou pevností. Metoda redukované pevnosti a tuhosti uvažuje s celým zbytkovým průřezem a poklesem pevnostních parametrů dřeva pod zuhelnatělou vrstvou. Podle obecné metody je ve zbytkovém průřezu určován stav teploty a vlhkosti dřeva a podle těchto hodnot jsou určovány pevnosti a tuhosti materiálu. [1, 5]

## 2.3 Ocelová deska s oboustranně prolisovanými trny v nosném spoji

### 2.3.1 Dřevo-betonové stropy

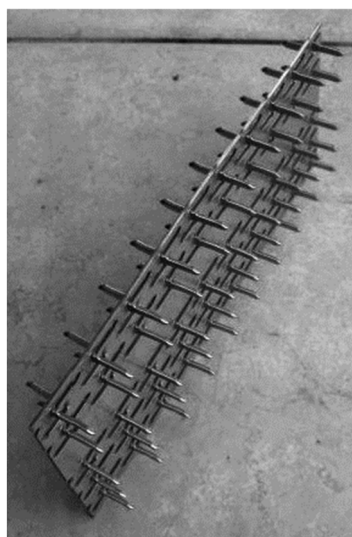
V současné době probíhají výzkumy pro využití ocelové desky s oboustranně prolisovanými trny jako spřahovacího prostředku mezi dřevěnými nosníky, které jsou tvořeny dvojicí dřevěných prvků vzájemně spojených zalisováním oboustranně prolisované desky, a betonovými deskami pro vytvoření kompozitní konstrukce, dřevo-betonového stropu.



Obr. 4 Příčný řez dřevo-betonovou konstrukcí [6]

V dřevo-betonové stropní konstrukci je oboustranně prolisovaná ocelová deska zalisovaná mezi dvojicí dřevěných nosníků, část ze šířky desky přesahuje horní okraj nosníků a je určena pro smykové spojení s betonovou deskou (obr. 4).

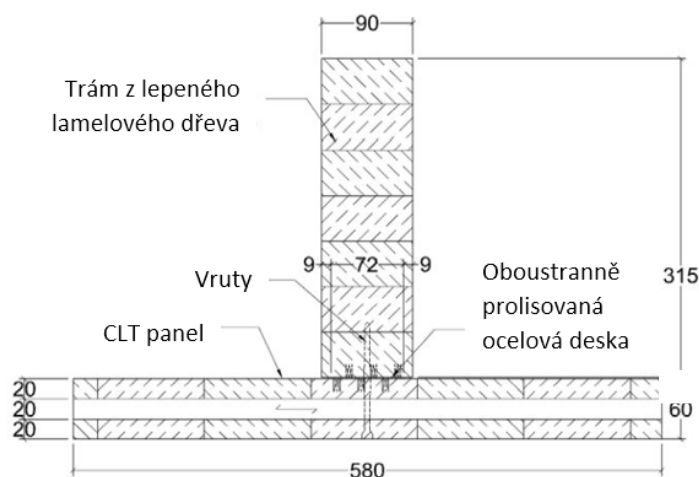
V posledních 30 letech bylo na toto téma provedeno několik rozsáhlých výzkumů, např. na Technické univerzitě Delft (Van der Linden, 1999), v Technologickém institutu v Karlsruhe (Blass et al., 1995) a na Univerzitě ve Stuttgartu (Aicher et al., 2003) [12]. Na základě těchto prací byl vyroben, ve spolupráci s ČVUT (Nechanický, Kuklík, Kuklíková, 2012, [6]), prototyp inovativní ocelové desky s oboustranně prolisovanými trny pro spřažené dřevo-betonové stropy výrobcem BOVA Březnice spol. s r.o. (obr. 5).



Obr. 5 Prototyp spony s oboustranně prolisovanými trny pro dřevo-betonové stropy [13]

### 2.3.2 Strop v CLT konstrukčním systému pro vícepodlažní stavby

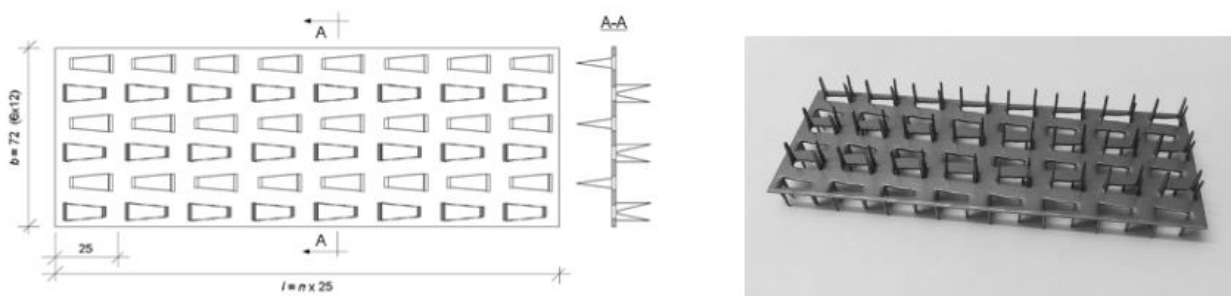
Další konstrukcí, ve které je oboustranně prolisovaná deska navržena v nosném spoji, je nový typ stropu v CLT konstrukčním systému pro vícepodlažní stavby. Výzkum probíhá na švédské univerzitě Luleå University of Technology (Nicolas Jacquier, 2014 [14], 2015 [15]). Jedná o trámy z lepeného lamelového dřeva ve spojení s CLT panelem pomocí oboustranně prolisované desky v kombinaci s vruty (obr. 6).



Obr. 6 Příčný řez spoje trámů z lepeného lamelového dřeva a CLT panelu [15]

V rámci výzkumných prací nového typu stropu byly prováděny pevnostní zkoušky – smykové (Nicolas Jacquier, 2014 [14]) a ohybové (Nicolas Jacquier, 2015 [15]). Rovněž byla v pevnostních zkouškách měřena odolnost na vytažení spojovacích prostředků [15]. Testovány byly 3 vzorky: spojení pomocí vrutů, spoj pouze s oboustranně prolisovanou deskou, a nakonec spoj s kombinací vrutů s oboustranně prolisovanou deskou.

Shrnuli výsledky zajímavé pro svoji práci ze zprávy pevnostních zkoušek na vytažení, oboustranně prolisovaná deska (obr. 7) má značný podíl na pevnosti spojení CLT panelu s nosníkem. Protože trny prolisované desky nemají dostatečnou kapacitu proti vytažení nebo pro vznik plastického kloubu po dosažení meze kluzu, po této fázi dochází k vytažení trnů ze dřevěných prvků. Dodatečné protažení ve spoji při ohybu/smyku i za mezí kluzu umožňují například vruty. [15]



Obr. 7 Oboustranně prolisované desky pro spojení CLT panelu a trámu z lepeného lamelového dřeva [15]

### **3 Cíle práce a metodika**

Hlavním cílem diplomové práce je stanovení požární odolnosti styčnickového spoje, který je proveden pomocí oboustranné styčnickové ocelové spony zalisované mezi dřevěné prvky.

Nejdříve bude zpracován návrh spoje, který bude zkoumán. Na navrženém spoji bude provedena tepelná analýza výpočetními metodami, experimentálně a numerickou simulací. Cílem každé analýzy bude zjištění času dosažení kritické teploty ocelové desky a určení hloubky zuhelnatění dřevěných prvků pro požadovaný čas.

Analytický výpočet bude proveden podle postupů uvedených v ČSN EN 1993-1-2 [2] a ČSN EN 1995-1-2 [1] pro navrhování konstrukcí na účinky požáru. Spoj při požární situaci bude vymodelován ve výpočetním programu využívajícím metodu konečných prvků. Experimentální data budou získána z požární zkoušky a bude jimi posouzen výpočet a numerický model.

Požární odolnost bude vyhodnocena na základě porovnání výsledků dosažených v jednotlivých částech práce.

## 4 Analyzovaný spoj

Analyzovaným spojem je styčnický tažených dřevěných prutů. Například u příhradového vazníku tento spoj nalezneme ve spodním pásu konstrukce.

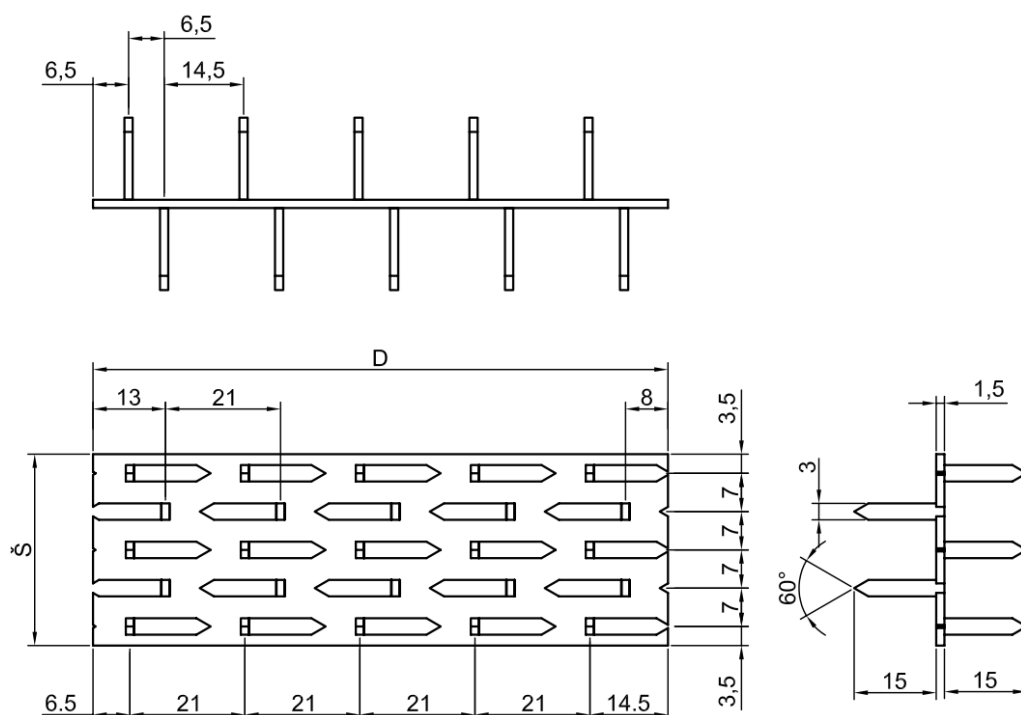
V této kapitole je specifikován konkrétní typ použité oboustranné styčnickové desky s trny ve spoji, dále geometrie průřezu včetně specifikace materiálů, a nakonec je vypočítána tahová únosnost jednotlivých prvků za běžné teploty.

### 4.1 Návrh spoje

#### 4.1.1 Deska s oboustranně prolisovanými trny

Ve spoji je použita oboustranná spona, která je dostupná na českém trhu. Jedná se o styčnickovou desku BV15/O od firmy Bova, spol. s.r.o. Geometrie oboustranné spony je zobrazena na obr. 8.

Deska s oboustranně prolisovanými trny je ze žárově pozinkovaného ocelového plechu pevnosti S280GD+Z275, tloušťky 1,5 mm. Zvolena je deska šířky 140 mm. Délka prolisovaných trnů je 15 mm, šířka 3 mm. Po délce desky je rozteč prolisovaných trnů 21 mm. Vzdálenost mezi řadami trnů je 7 mm, přičemž každá druhá řada trnů je prolisována na opačnou stranu desky.



Obr. 8 Styčnicková deska oboustranná BV15/O [16]

#### 4.1.2 Dřevěné prvky

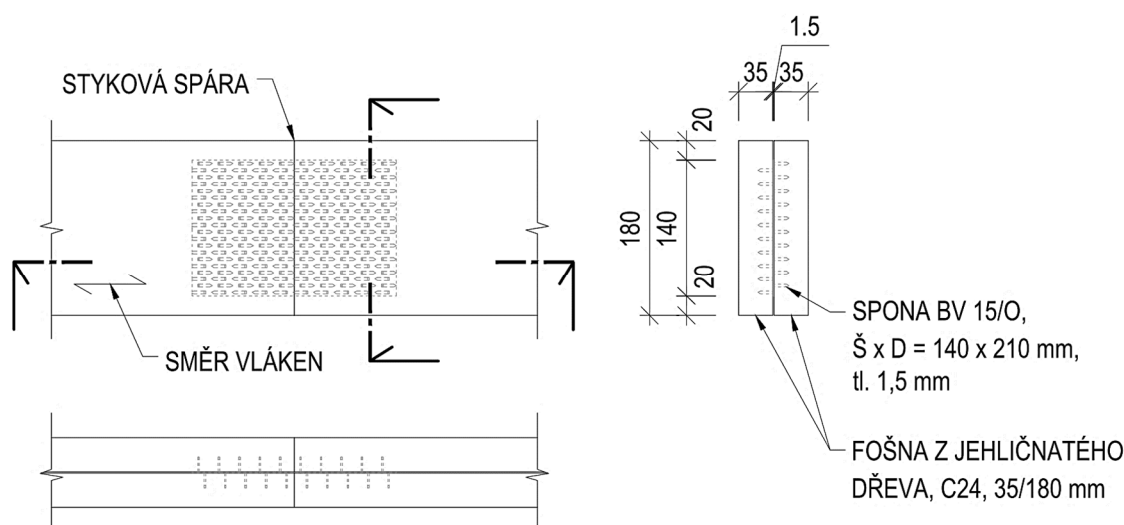
Aby byla ocelová deska chráněná před účinky vyšších teplot, její šířka musí být menší než rozměr dřevěných prvků. Podle doplňujících pravidel pro spoje s vnitřními ocelovými deskami z normy ČSN EN 1995-1-2 [1], má být hloubka dutiny od okraje dřevěných prvků k ocelové desce větší než 20 mm pro dobu požární odolnosti 30 minut. Zvolena je hloubka dutiny 20 mm.

Je třeba také určitě vrstvy dřeva pro ochranu před vedením tepla skrze trny do ocelové desky, která je mezi dřevěnými prvky. Od okraje průřezu po trny je zvolena stejná tloušťka vrstvy dřeva, jako je hloubka dutiny od okraje dřevěných prvků k ocelové desce, tedy 20 mm.

Na základě výše uvedených předpokladů jsou dřevěné prvky navrženy o průřezových rozměrech 35 x 180 mm. Materiál je zvolen standardně využívaný pro konstrukce se styčnickovými deskami s trny, tím je jehličnaté rostlé dřevo o třídě pevnosti C24.

#### 4.1.3 Celkový popis a schéma navrženého spoje

Dřevěné prvky mají šířku 35 mm a výšku 180 mm, mezi ně je zalisována oboustranná styčnicková ocelová deska šířky 140 mm z plechu tloušťky 1,5 mm. Hloubka dutiny od okraje dřevěných prvků k ocelové desce je 20 mm. Dutina mezi párem dřevěných prvků má tloušťku jako ocelová spona, tj. 1,5 mm. Schéma styčnicku viz obr. 9.



Obr. 9 Analyzovaný spoj v pohledu, příčném a horizontálním řezu

## 4.2 Únosnost za běžné teploty

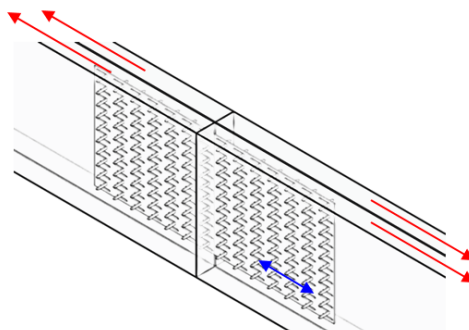
Navrhování spojů se styčnickovými deskami s prolisovanými trny se provádí podle postupů uváděných v normách ČSN EN 1995-1-1 [1] a ČSN 73 1702 [17]. Pro výpočet únosnosti spojů dle normových vzorců je třeba znát charakteristické pevnostní vlastnosti styčnickové desky, které se stanovují na základě zkoušek definovaných v ČSN EN 1075 [18]. V praxi jsou konstrukce

se styčnickovými deskami s prolisovanými trny navrhovány pomocí softwaru výrobců těchto konstrukcí [19, 20].

Na českém trhu nejsou v současné době v nabídce oboustranně prolisované desky, které by mohly být navrženy pro nosný spoj v dřevěných konstrukcích. Pro oboustranné spony nebyly provedeny pevnostní zkoušky podle ČSN EN 1075 [18] a nejsou tedy známy pevnostní charakteristiky pro návrh spojů se styčnickovými deskami podle ČSN EN 1995-1-1 [21]. Nicméně lze usuzovat, že spona může být pro spojení dvojice prutových prvků použita. Důvodem je uspořádání spoje. Pokud je hlavní směr desky rovnoběžný se směrem působení sil (viz schéma na obr. 10), nehrozí vytažení trnů ze dřevěných prvků a rozhodující je pevnost oceli.

Přenos sil ve spoji s oboustranně prolisovanou deskou je předpokládán obdobný, jako je přenos sil ve spoji se styčnickovými deskami s jednostranně prolisovanými trny, podle [5]. Síla bude ve spoji přenášena z dřevěných prvků do trnů, z trnů přenášena do ocelové desky a z ní prostřednictvím trnů bude přenášena do konstrukčních prvků na druhé straně stykové spáry. Pro mezní únosnost spoje při přenosu vnitřních sil bude rozhodující únosnost čistého průřezu oceli ve stykové spáře mezi dřevěnými prvky.

Protože nejsou známy hodnoty charakteristických pevností oboustranné spony pro určení celkové odolnosti spoje, je vypočítána tahová únosnost jednotlivých prvků. Únosnost ocelové desky je stanovena podle ČSN EN 1993-1-1 [22] na základě známé pevnosti materiálu a posuzována je v místě otvorů po prolisovaných trnech, dále označovaném jako kritický řez.



Obr. 10 Izometrie spoje s oboustranně prolisovanou styčnickovou deskou spojující dřevěné prvky, modrá šipka značí hlavní směr desky, červené šipky představují síly působící na dřevěné prvky

#### 4.2.1 Materiálové charakteristiky dřevěných prvků

Hodnoty materiálových vlastností a charakteristických pevností rostlého dřeva s třídou pevnosti C24 jsou uvažovány dle ČSN EN 338: 2009, Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti [23]. Následující výčet obsahuje hodnoty potřebné pro výpočty řešeného spoje:

$f_{t,0,k}$	=	14,0 MPa	...	Charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny
$E_{0,mean}$	=	11 GPa	...	Modul pružnosti rovnoběžně s vlákny
$\rho_{mean}$	=	420,0 kg.m <sup>-3</sup>	...	Průměrná hustota

#### 4.2.2 Materiálové charakteristiky ocelové spony

Oboustranně prolisovaná styčnicková deska je vyrobena z oceli s označením S280GD+Z275. Materiálové charakteristiky jsou určeny na základě označení oceli podle ČSN EN 10027-1:2017, Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli [24].

$f_y$	=	280 MPa	... Mez kluzu
$f_u$	=	360 MPa	... Pevnost v tahu
$A_{80}$	=	18 %	... Nejnižší tažnost

#### 4.2.3 Výpočet tahové únosnosti dřevěných prvků za běžné teploty

Tahová únosnost dřeva za běžné teploty je vypočítána podle ČSN EN 1995-1-1: 2006, Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby [21].

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \text{ Návrhová pevnost dřevěného prvku v tahu za běžné teploty}$$

$$k_{mod} = 0,9 \quad \dots \text{ Modifikační součinitel pro třídu provozu 1 a krátkodobé zatížení}$$

$$\gamma_M = 1,3 \quad \dots \text{ Součinitel spolehlivosti pro rostlé dřevo}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{0,9 \cdot 14}{1,3} = 9,7 \text{ MPa}$$

$$F_{t,0,d} = f_{t,0,d} \cdot A \quad (\text{kN}) \quad \dots \text{ Tahová únosnost dřevěného prvku}$$

$$A = 5\,895 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Průřezová plocha jednoho dřevěného prvku zmenšená o řadu trnů ocelové spony}$$

$$F_{t,0,d} = 9,7 \cdot 5895 = 57\,181,5 \text{ N} = 57,2 \text{ kN}$$

#### 4.2.4 Výpočet tahové únosnosti ocelové desky za běžné teploty

Odolnost ocelové desky za běžné teploty je stanovena podle ČSN EN 1993-1-1: 2006, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby [22]. Plocha čistého průřezu oceli se určí v místě, ve kterém jsou otvory po prolisovaných trnech.

$$N_{Rd} = \frac{A_s f_y}{\gamma_M} \quad (\text{kN}) \quad \dots \text{ Tahová únosnost ocelové desky v jejím kritickém řezu}$$

$$A_s = 120 \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ Plocha čistého průřezu oceli v kritickém řezu}$$

$$\gamma_M = 1,25 \quad \dots \text{ Součinitel spolehlivosti oceli}$$

$$N_{Rd} = \frac{120 \cdot 280}{1,25} = 26\,880,0 \text{ N} = 26,9 \text{ kN}$$



## 5 Analytické řešení požární odolnosti spoje

Výpočet požární odolnosti spoje s oboustranně prolisovanou styčnickovou deskou vloženou mezi dřevěné prvky je proveden pomocí postupů uvedených v normách pro navrhování konstrukcí na účinky požáru. V případě ocelové spony je postupováno podle ČSN EN 1993-1-2 [2]. Pro dřevěné prvky se použije ČSN EN 1995-1-2 [1]. Tepelné namáhání je uvažováno podle zvolené nominální teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 [25].

Požární odolnost je v této části práce stanovena prostřednictvím výpočtu únosnosti jednotlivých prvků v závislosti na čase a proměnném zatížení teplotou. Požární odolnost ocelového prvku je určena dobou, kdy je dosaženo kritické teploty uvnitř prvku. Kritická teplota v principu určuje teplotu, při které prvek ztrácí únosnost pro dané návrhové podmínky. Čas dosažení kritické teploty je určen z tzv. přírůstkové metody, kterou se stanoví průběh teploty v ocelovém prvku. Je předpokládáno, že dřevěné prvky splňují mezní stav únosnosti za požáru, dokud jejich únosnost není menší, než je hodnota únosnosti ocelové desky při kritické teplotě. Únosnost dřevěných prvků je stanovena metodou redukovaného průřezu, která slouží ke stanovení požární odolnosti.

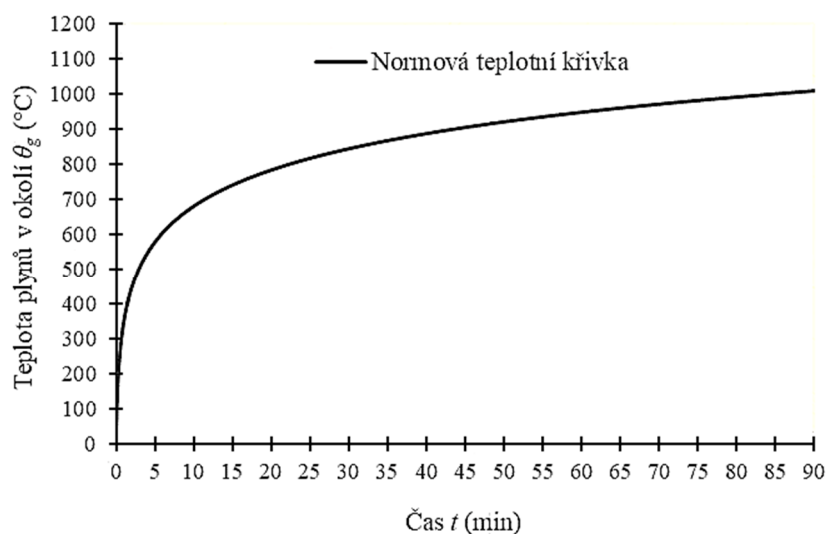
### 5.1 Tepelné zatížení

Pro popis rozvoje teploty v čase v okolí povrchu řešeného spoje je zvolena normová teplotní křivka (označována jako ISO 834) podle ČSN EN 1991-1-2 [10] odstavce 3.2.1. Křivkou je modelován plně rozvinutý požár [10]. Grafické znázornění normové teplotní křivky je na obr. 11.

Teplota plynů v požárním úseku  $\theta_g$  je určena vztahem:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (^\circ\text{C}), \quad (1)$$

kde  $t$  je čas v minutách.



Obr. 11 Normová teplotní křivka

## 5.2 Únosnost za požární situace

Výpočty únosnosti jednotlivých prvků jsou zpracovány podle ČSN EN 1993-1-2 [2] a ČSN EN 1995-1-2 [1]. Vzhledem k množství opakujících se matematických operací podle stejných vzorců, jejich vzájemné návaznosti a časové závislosti některých hodnot jsou výpočty provedeny v tabulkovém procesoru Microsoft Excel® [26]. Postup výpočtů je popsán v následujících odstavcích. Vzorce jsou převzaty z příslušné ČSN.

### 5.2.1 Postup výpočtu únosnosti dřevěných prvků za požáru

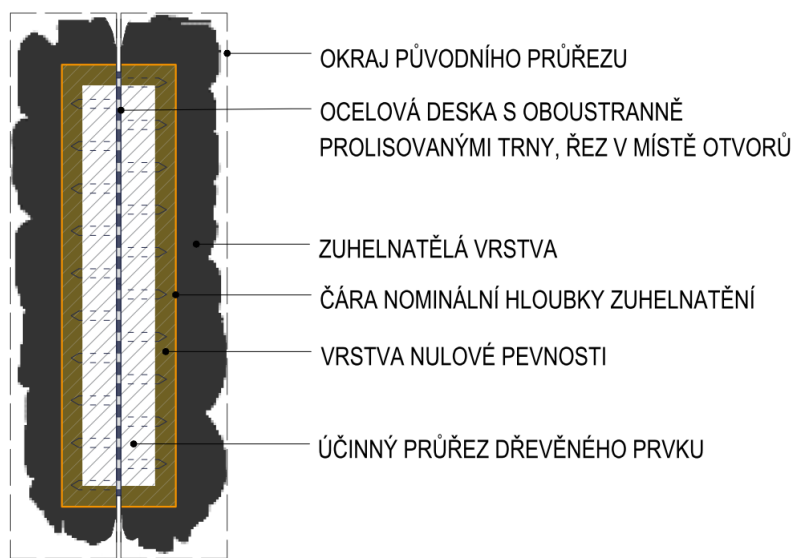
Dřevěné prvky jsou posuzovány metodou redukovaného průřezu podle ČSN EN 1995-1-2 [11]. Únosnost dřevěných prvků závisí na velikosti tzv. účinného průřezu. Princip metody je graficky znázorněn na posuzovaném spoji na obr. 12. Účinný, nebo redukovaný, průřez se vypočítá pomocí redukce původního průřezu o účinnou hloubku zuhelnatění  $d_{ef}$ :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 \quad (\text{mm}), \quad (2)$$

kde  $d_{char,n}$  ... nominální hloubka zuhelnatění v milimetrech;

$k_0$  ... součinitel tloušťky nulové pevnosti,  $k_0 = t_f/20$ , pokud je doba trvání požáru  $t_f$  menší než 20 minut,  $k_0 = 1$ , pokud je doba trvání požáru větší než 20 minut;

$d_0$  ... tloušťka vrstvy nulové pevnosti v milimetrech,  $d_0 = 7$  mm podle [2].



Obr. 12 Schéma výpočetní metody redukovaného průřezu na posuzovaném spoji

Nominální hloubka zuhelnatění  $d_{char,n}$  je hloubka zuhelnatění se zahrnutím účinku zaoblení rohů a trhlin. Nominální hloubka zuhelnatění v čase  $t$ :

$$d_{char,n,t} = \beta_n t \quad (\text{mm}), \quad (3)$$

kde  $\beta_n$  ... nominální rychlost zuhelnatění pro rostlé jehličnaté dřevo,  $\beta_n = 0,8$  mm/min;

$t$  ... čas v minutách.

Ve výpočtech je také zohledněn zvětšený tepelný tok prostřednictvím spojovacího ocelového prostředku. Rychlost odhořívání je uvažována vyšší od místa, kdy čára zuhelnatění dosahuje trnů ocelové desky. Nominální hloubka zuhelnatění se potom určí vztahem:

$$d_{char,n.II} = k_{flux} \beta_{nt} \quad (\text{mm}), \quad (4)$$

kde  $k_{flux}$  ... součinitel zohledňující zvětšený tepelný tok skrz spojovací prostředek,  
 $k_{flux} = 1,5$ .

Je uvažováno, že jeden dřevěný prvek je zvýšeným teplotám exponován ze tří stran, 1,5 mm dutina mezi dřevěnými prvky je zanedbána. Výpočet plochy účinného průřezu  $A_{ef}$ :

$$A_{ef} = h_{ef} b_{ef} \quad (\text{mm}^2), \quad (5)$$

kde  $b_{ef} = b - d_{ef}$  (mm),  $b = 35$  mm,

$h_{ef} = h - 2d_{ef}$  (mm),  $h = 180$  mm.

Tahová odolnost dřevěného prvku za požáru  $R_{Rd,fi}$ :

$$R_{Rd,fi} = f_{t,0,d,fi} \cdot A_{ef} - (\text{plocha deseti trnů}) \quad (\text{N}), \quad (6)$$

kde  $f_{t,0,d,fi}$  ... návrhová tahová pevnost dřeva při požáru v MPa.

Výpočet návrhové tahové pevnosti dřeva při požáru:

$$f_{t,0,d,fi} = \frac{k_{mod,fi} \cdot f_{t,0,20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (\text{MPa}), \quad (7)$$

kde  $k_{mod,fi}$  ... modifikační součinitel při požáru,  $k_{mod,fi} = 1,0$ ;

$f_{t,0,20}$  ... 20% kvantil tahové pevnosti při běžné teplotě v MPa;

$\gamma_{M,fi}$  ... součinitel spolehlivosti dřeva při požáru,  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ .

$$f_{t,0,20} = k_{fi} \cdot f_{t,0,k} \quad (\text{MPa}), \quad (8)$$

kde  $k_{fi}$  ... součinitel pro rostlé dřevo,  $k_{fi} = 1,25$ ;

$f_{t,0,k}$  ... charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny v MPa.  $f_{t,0,k} = 14$  MPa.

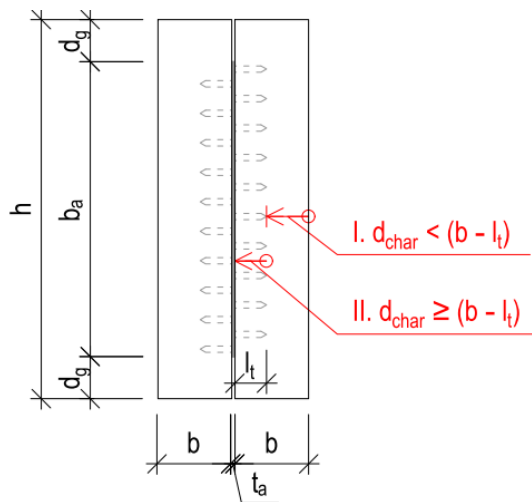
### 5.2.2 Postup výpočtu únosnosti ocelové desky za požáru

Výpočet únosnosti ocelové desky za požáru je proveden pro kritický řez, který je v desce, v místě otvorů po prolisovaných trnech. Redukována je návrhová pevnost oceli podle teploty v průřezu.

Přírůstek teploty v ocelové desce je stanoven podle ČSN EN 1993-1-2 [2]. Předpokládáno je rovnoměrné rozložení teploty po průřezu desky, protože ocel je materiál s vysokou tepelnou vodivostí.

Uvažovány jsou dvě fáze přestupu tepla do ocelové desky. V první fázi se přírůstek teploty určí jako pro průřez chráněný, ve druhé fázi se použije výpočet přírůstku teploty pro nechráněné konstrukce.

Ocelová deska se uvažuje jako chráněná dřevní hmotou, dokud čára zuhelnatění nedosahuje hrotů spony, viz schéma na obr. 13. Druhá fáze nastává od okamžiku, kdy dochází k prohořívání dřeva dále do hloubky kolem trnů k ocelové desce. Přírůstek teploty je počítán pro časový krok  $t$  roven 5 s.



Obr. 13 Schéma fázi výpočtu přestupu tepla do ocelové desky

V první fázi je vnitřní ocelový prvek izolovaný požárně ochranným materiálem – dřevem. Teplotní přírůstek  $\Delta\theta_{a,t}$  se určí pomocí výrazu z ČSN EN 1993-1-2 podle 4.2.5.2 [2]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \frac{A_p}{V}}{d_p c_a \rho_a} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\varphi}{3}} \Delta t - \left( e^{\frac{\varphi}{10}} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t} \quad (9)$$

musí platit  $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ ,  $\Delta\theta_{g,t} > 0$ ,

kde  $\varphi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$ ,

$A_p$  ... plocha požárně ochranného materiálu na jednotku délky prvku ( $m^2/m$ ),  
 $A_p = 0,343 \text{ m}^2/m$ ;

$V$  ... objem prvku na jednotku délky ( $m^3/m$ ),  $V = 9,42 \cdot 10^4 \text{ m}^3/m$ ;

$A_p/V$  ... součinitel průřezu pro prvky s požárně ochranným materiálem ( $1/m$ ),  
 $A_p/V = 364,12 \text{ 1/m}$ ;

$\Delta\theta_{g,t}$  ... přírůstek okolní teploty během časového intervalu  $\Delta t$  (K);

$\theta_{g,t}$  ... teplota plynů v okolí v čase  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta_{a,t}$  ... teplota oceli v čase  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\lambda_p$  ... tepelná vodivost ochranného materiálu ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ );

$d_p$  ... tloušťka požárně ochranného materiálu (m);

$c_p$  ... na teplotě nezávislé měrné teplo požárně ochranného materiálu ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ );

$\rho_p$  ... hustota požárně ochranného materiálu ( $\text{kg m}^{-3}$ );

- $c_a$  ... na teplotě závislé měrné teplo oceli ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  
 $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600\text{ }^\circ\text{C}$ :  $c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$ ,  
 $600\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735\text{ }^\circ\text{C}$ :  $c_a = 666 + 13002/(738 - \theta_a)$ ,  
 $735\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900\text{ }^\circ\text{C}$ :  $c_a = 545 + 17820/(\theta_a - 731)$ ,  
 $900\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200\text{ }^\circ\text{C}$ :  $c_a = 650$ ;
- $\rho_a$  ... hustota oceli ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $\rho_a = 7850\text{ kg m}^{-3}$ ;
- $\Delta t$  ... časový interval (s),  $\Delta t = 5\text{ s}$ .

Součinitel průřezu  $A_p/V$  je spočítán jako součet délek kolem ocelové spony ku ploše ocelového průřezu s trny na obou stranách desky, viz schéma na obr. 14 (a).

Výpočet přírůstku teploty  $\Delta\theta_{a,t}$  od okamžiku, kdy hloubka zuhelnatění dosahuje trnů spony a postupuje hlouběji do průřezu, se určí pomocí výrazu pro nechráněný prvek z ČSN EN 1993-1-2 podle 4.2.5.1 [2]:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (10)$$

- kde  $k_{sh}$  ... opravný součinitel zastínění, zanedbáno,  $k_{sh} = 1$ ;
- $A_m/V$  ... součinitel průřezu nechráněných ocelových prvků ( $1/\text{m}$ );
- $A_m$  ... plocha vystaveného povrchu na jednotku délky ( $\text{m}^2/\text{m}$ );
- $h_{net}$  ... tepelná pohltivost na jednotku plochy ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- $\Delta t$  ... časový interval (s),  $\Delta t = 5\text{ s}$ .

Součinitel průřezu  $A_m/V$  je proměnný v čase v závislosti na poloze čáry zuhelnatění. Plocha vystaveného povrchu na jednotku délky je určena součtem obvodu částí trnů vystupujících na povrch do zuhelnatělé nebo odhořelé části průřezu a obdélníkem ohraničujícím zbytkový průřez, viz obr. 14 (b).

Tepelná pohltivost  $h_{net}$  je tvořena složkou tepelného toku prouděním a sáláním, z ČSN EN 1991-1-2 podle 3.1 [2]:

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \text{ (W/m}^2\text{)}, \quad (11)$$

- kde  $h_{net,c}$  ... složka konvekčního tepelného toku ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- $h_{net,r}$  ... složka radiačního tepelného toku ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

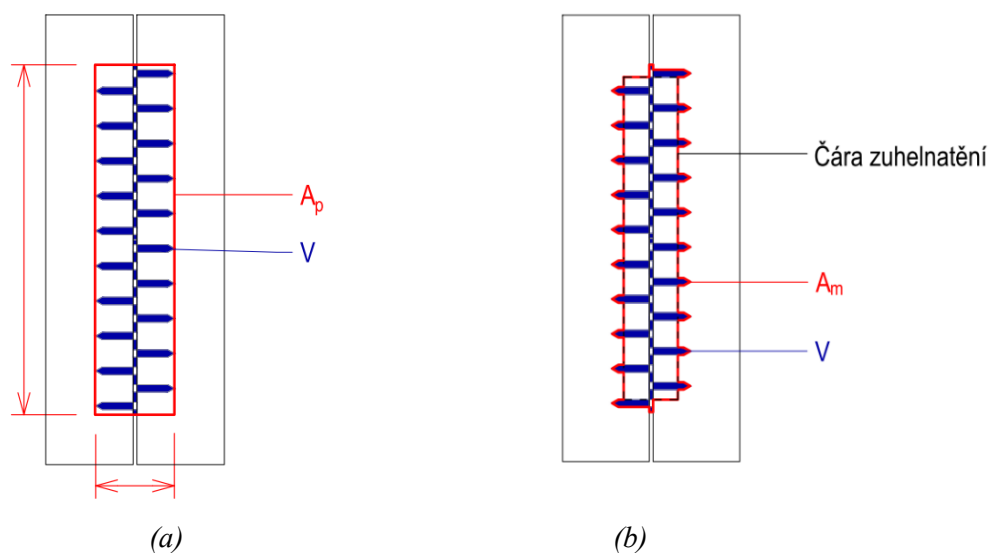
$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \text{ (W/m}^2\text{)}, \quad (12)$$

- kde  $\alpha_c$  ... součinitel přestupu tepla prouděním ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );  $\alpha_c = 25\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ;
- $\theta_g$  ... teplota plynů v blízkosti povrchu prvku ( $^\circ\text{C}$ );
- $\theta_m$  ... povrchová teplota prvku ( $^\circ\text{C}$ ).

$$h_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \text{ (W/m}^2\text{)}, \quad (13)$$

- kde  $\Phi$  ... polohový faktor,  $\Phi = 1,0$ ;

- $\varepsilon_m$  ... povrchová emisivita prvku,  $\varepsilon_m = 0,8$ ;  
 $\varepsilon_f$  ... emisivita požáru,  $\varepsilon_f = 1,0$ ;  
 $\sigma$  ... Stephan-Boltzmannova konstanta,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^4$ ;  
 $\theta_r$  ... účinná teplota sálání prostředí požáru ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\theta_r \approx \theta_g$ ;  
 $\theta_m$  ... povrchová teplota prvku ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\theta_m \approx \theta_a$ .



Obr. 14 Určení součinitele průřezu: (a)  $A_p/V$ ; (b)  $A_m/V$

Pokud je známá teplota v ocelovém prvku, lze stanovit únosnost za požáru. Návrhová tahová únosnost prvku za požáru  $N_{t,Rd,fi}$  je vypočítaná podle ČSN EN 1993-1-2 [2]:

$$N_{t,Rd,fi} = f_{y,d,fi} \cdot A_s \quad (\text{N}), \quad (14)$$

kde  $f_{y,d,fi}$  ... návrhová pevnost za požáru (MPa);

$A_s$  ... průřezová plocha desky s otvory ( $\text{mm}^2$ ).

$$f_{y,d,fi} = k_{y,\theta} \cdot f_{y,k} / \gamma_{M,fi} \quad (\text{MPa}), \quad (15)$$

kde  $k_{y,\theta}$  ... redukční součinitel pevnosti, pro tenkostěnný průřez, závislý na teplotě;

$f_{y,k}$  ... charakteristická tahová pevnost za běžné teploty (MPa);

$\gamma_{M,fi}$  ... součinitel spolehlivosti oceli za požáru,  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ .

### 5.2.3 Výpočet kritické teploty ocelového prvku

Požární odolnost ocelové spony závisí na kritické teplotě,  $\theta_{a,cr}$ , která se vypočítá pomocí stupně využití. Stupeň využití je poměr návrhového zatížení za běžné teploty a za požáru. Hodnoty zatížení nejsou určeny, zvolena je konzervativní hodnota stupně využití,  $\mu_0 = 0,9$ . Výpočet  $\theta_{a,cr}$ :

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln[1 / (0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}) - 1] + 482 = 458,4 \text{ } ^{\circ}\text{C}. \quad (16)$$

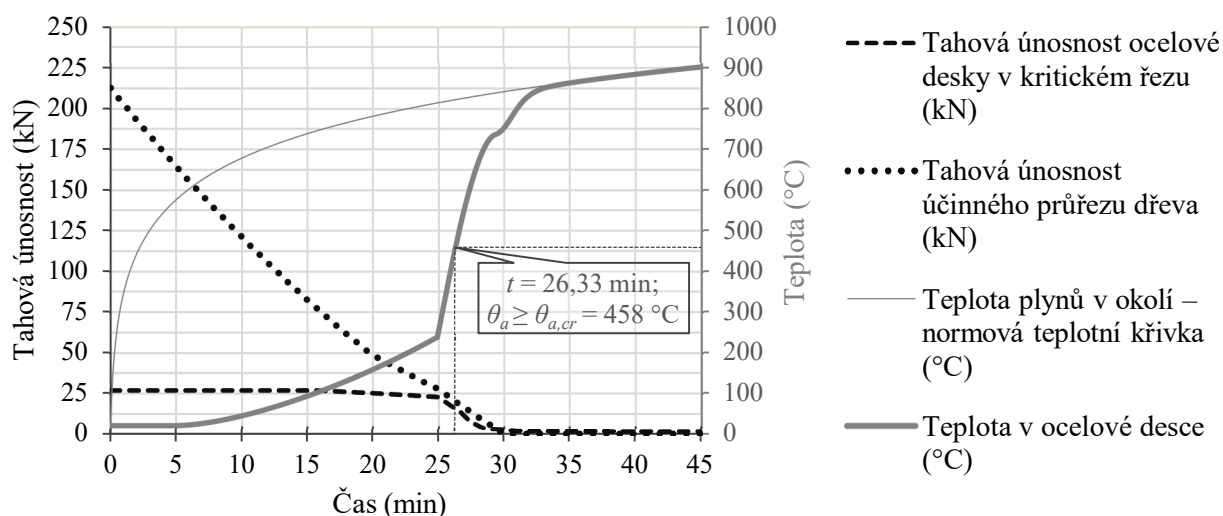
### 5.3 Výsledky analytického řešení

V čase 26,33 minut od začátku působení tepelného zatížení je překročena kritická teplota v ocelové desce. Tahová únosnost ocelové desky před dosažením její kritické teploty, v čase 26,25 minut, činí 15,86 kN, to je 59 % z únosnosti za běžné teploty. V tom samém čase je zbytková tahová únosnost dřevěných prvků 20,19 kN, hodnota odpovídá 9,5% únosnosti původního průřezu.

Shrnutí výsledků získaných přírůstkovým výpočtem je uvedeno v tab. 1. Kompletní tabulka s výsledky je v příloze 1. Na obr. 15 je v grafu vynesena normová teplotní křivka, narůstající teplota v ocelové desce a průběhy tahové únosnosti jednotlivých prvků v závislosti na čase.

Tab. 1 Souhrn výsledků analytického řešení

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahové únosnosti jednotlivých prvků			
					Dřevěné pruty		Ocelová deska	
$t$ (s)	$t$ (min)	$\theta_g$ (°C)	$d_{char}$ (mm)	$\theta_{a,t}$ (°C)	Redukovaný průřez $A_{ef}$ (mm <sup>2</sup> )	Tahová únosnost $R_{Rd,fi}$ (kN)	Redukční součinitel $k_{y,\theta}$ (-)	Tahová únosnost $N_{t,Rd,fi}$ (kN)
0	0,00	20,00	0,00	20,00	12154,50	212,70	1,000	26,88
5	0,08	96,54	0,07	20,00	12092,06	211,61	1,000	26,88
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1575	26,25	821,88	21,50	450,63	1153,50	20,19	0,590	15,86
1580	26,33	822,35	21,60	463,15	1126,34	19,71	0,576	15,48
1585	26,42	822,82	21,70	475,49	1099,26	19,24	0,561	15,08
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1800	30,00	841,80	26,00	751,88	10,50	0,18	0,099	2,66
1805	30,08	842,21	26,10	755,29	0,00	0,00	0,098	2,63



Obr. 15 Graf s výslednými hodnotami v závislosti na čase

## 6 Požární experiment

Hlavním cílem požárního experimentu je získání empirických dat pro ověření výsledků analytického řešení a pro validaci numerického modelu.

Experiment proběhl 2. 12. 2020 v Buštěhradě v požární laboratoři fireLAB ČVUT UCEEB. Proveden byl odbornými pracovníky požární laboratoře, nutno jmenovat Ing. Marka Pokorného, Ph.D., s asistencí vedoucího této práce, Ing. Lukáše Velebila, Ph.D.

### 6.1 Popis provedeného experimentu

Experiment byl koncipován pro realizaci ve zkušební peci miniFUR, která je vhodná pro středně-rozměrové zkoušky požární odolnosti. Provedena byla jedna 30minutová zkouška se zatěžováním podle nominální normové teplotní křivky.

#### 6.1.1 Popis zkušební pece

Zkušební pec miniFUR byla vyvinuta požární laboratoří ČVUT UCEEB [27]. Návrhu pece se podrobně věnoval Ing. Jiří Chládek ve své diplomové práci [28]. Pec miniFUR splňuje požadavky normy ČSN EN 1363-1: Zkoušky požární odolnosti – Část 1: Obecné požadavky [29].

Vnitřní půdorysné rozměry pece jsou 1,2 x 0,8 m, světlá výška pece je 0,8 m. Pec je z nehořlavých materiálů. Konstrukce pece je tvořena ocelovými jekly, které jsou viditelné z vnější strany. Opláštění pece je vytvořeno z cementovláknitých desek tloušťky 12,5 mm, s třídou reakce na oheň A1, kotvených do pomocných ocelových profilů. Fotografie pece je na obr. 16. [28]

Pomocí řízeného výkonu plynového hořáku a přirozené ventilace otvory je v horní části pece dosaženo požadovaného rozvoje teploty plynů. [27, 28]



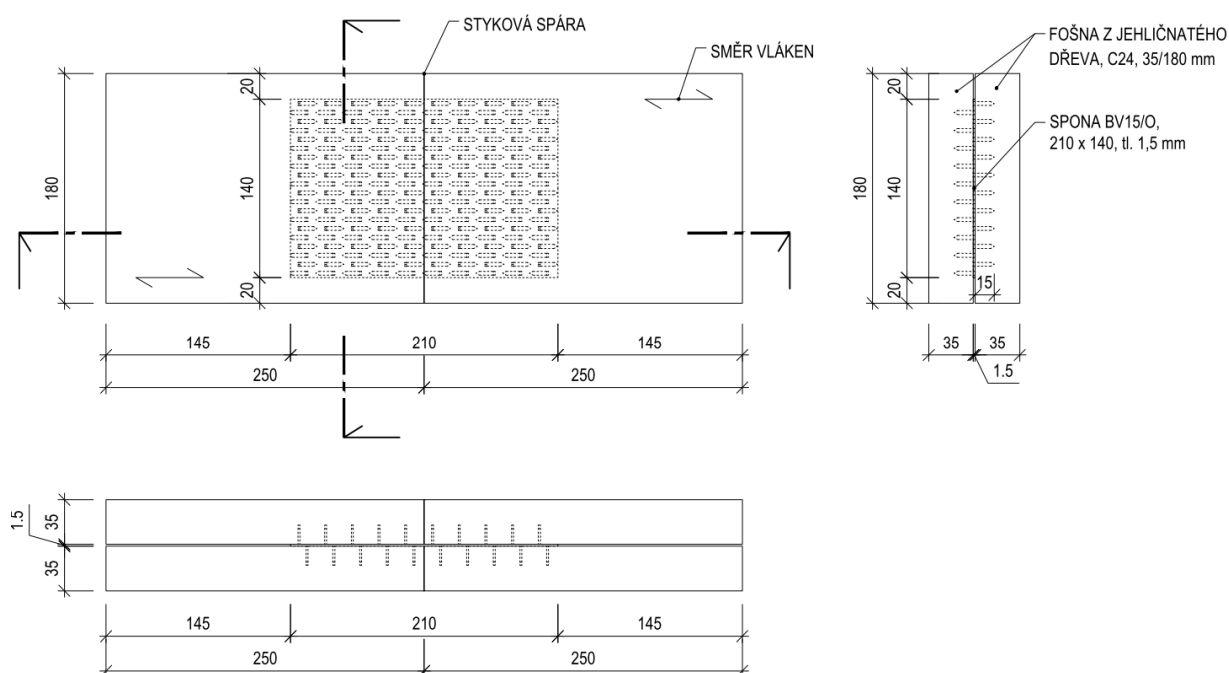
Obr. 16 Pohled na zkušební pec miniFUR během požární zkoušky. Foto Marek Pokorný



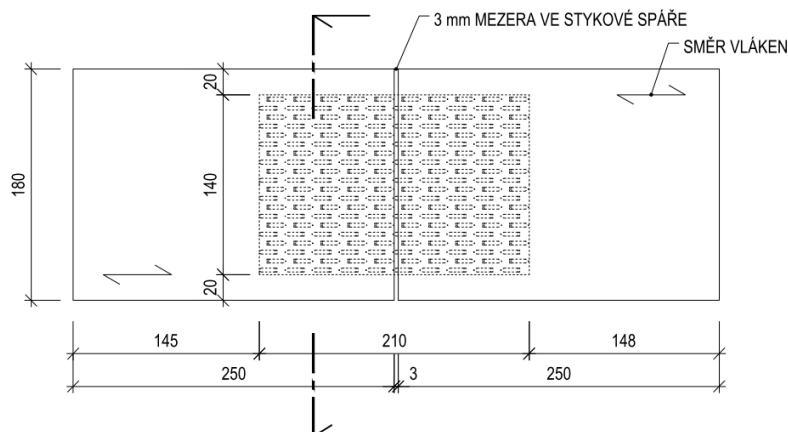
### 6.1.2 Zkušební vzorky

Pro požární zkoušku byl navržen modelový styčník, který je tvořen spojením dvou dvojic dřevěných fošen o průřezových rozměrech 35 x 180 mm, délky 250 mm, ze dřeva třídy pevnosti C24. Mezi dřevěné prvky byla zalisována oboustranná styčníková deska BV15/O šířky 140 mm, délky 210 mm. Vzorky byly navrženy ve dvou variantách lišících se mezerou ve stykové spáře. Vzorky „A“ a „C“ mají dřevěné prvky těsně u sebe, viz obr. 17, vzorky „B“ a „D“ byly navrženy s 3milimetrovou mezerou ve stykové spáře, viz obr. 18.

Zkušební vzorky byly vyrobeny ve společnosti BOVA Březnice spol. s r.o. podle předané výkresové dokumentace. Dodané vzorky jsou zobrazeny na obr. 19. Objemová hmotnost použitých dřevěných přířezů je 440 kg/m<sup>3</sup>.



Obr. 17 Vzorky „A“ a „C“, z výkresu pro zhotovení



Obr. 18 Z Vzorky „B“ a „D“, z výkresu pro zhotovení



Obr. 19 Zkušební vzorky vyrobené ve společnosti BOVA Březnice spol. s r.o. Foto Lukáš Velebil

### 6.1.3 Zatížení

Navrženo bylo tepelné zatěžování po dobu 30 minut podle normové teplotní křivky. Tepelné zatížení bylo ověřováno měřením teploty plynů v horní části pece. Požadovaného zatížení bylo dosaženo řízeným výkonem hořáku. Předpokladem pro rovnoměrné rozložení teplot u povrchu vzorků bylo jejich umístění pod stropem pece, mimo půdorys hořáku.

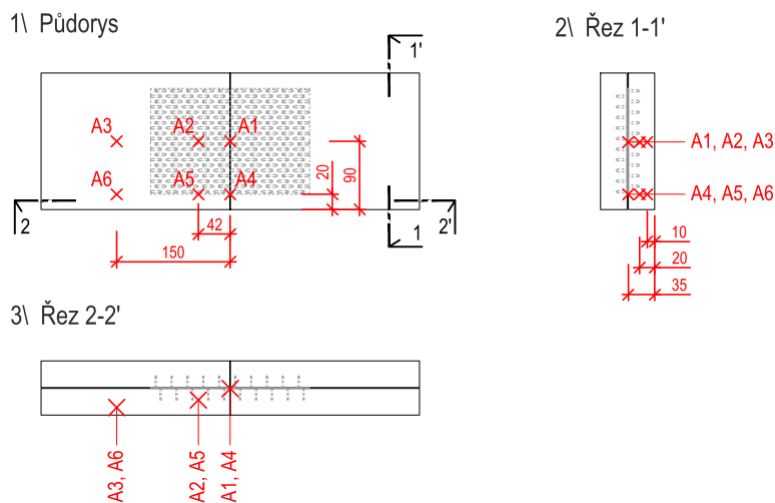
Vzorky nebyly v žádné fázi mechanicky zatěžovány.

### 6.1.4 Měření

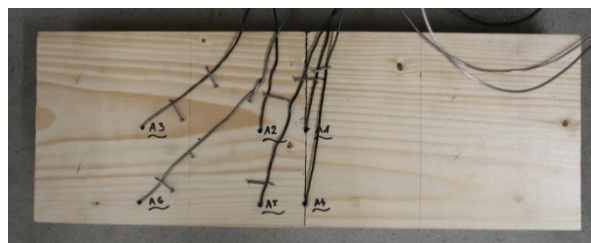
Teplota plynů v horní části pece byla měřena deskovým snímačem teploty. Tato teplota představuje teplotní zatížení na povrch vzorků. Deskový snímač teploty byl umístěn mezi vzorky „A“ a „C“. Teplota uvnitř pece byla dále měřena 8 plášťovými termočládky, které byly v peci pravidelně rozmístěny. Čtyři termočládky snímaly teplotu 100 mm pod stropem pece, další čtyři byly umístěny 200 mm nad podlahou pece.

Pro měření teploty ve vzorcích „A“ a „B“ bylo navrženo celkem 12 plášťových termočládků typu K o průměru 1,5 mm s označením MTC10-C1-2000-40. Teplota ve vzorcích „C“ a „D“ byla zaznamenávána 4 termočládky typu K o průměru 1,5 mm s označením MTC10-E0-3000-3.

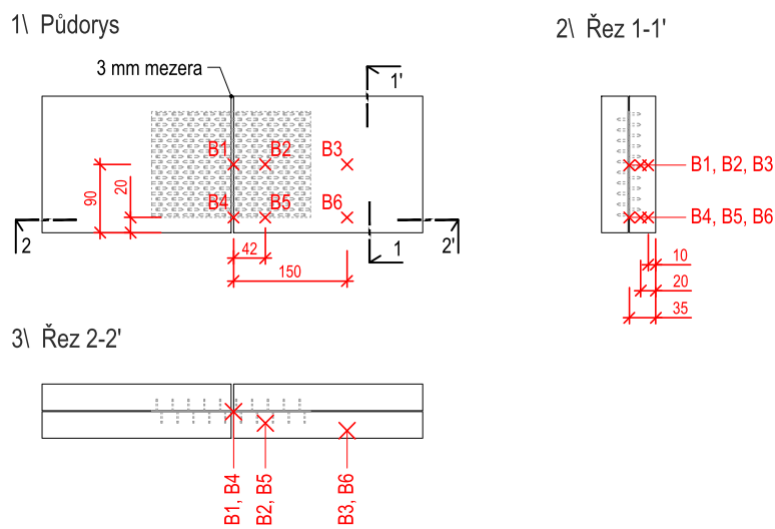
Teplota ve vzorcích „A“ a „B“ byla monitorována vždy ve stykové spáře u ocelové spony a dále ve dřevě v hloubce 15 mm od ocelové spony, kde končí její trny, a v hloubce 25 mm od ocelové spony, tj. 10 mm od povrchu dřevěného prvku vystavenému tepelnému zatížení. Takto byly teploty měřeny ve středové části průřezu a při okraji průřezu, v místě, kde končí 1,5 mm dutina hloubky 20 mm a dále pokračuje ocelový plech spony. Ve vzorcích „C“ a „D“ byla teplota sledována ve středové a okrajové části průřezu pouze u spony. Umístění termočládků ve vzorku „A“, monitorovací body A1-A6, jsou na obr. 20, pozice bodů B1-B6 ve vzorku „B“ jsou na obr. 22. Pozice měřicích bodů ve vzorku „C“ s označením C1, C2 jsou na obr. 24, vzorek „D“ a pozice termočládků D1, D2 jsou na obr. 26. Fotografie vzorků s umístěnými termočládky jsou na obr. 21, obr. 23, obr. 25 a obr. 27.



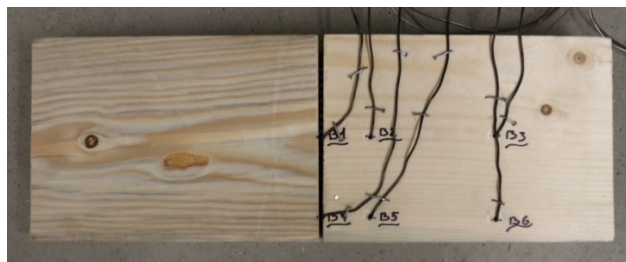
Obr. 20 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „A“



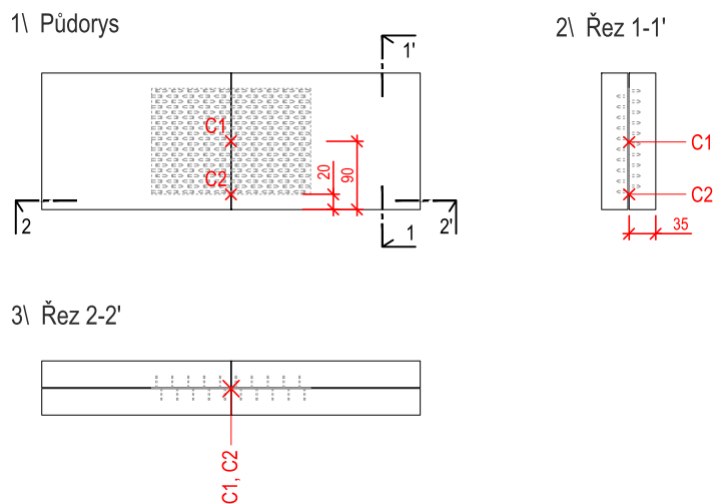
Obr. 21 Vzorek „A“ se zabudovanými termočláňky. Foto Lukáš Velebil



Obr. 22 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „B“



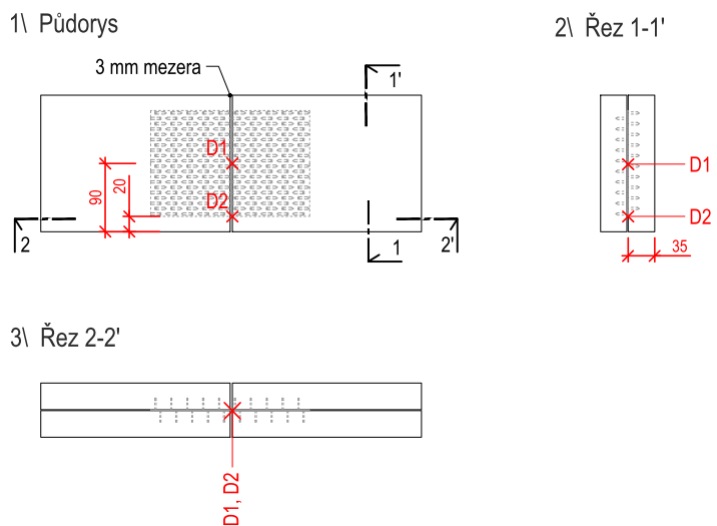
Obr. 23 Vzorek „B“ se zabudovanými termočláňky. Foto Lukáš Velebil



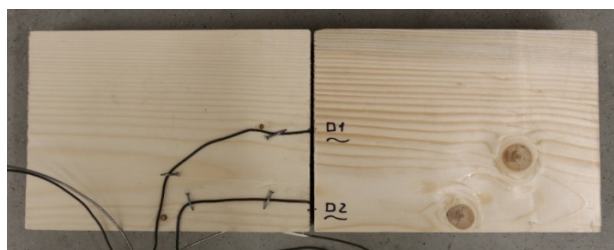
Obr. 24 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „C“



Obr. 25 Vzorek „C“ se zabudovanými termočlánky. Foto Lukáš Velebil



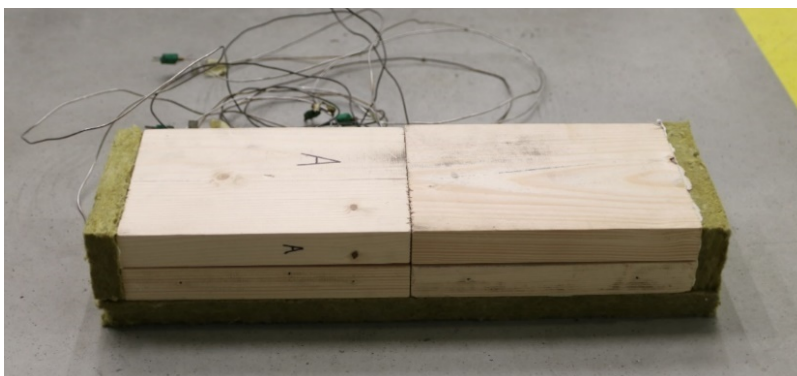
Obr. 26 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „D“



Obr. 27 Vzorek „D“ se zabudovanými termočlánky. Foto Lukáš Velebil

### 6.1.5 Příprava vzorků

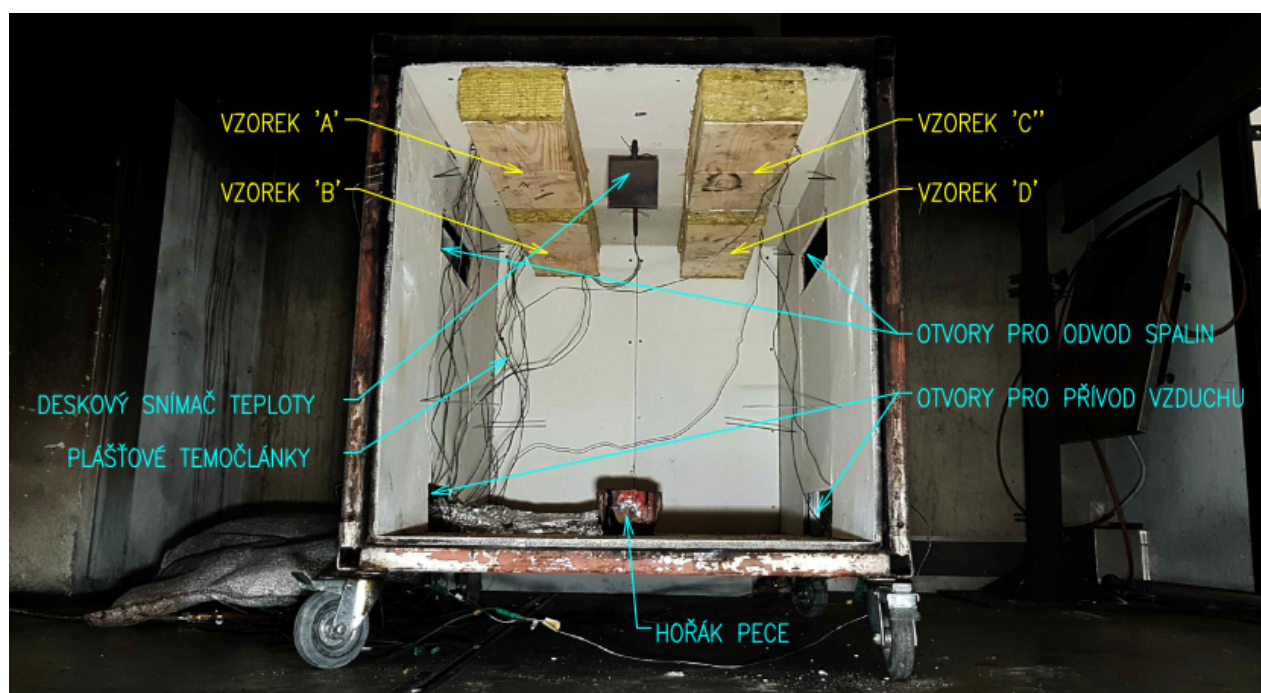
Nejdříve byly do vzorků zabudovány termočlánky podle navržených pozic monitorovacích bodů. Před umístěním do pece byly vzorky ze tří stran zaizolovány minerální izolací tloušťky 25 mm, přilepena byla k povrchu dřevěných prvků kamnářským tmelem. Tepelná izolace byla v kontaktu se stropem pece a na obou koncích dřevěných fošen, které by byly v reálné konstrukci delší. Izolací byla také zajištěna ochrana kotvení vzorků. Vzorek připravený k umístění do pece je na obr. 28.



Obr. 28 Vzorek připravený pro umístění do pece. Foto Lukáš Velebil

### 6.1.6 Umístění vzorků ve zkušební peci miniFUR

Volba pozice a orientace vzorků vyházel z požadavku rovnoměrného tepelného zatížení. Vzorky byly umístěny pod stropem pece ve vodorovné poloze, mimo půdorys hořáku. Přikotveny byly rychlořeznými šrouby přes ocelové CD profily, které vytváří pomocnou konstrukci pro opláštění stropu pece. Fotografie upevněných vzorků ve zkušební peci včetně popisu je na obr. 29.



Obr. 29 Fotografie upevněných vzorků ve zkušební peci. Doplněno popisem. Foto Marek Pokorný

## 6.2 Výsledky experimentu a diskuze

Výstupní data z experimentu jsou zpracována v tabulkovém procesoru Microsoft Excel® [26].

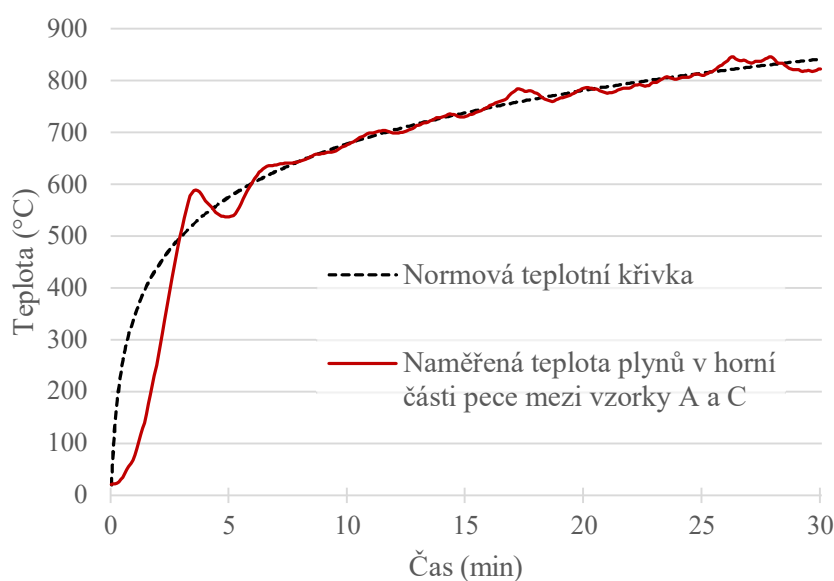
### 6.2.1 Teplota v peci

Teplota v peci, která vypovídá o tepelném zatížení vzorků, byla měřena deskovým snímačem teploty v horní části pece mezi vzorky „A“ a „C“. Na obr. 30 je porovnání této naměřené teploty plynů s normovou teplotní křivkou.

Výkon hořáku byl zpočátku řízen automaticky softwarem. Počáteční nárůst teploty plynů měl jiný charakter, než má normová teplotní křivka. Přibližně před 3. minutou zkoušky bylo dosaženo shodné teploty s nominální křivkou a strmý nárůst teploty pokračoval dál. V momentě, kdy byl rozpoznán zrychlený nárůst teploty uvolňováním tepla z hoření dřevěných prvků, byl příspěvek teploty vyvážen snížením výkonu hořáku. Od 3. do 30. minuty požární zkoušky byl výkon hořáku ručně regulován podle zaznamenávaných hodnot na deskovém snímači tak, aby výsledná teplota v horní části pece odpovídala rozvoji teplot podle normové teplotní křivky.

Tepelné zatížení podle normové křivky má simulovat požár po celkovém vzplanutí a musí být dodržována po celou dobu trvání zkoušky dle ČSN EN 1991-1-2 [25]. Tolerance do 5. minuty požární zkoušky nejsou v ČSN EN 1363-1 [29] stanoveny, odchylky se v tomto čase nehodnotí. Vychýlení od normové křivky mezi 5. a 6. minutou je zanedbatelné. Od 6. minuty odpovídá naměřená teplota plynů v horní části pece mezi vzorky „A“ a „C“ nominální normové teplotní křivce. Dosaženo toho bylo manuálním usměrňováním výkonu hořáku. Počáteční odchýlení od normové teplotní křivky nebude mít vliv na výsledky zkoušky.

Během zkoušky bylo dosaženo tepelného zatěžování, které odpovídá normové teplotní křivce.



Obr. 30 Porovnání normové teplotní křivky a naměřené teploty plynů v horní části pece



## 6.2.2 Teploty ve vzorku „A“

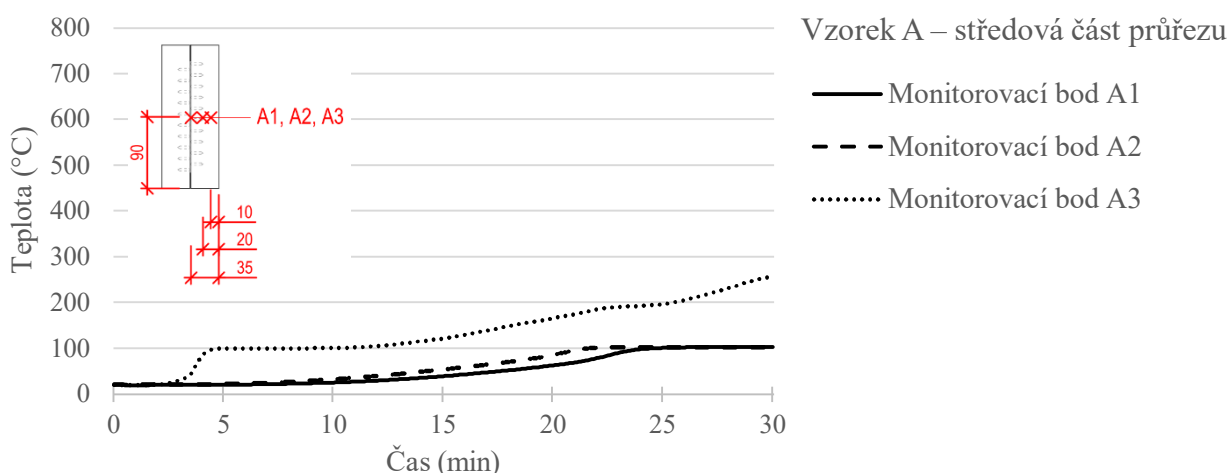
Ve vzorku „A“ byla teplota zaznamenávána na šesti pozicích, v hloubkách 10 mm, 20 mm a 35 mm od ohřivaného povrchu.

Monitorovací body A1, A2 a A3 byly umístěny v polovině delší strany průřezu. Bod A1 u ocelové spony byl ve stykové spáře, ostatní body byly ve dřevě mimo stykovou spáru. Naměřené hodnoty v těchto měřicích místech reprezentují teploty pro středovou část průřezu. Na obr. 31 je graf se zaznamenanými teplotami, v levém horním rohu grafu je schéma s pozicemi termočlánků.

Z grafu na obr. 31 je patrné, že docházelo k velmi pozvolnému nárůstu teplot ve vzorku. V místě monitorovacího bodu A3, proběhlo vysušení dřeva rychle. Poté pokračuje vodorovná část křivky při 100 °C, která značí odpařování vody z dřevní hmoty, v tomto měřicím bodě trval asi 10 minut. Od 13. minuty následuje pozvolný nárůst teploty. Hlouběji v průřezu docházelo k pomalému vysoušení dřeva, značí to nárůst teplot v termočláncích A1 a A2, kde bylo teploty 100 °C dosaženo kolem 23. minuty. Do konce zkoušky zůstává teplota v těchto bodech konstantní.

Rychlost zuhelnatění je určována z času dosažení teploty 300 °C v příslušné hloubce průřezu. Teplota 300 °C odpovídá čáře zuhelnatění. V termočlánci A3, který je nejbližší ohřivanému povrchu, nebylo během 30minutového zatěžování podle normové teplotní křivky dosaženo teploty 300 °C. Pokud by tendence růstu teploty v závěru měření zaznamenaná termočláncem A3 pokračovala, lze odhadem stanovit dobu 32,5 minuty jako dobu zuhelnatění do hloubky 10 mm. Na základě této úvahy je vypočítána rychlost zuhelnatění jako 0,31 mm/min (10 mm za 32,5 min). Podle tabulky 3.1 z ČSN EN 1995-1-2 [1] se tato rychlost zuhelnatění jeví jako velmi nepravděpodobná pro jakékoli dřevo.

Odpařovaná vlhkost ve středové části průřezu se z velké části pravděpodobně přesouvala dále do průřezu a způsobovala zdlouhavé vysoušení dřeva hlouběji v průřezu a pomalý postup zuhelnatění. Vliv na to mohla mít vodorovná pozice vzorků a ocelová spona, která byla bariérou pro odpařování vody ven z průřezu přes dutinu mezi dřevěnými prvky.



Obr. 31 Graf s naměřenými teplotami ve středové části průřezu vzorku „A“

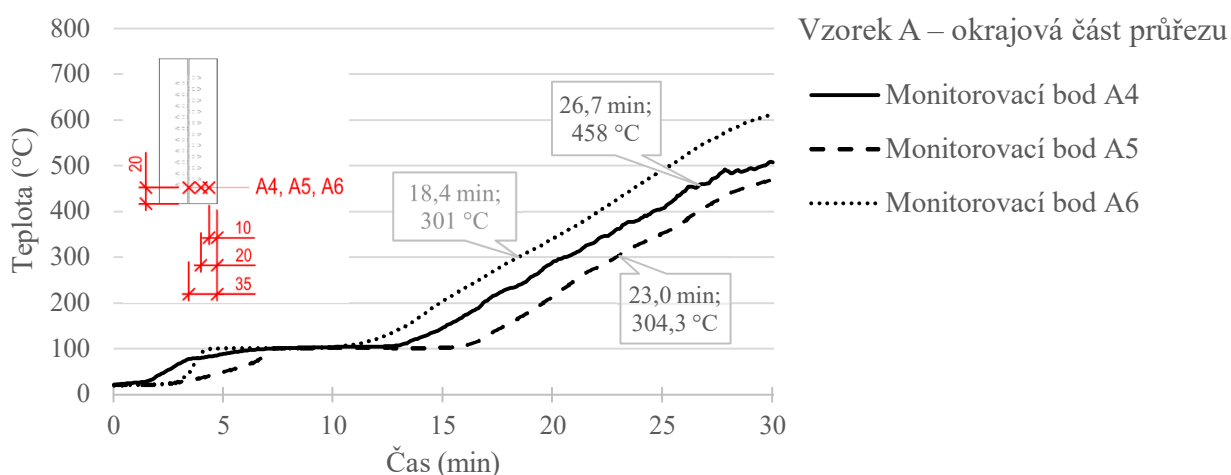
Termočlánky na pozicích A4, A5 a A6 byly umístěné 20 mm od okraje kratší strany průřezu, v hloubkách 10 mm, 20 mm a 35 mm od ohřívaného povrchu. Naměřené hodnoty v těchto monitorovacích bodech reprezentují teploty pro okrajovou část průřezu. Bod A4 u ocelové spony byl ve stykové spáře, ostatní body byly ve dřevě mimo stykovou spáru. Na obr. 32 je graf se zaznamenanými teplotami, v levém horním rohu grafu je schéma s pozicemi termočlánků.

Naměřené průběhy teplot v této části prvku si vzájemně odpovídají. Rozdílný je počáteční nárůst teploty u ocelové desky, v bodě A4, oproti bodům ve dřevě, A5 a A6.

V okrajové části průřezu došlo k rychlejšímu vysoušení dřeva, oproti středové části průřezu. Značí to počáteční nárůsty teplot na všech termočláncích. V monitorovacím bodě A6, který je 10 mm od zahřívaného povrchu, je doba odpařování vody při 100 °C zaznamenaná přibližně od 4. do 11. minuty. Je zřejmé, že vlhkost se z rohové oblasti mohla odpařovat snadněji několika cestami.

Přibližně v čase 18,4 minuty je v bodě A6 dosaženo teploty 300 °C, teploty značící počátek zuhelnatění. Do hloubky 10 mm tedy postupuje zuhelnatění rychlostí 0,54 mm/min. V monitorovací bodě A5, o 10 mm hlouběji, je teploty 300 °C dosaženo kolem 23. minuty. Pokud je rychlost zuhelnatění vypočítaná podle teplot v bodě A5, který je vzdálen od všech povrchů zatěžovaných teplotou 20 mm, rychlost zuhelnatění je rovna 1,09 mm/min. Ovšem jedná se o rohovou část průřezu, kdy dochází k vedení tepla z vícero stran. Průměrná rychlost zuhelnatění stanovená podle předešlých vypočítaných hodnot je 0,82 mm/min.

V čase 26,7 minuty byla u ocelové desky, pozice A4, naměřena teplota 458 °C, která je výpočtem stanovena jako kritická teplota ocelové desky. Čas dosažení této teploty je pravděpodobně ovlivněn 1,5mm dutinou mezi dřevěnými prvky.



Obr. 32 Graf s naměřenými teplotami v okrajové části průřezu vzorku „A“



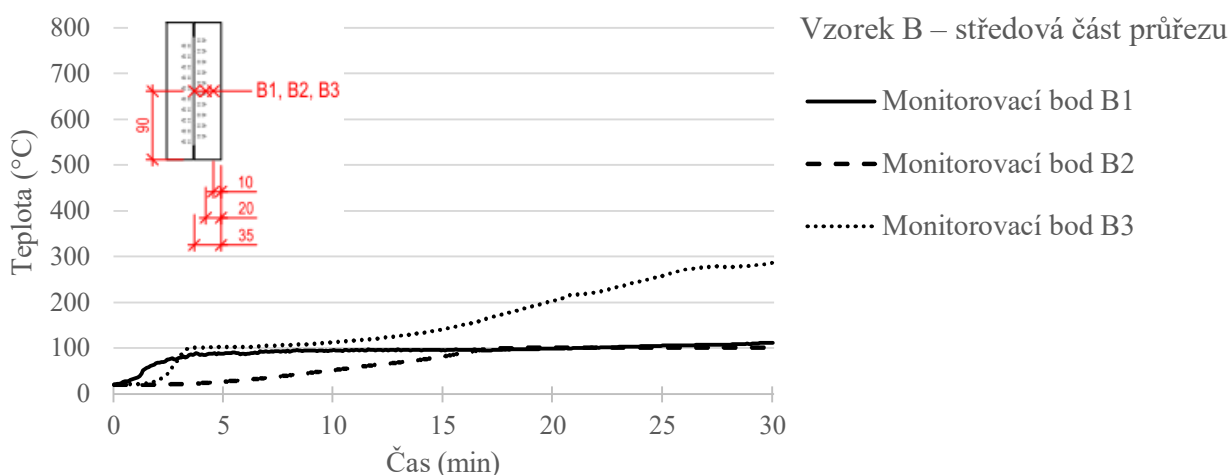
### 6.2.3 Teploty ve vzorku „B“

Ve vzorku „B“ byla teplota zaznamenávána v šesti místech, tři byly ve středové části průřezu a další tři v okrajové části. Teploty byly měřeny v hloubkách 10 mm, 20 mm a 35 mm od ohřívaného povrchu. Vzorek „B“ má ve stykové spáře 3 mm mezeru mezi dřevěnými prvky.

Monitorovací body B1, B2 a B3 byly umístěny v polovině delší strany průřezu. Bod B1 u ocelové spony byl ve stykové spáře, ostatní body byly ve dřevě mimo stykovou spáru. Naměřené hodnoty v těchto měřicích místech představují teplotní pole středové části průřezu. Na obr. 33 je graf se zaznamenanými teplotami a v levém horním rohu grafu je schéma s pozicemi termočlánků.

Vývoj teplot je stejně jako u vzorku „A“ pozvolný, ale viditelný je rozdíl průběhu teploty u ocelové spony. Pravděpodobně vlivem 3mm mezery ve stykové spáře dochází k rychlejšímu ohřátí bodu u ocelového prvku. Teplotu si následně drží po celou dobu zkoušky kolem 100 °C, to může být způsobeno kondenzováním odpařované vlhkosti ze dřeva na ocelové sponě.

V nejbližším bodě od ocelové desky, B3, který je 10 mm od povrchu, nebyla zaznamenána teplota 300 °C, která je uvažována jako počátek zuhelnatění dřevěných prvků. Hloubka zuhelnatění tedy nemůže být zjištěna podle detekovaných teplot.



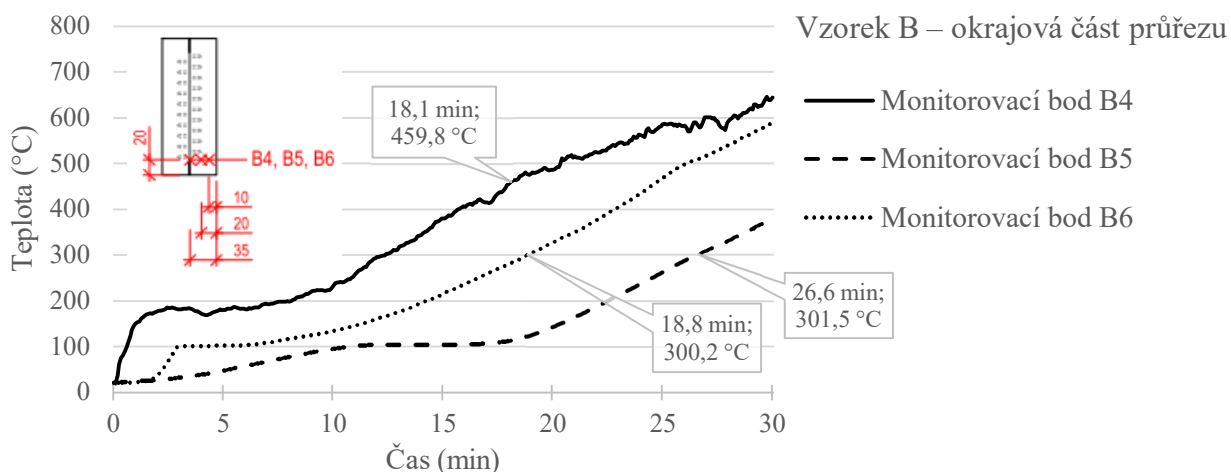
Obr. 33 Graf s naměřenými teplotami ve středové části průřezu vzorku „B“

Termočlánky na pozicích B4, B5 a B6 byly umístěny 20 mm od okraje kratší strany průřezu, v hloubkách 10 mm, 20 mm a 35 mm od ohřívaného povrchu. Bod B4 u ocelové spony byl ve stykové spáře, která má 3 mm mezeru, ostatní body byly ve dřevě mimo stykovou spáru. Naměřené hodnoty v těchto monitorovacích bodech vypovídají o rozložení teplot v okrajové části průřezu. Na obr. 34 je graf se zaznamenanými teplotami a v levém horním rohu grafu je schéma s pozicemi termočlánků.

Průběh teplot ve dřevě, zjištěn podle monitorovacích bodů B5 a B6, byl obdobný jako v případě vzorku „A“. Teplota ve stykové spáře u ocelové spony měla průběh odlišný, způsobeno je to 3 mm mezerou ve stykové spáře.

Rychlost zuhelnatění do bodu B5 je 0,53 mm/min. Zuhelnatění mezi body B5 a B6 postupuje rychlostí 1,3 mm/min. Vypočtena je podle času dosažení teploty 300 °C v těchto bodech a jejich rozdílem, to je 7,8 min, kterým je vydělena vzdálenost mezi těmito body, délka 10 mm.

Kritická teplota na ocelové sponě byla dosažena přibližně v 18. minutě od počátku požární zkoušky. U vzorku „A“ této teploty bylo dosaženo později. 3mm mezera ve stykové spáře má vliv na růst teploty v ocelové desce.

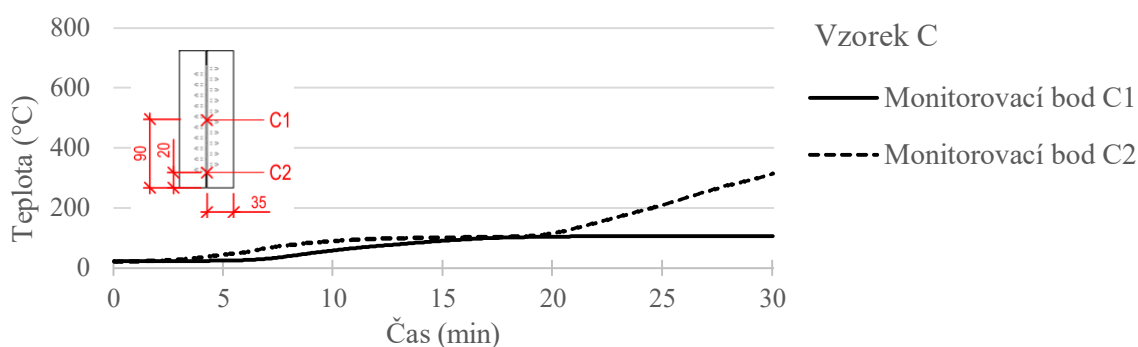


Obr. 34 Graf s naměřenými teplotami v okrajové části průřezu vzorku „B“

#### 6.2.4 Teploty u ocelové spony ve vzorku „C“

Teplota ve vzorku „C“ byla monitorována dvěma termočládky u ocelové spony ve stykové spáře. Dřevěné prvky vzorku „C“ k sobě těsně doléhají ve stykové spáře. Monitorovací bod C1 byl umístěný ve středu průřezu. Bod C2 byl 20 mm od okraje kratší strany průřezu. Naměřené hodnoty pro pozice termočládků C1 a C2 jsou na obr. 35.

Nárůst teplot byl ve vzorku „C“ pozvolnější, než tomu bylo u vzorku „A“. V žádné části průřezu nebyla naměřena hodnota kritické teploty ocelové desky.

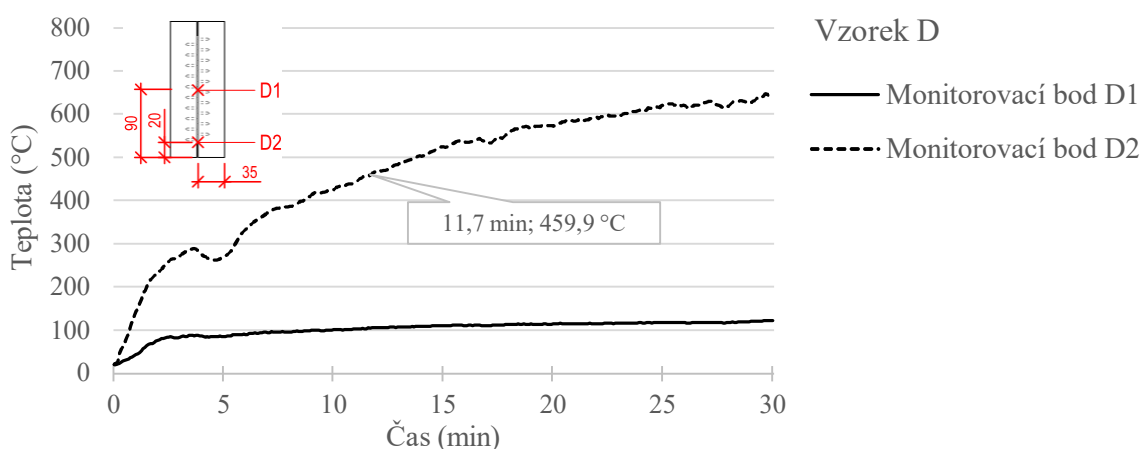


Obr. 35 Graf s naměřenými teplotami ve vzorku „C“

### 6.2.5 Teploty u ocelové spony ve vzorku „D“

Teplota ve vzorku „D“ byla monitorována dvěma termočlánky u ocelové spony ve stykové spáře. Vzorek „D“ má 3 mm mezeru ve stykové spáře. Monitorovací bod D1 byl umístěn ve středu průřezu. Bod D2 byl 20 mm od okraje kratší strany průřezu. Naměřené teploty v bodech D1 a D2 jsou na obr. 36.

V bodě D1 se teplota po počátečním nárůstu na 100 °C příliš nezvyšovala. Nepatrný nárůst teploty nad 100 °C je způsoben celkovým oteplováním spony, i přes kondenzovanou vlhkost na jejím povrchu, která je příčinou teplot kolem 100 °C. V čase 11,7 minut překročila naměřená teplota u spony v bodě D2 kritickou teplotu.



Obr. 36 Graf s naměřenými teplotami ve vzorku „D“

### 6.2.6 Vzorky po provedeném experimentu

Během požárního experimentu nedošlo k selhání vzorků, z pece byly vyjmuty vcelku. Na obr. 37 (a) je vzorek „A“ po skončení zkoušky, viditelná je značná hloubka zuhelnatění dřeva i přes detekované nízké teploty ve středu průřezu. Na obr. 37 (b) je vzorek s 3mm mezerou ve stykové spáře, vliv mezery je patrný i na hloubce odhořelé vrstvy dřeva po stranách průřezu.



(a)



(b)

Obr. 37 Vzorky po zkoušce: (a) varianta vzorku bez mezery ve stykové spáře, (b) varianta vzorku s 3 mm mezerou ve stykové spáře. Foto Lukáš Velebil

### 6.2.7 Hloubka zuhelnatění

Z obr. 38 lze vizuálně určit hloubku zuhelnatění vzorku „A“ v místě stykové spáry. Dřevo zbytkového průřezu má hnědou barvu, tato barva značí pyrolyzu dřevní hmoty, ke které dochází při teplotách 200-290 °C [10]. Delší rozměr zbytkového průřezu je 120 mm. Hloubka zuhelnatění ve stykové spáře ve směru od kratšího okraje průřezu je 30 mm. Vypočítaná rychlost zuhelnatění pro 30minutové požární zatížení je potom rovna 1,0 mm/min. Hloubka zuhelnatění ve směru trnů ocelové desky je ve stykové spáře 20 mm, rychlost zuhelnatění v tomto směru je 0,67 mm/min.



Obr. 38 Vzorek „A“ s vyznačeným zbytkovým průřezem. Foto Lukáš Velebil

## 6.3 Vyhodnocení experimentu

Provedena byla požární zkouška trvajících 30 minut ve středně-rozměrové zkušební peci. Rozvoj tepelného zatížení odpovídal nominální normové teplotní křivce.

Z naměřených teplot nelze s jistotou určit jednotnou rychlost zuhelnatění dřevěných prvků nebo čas dosažení kritické teploty v ocelovém prvku. Ve středové části průřezu byly zaznamenány překvapivě nízké teploty ve všech měřících bodech, a to i ve 30. minutě. K pomalejšímu nárůstu teploty ve dřevě docházelo pravděpodobně z důvodu odpařování vlhkosti převážně do hloubky průřezu, směrem vzhůru k ocelové desce, na které vlhkost následně kondenzovala.

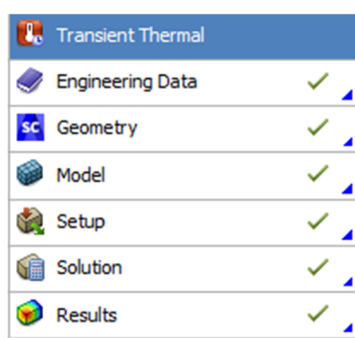
Získána byla experimentální data pro vyhodnocení výsledků dosažených v ostatních částech práce. Vyhodnocení je provedeno v kapitole 8. V příloze 2 je výběr z fotodokumentace experimentu. Fotografie pořídili Ing. Marek Pokorný, Ph.D. a Ing. Lukáš Velebil, Ph.D.

## 7 Numerická simulace

Numerická simulace je provedena v programu ANSYS® Academic Student, verze 2020 R2, v grafickém prostředí Workbench (dále jen ANSYS Workbench) [30]. Numerické simulace v softwaru ANSYS probíhají metodou konečných prvků.

Cílem této části je modelace teplotního pole proměnného v čase. K tomu je využita jedna z fyzikálních analýz, kterou ANSYS Workbench nabízí, a tou je teplotní analýza v modulu Transient Thermal.

Proces tvorby numerického modelu se skládá ze tří základních fází. První fází je tzv. preprocessing, ve které se vytváří geometrie modelovaných prvků, k nim se přiřazují materiály s nadefinovanými vlastnostmi. V první fázi se také vytváří výpočetní síť, na které závisí rychlost a přesnost simulace metodou konečných prvků. Dále se určí okrajové podmínky, zatížení a další volby řešení problému. Ve druhé fázi, kterou je tzv. solver – řešič, může být spuštěn samotný výpočet. Posledním krokem je tzv. postprocessing, zobrazení výsledků. Na závěr probíhá vlastní vyhodnocení výsledků a jejich interpretace. Jednotlivé kroky nutné pro vyřešení teplotní analýzy v programu ANSYS Workbench jsou na obr. 39.



Obr. 39 Strom teplotní analýzy proměnné v čase v programu ANSYS Workbench [30]

### 7.1 Vstupní data

#### 7.1.1 Materiály

Nejdříve jsou definovány materiály a jejich fyzikální vlastnosti. Z knihovny materiálů jsou k projektu přiřazeny materiály ocel a dřevo, jejichž výchozí parametry jsou upraveny. Hodnoty proměnných vlastností v závislosti na teplotě jsou určeny podle ČSN EN 1995-1-2 [1] a ČSN EN 1993-1-2 [2].



### 7.1.2 Dřevo a jeho fyzikální vlastnosti pro tepelnou analýzu

Použité řezivo s počáteční vlhkostí 12 % má hustotu  $440 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Hustota dřeva je proměnná s jeho vlhkostí. Norma ČSN EN 1995-1-2 [1] stanoví poměr hustoty pro dřevo jehličnatých dřevin při počáteční vlhkosti 12% v závislosti na teplotě. Hustota v závislosti na teplotě je do programu zadána podle tab. 2. Dále je stanovena tepelná vodivost v závislosti na teplotě, viz tab. 3. Hodnoty měrné tepelné kapacity ve vztahu k teplotě jsou ke dřevu přiřazeny podle tab. 4.

Tab. 2 Závislost hustoty dřeva na teplotě a vlhkosti, určeno podle tabulky B.3 ČSN EN 1995-1-2 [1]

Teplota (°C)	Poměr hustoty k vysušenému dřevu	Hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
20	$1 + \omega = 1,12$	440
99	$1 + \omega = 1,12$	440
100	1,00	393
200	1,00	393
250	0,93	365
300	0,76	299
350	0,52	204
400	0,38	149
600	0,28	110
800	0,26	102
1200	0	0

Tab. 3 Závislost tepelné vodivosti dřeva na teplotě, podle tabulky B.1 ČSN EN 1995-1-2 [1]

Teplota (°C)	Tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

Tab. 4 Měrná tepelná kapacita dřeva podle ČSN EN 1995-1-2 [1]

Teplota (°C)	Měrná tepelná kapacita (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
20	1530
99	1770
100	13600
119	13500
120	2120
200	2000
250	1620
300	710
350	850
400	1000
600	1400
800	1650
1200	1650

### 7.1.3 Ocel a její fyzikální vlastnosti pro tepelnou analýzu

Ocelová spona je vyrobena z konstrukční oceli, její fyzikální parametry v závislosti na teplotě jsou upraveny podle ČSN EN 1993-1-2 [2]. V knihovně materiálů jsou upraveny hodnoty závislé na teplotě, které mají vliv na výpočet. Tepelná vodivost v závislosti na teplotě je určena tab. 5.

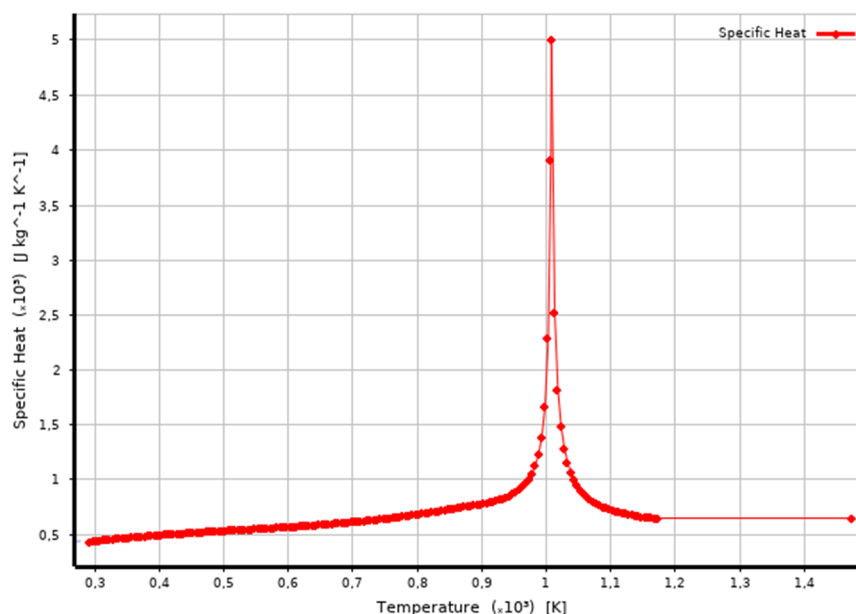
Tab. 5 Tepelná vodivost oceli v závislosti na teplotě podle čl. 3.4.1.3 ČSN EN 1993-1-2 [2]

Teplota (°C)	Tepelná vodivost (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
20	53,33
799	27,39
20	53,33
799	27,39

Měrná tepelná kapacita je určena vztahy v čl. 3.4.1.2 ČSN EN 1993-1-2 [2], viz tab. 6. Výsledný graf měrné tepelné kapacity oceli v závislosti na její teplotě je zobrazen na obr. 40.

Tab. 6 Vztahy pro určení měrné tepelné kapacity oceli

Interval pro teplotu oceli $\theta_a$	Měrná tepelná kapacita $c_a$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
$20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$	$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$
$600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$	$c_a = 666 + 13002 / (738 - \theta_a)$
$735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$	$c_a = 545 + 17820 / (\theta_a - 731)$
$900\text{ °C} \leq \theta_a < 1200\text{ °C}$	$c_a = 650$



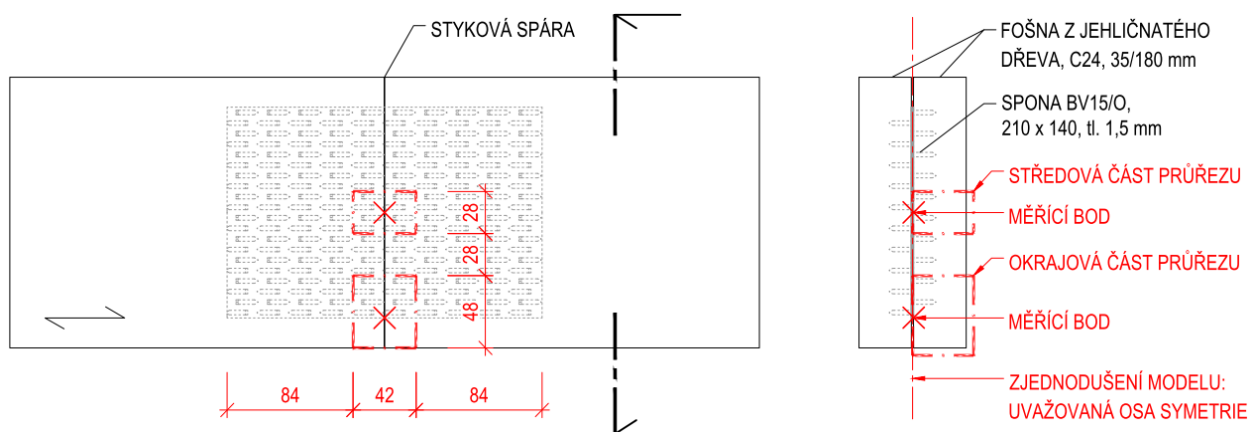
Obr. 40 Graf měrné tepelné kapacity oceli v závislosti na teplotě po úpravě v knihovně materiálů

## 7.2 Tvorba modelu

### 7.2.1 Geometrie

Geometrie je vytvořena v prostředí ANSYS SpaceClaim. Samostatně je zpracován 3D model pro okrajovou část a středovou část průřezu. Důvodem rozdělení na části je omezená velikost modelu ve studentské licenci programu ANSYS Workbench [30]. Volba modelovaných částí je zvolena tak, aby výsledky byly reprezentativní pro řešený problém a byla možnost je porovnat s výsledky experimentu nebo analytického výpočtu.

Osa průřezu procházející ocelovou deskou je zjednodušeně uvažována jako osa symetrie. Jednotlivé části průřezů jsou vybrány podle pozic termočlánků ve vzorcích, na kterých byla provedena požární zkouška. Vyznačení modelovaných částí je na obr. 41.



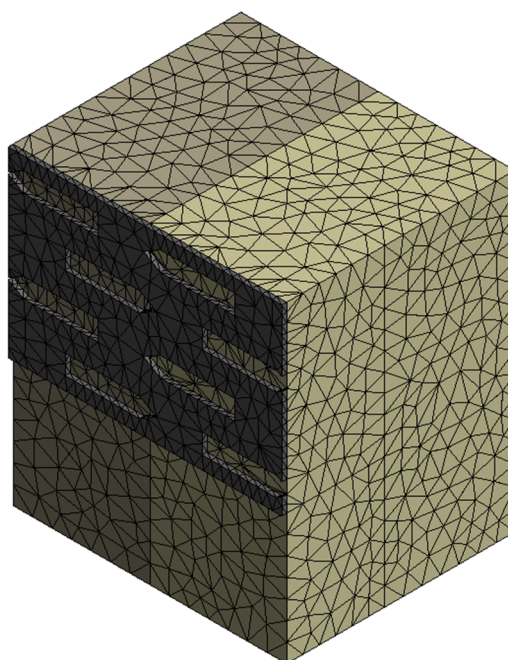
Obr. 41 Vyznačení modelovaných částí průřezu



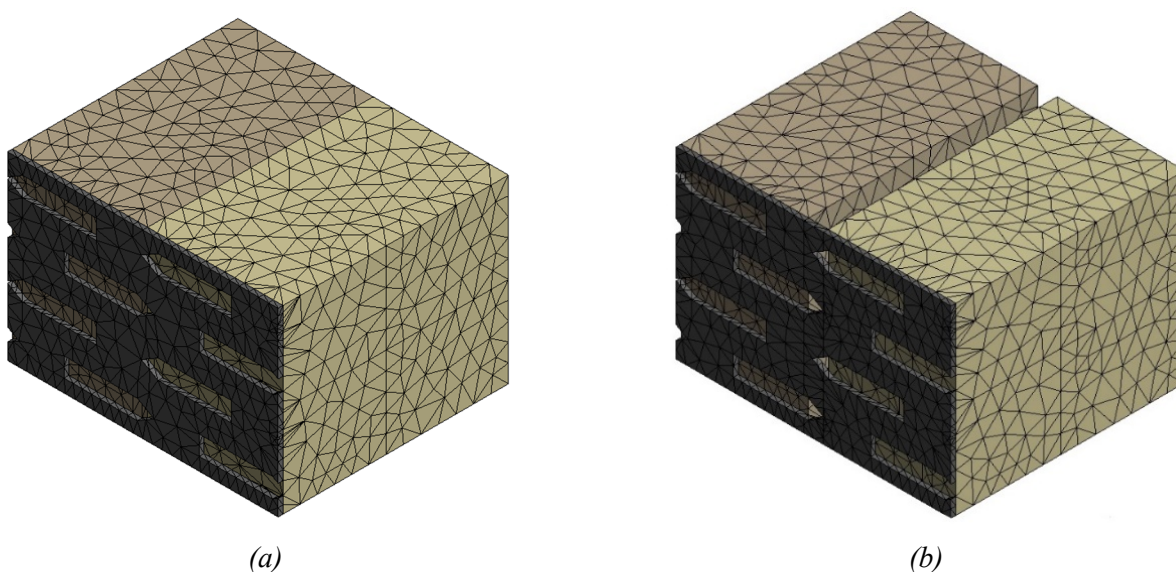
### 7.2.2 Výpočetní síť

Tvorba sítě je zpracována v řešiči analýzy, kterým je ANSYS Mechanical, součást programu ANSYS Workbench [30]. Vymodelovaný 3D prvek je rozdělen pomocí sítě na menší prostorové elementy.

Zvolen je typ sítě s tetrahedrony, jednotlivé prvky tvořící síť jsou čtyřstěny. V dřevěných prvcích je síť vygenerována pomocí elementů o velikosti 3 mm, síť v ocelové desce je utvořena elementy s velikostí 1,5 mm. Nakonec je využita možnost automatického propojení uzlů sítě kontaktních ploch těles. Vymodelované části s vygenerovanou sítí jsou na obr. 42 a obr. 43.



Obr. 42 Model okrajové části průřezu s vytvořenou výpočetní sítí



Obr. 43 Model středové části průřezu s vygenerovanou výpočetní sítí: (a) varianta spoje bez mezery ve stykové spáře; (b) spoj s 3mm mezerou ve stykové spáře

## 7.3 Řešení analýzy

### 7.3.1 Zatěžovací fáze a časový krok

Definovány jsou dvě zatěžovací fáze (volně přeloženo z „load step“). Trvání první fáze je 5 sekund, druhá zatěžovací fáze končí v čase 1800 sekund. V každé fázi jsou následně definovány časové kroky výpočtu.

Velikost časového kroku v první zatěžovací fázi je 5 sekund. V intervalu druhé zatěžovací fáze, od 5 sekund do 1800 sekund, je zadán proměnný časový krok. Velikost počátečního časového kroku je 0,5 sekund. Dále je zvolena minimální délka časového kroku 0,005 sekund, a maximální délka časového kroku 0,5 sekund. Aktivní je možnost automatického časového kroku, při které program vyhodnocuje aktuální potřebnou délku kroku pro vyřešení výpočtu.

### 7.3.2 Zatížení a okrajové podmínky

Definovány jsou okrajové podmínky prostředí a teplotní zatížení modelovaných prvků. Při určení tepelného zatížení je dodržena ČSN EN 1991-1-2 [25]. Zadána je výchozí teplota okolí 20 °C. Na plochách symetrie a v ořezových plochách je uvažován nulový teplotní tok.

U povrchů vystavených účinkům požáru dochází k přenosu tepla konvekcí (prouděním) a radiací (sáláním). Obě složky závisí na teplotě plynů v okolí prvku. Teplota plynů je zadána podle naměřených hodnot deskovým snímačem během experimentu. Pro konvekční složku tepelného toku je zadán součinitel přestupu tepla prouděním. Jeho hodnota je 25 W/m<sup>2</sup>K podle [25] pro normovou teplotní křivku, které odpovídalo zatížení při zkoušce. Při zadávání radiční složky tepelného toku je třeba stanovit hodnotu povrchové emisivity prvku, uvažována je hodnota 0,8 podle [25].

Zatěžované povrchy jsou u okrajové části průřezu ze dvou stran a u středové z jedné strany. V případě spoje s mezerou ve stykové spáře je plocha ocelové desky v dutině v šířce 3 mm zatěžována sálavou složkou tepelného toku. Nepředpokládá, že by v dutině na povrchy působila konvekční složka zatížení.

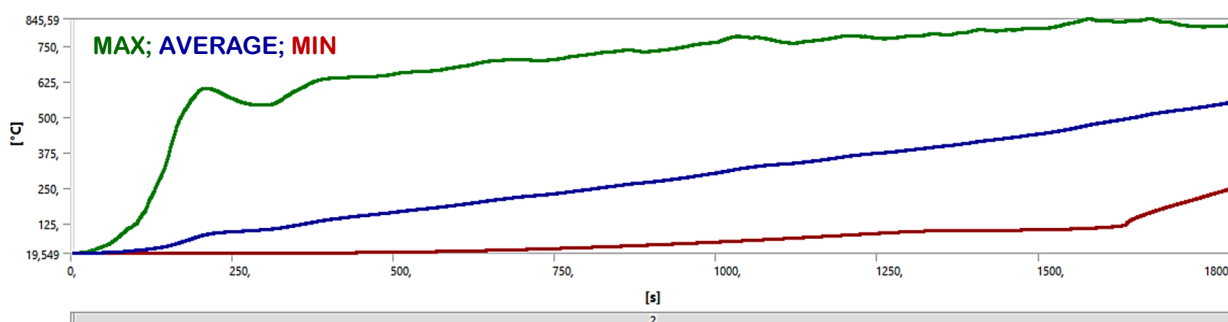
## 7.4 Výsledky numerické simulace

Zobrazení výsledků probíhá v grafickém prostředí programu ANSYS Workbench [30] ve 3D modelech, na jednorozměrných obrázcích nebo v generovaných animacích. Součástí jsou grafy zobrazující průběh výsledných teplot i teplotního zatížení v závislosti na čase. Teplotní pole je znázorněné škálou barev. Výstupem jsou také tabulková data se všemi vstupy i výsledky. Ta byla následně zpracována v tabulkové procesoru Microsoft Excel® [26].

Výsledků bylo dosaženo po uskutečněné citlivostní analýze. V citlivostní analýze se ověřovaly výstupy zejména v závislosti na velikosti elementů sítě a na časovém kroku.

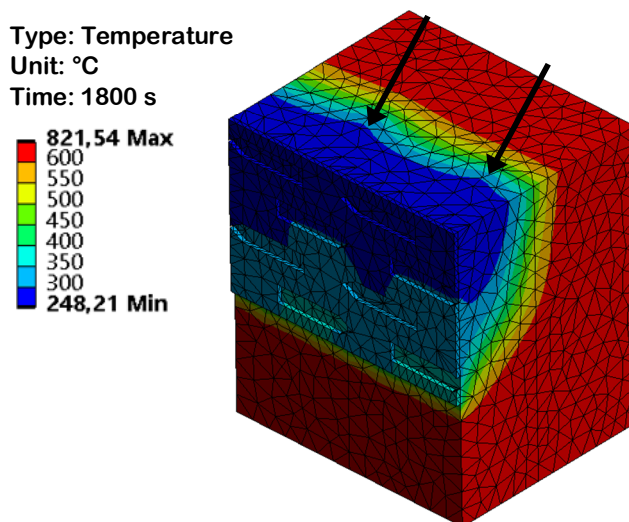
### 7.4.1 Okrajová část průřezu

Nejdříve jsou prověřovány celkové průběhy maximálních a minimálních teplot, viz obr. 44. Maximální teploty jsou u povrchů, na které působí tepelné namáhání. Hodnoty odpovídají teplotě plynů v okolí prvku. Minimální teploty jsou ve vnitřní části průřezu. Minimální hodnota by měla odpovídat teplotě okolí, tedy 20 °C. V prvních minutách modelované situace docházelo k poklesu teplot až na minimální teplotu 19,549 °C. Jedná se o tzv. teplotní šok<sup>1</sup>, vyskytující se při simulaci metodou konečných prvků. Tento teplotní šok je zanedbatelný a lze jej tolerovat vzhledem k rozsahu teplot modelované situace.



Obr. 44 Průběhy teplot okrajové části; výsledná teplotní maxima, minima a průměry v závislosti na čase

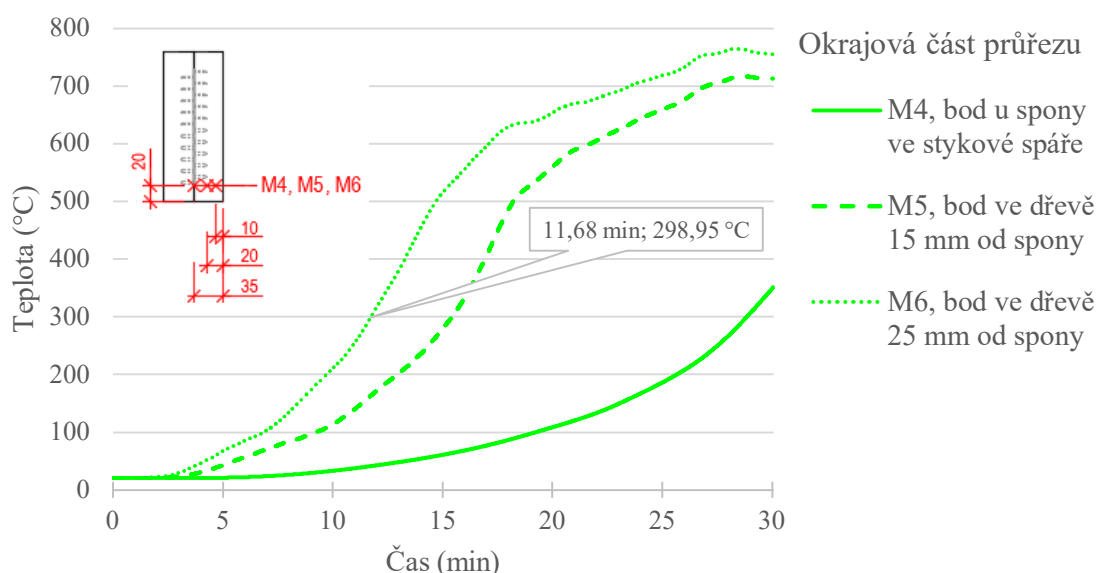
Na vygenerovaném 3D modelu (obr. 45) v čase simulace 1800 s je znatelný vliv trnů ocelové spony. Trny odvádějí teplo ze dřeva do části spony, která je tvořena deskou s otvory. Ocelová spona se potom zahřívá jako celek.



Obr. 45 Výsledný 3D model okrajové části prvku, čas simulace 1800 s, šipky ukazují místa u trnů spony

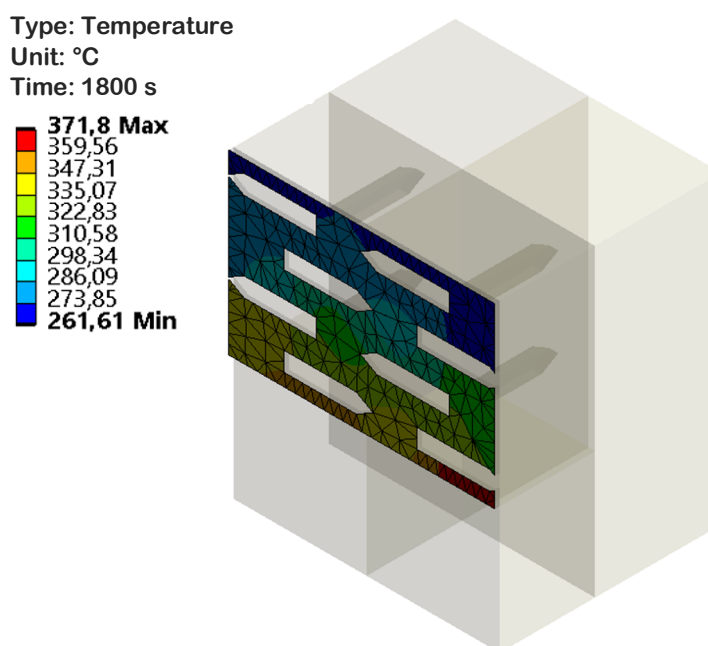
<sup>1</sup> Problém teplotního šoku během simulace přestupu tepla metodou konečných prvků je z matematicko-fyzikálního hlediska detailně rozebrán v anglicky psané publikaci Finite Element Simulation of Heat Transfer od autorů Jean-Michel Bergheau a Roland Fortunier [30]. Platí závislost minimální velikosti počátečního časového kroku na velikosti elementu, který je jako první ovlivněn změnou teploty. Rovněž je stanovena podmínka pro maximální velikost elementu, pokud není teplotní šok eliminován na základě předchozího poznatku. [30 s. 126]

Zjištěny jsou průběhy teplot v bodech umístěných ve stejných pozicích, ve kterých probíhalo měření termočlánky během experimentu. Průběhy teplot jsou v grafu na obr. 46. Výsledky simulace budou porovnány s naměřenými hodnotami v kapitole 8. Na základě zjištěného času dosažení teploty 300 °C v bodě ve dřevě 15 mm od spony je vypočítána rychlost zuhelnatění. Do hloubky 10 mm by podle provedené simulace probíhalo zuhelnatění rychlostí 0,85 mm/min.



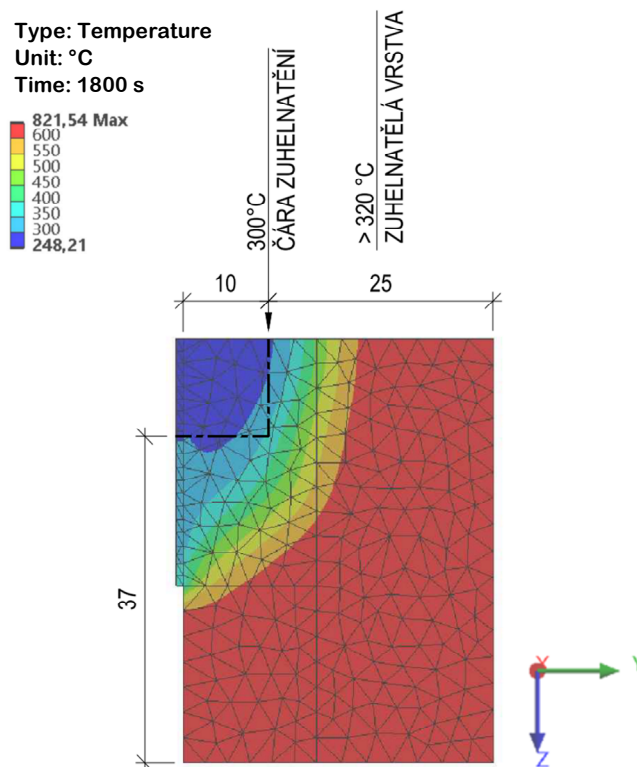
Obr. 46 Průběhy teplot v okrajové části průřezu spoje bez mezery ve stykové spáře

Kritická teplota ocelové spony rovna 458 °C nebyla v bodě M4 zaznamenána. Teplotní pole v ocelové desce v čase 1800 s je na obr. 47.



Obr. 47 Okrajová část průřezu a teplotní pole v ocelové desce, čas simulace 1800 s

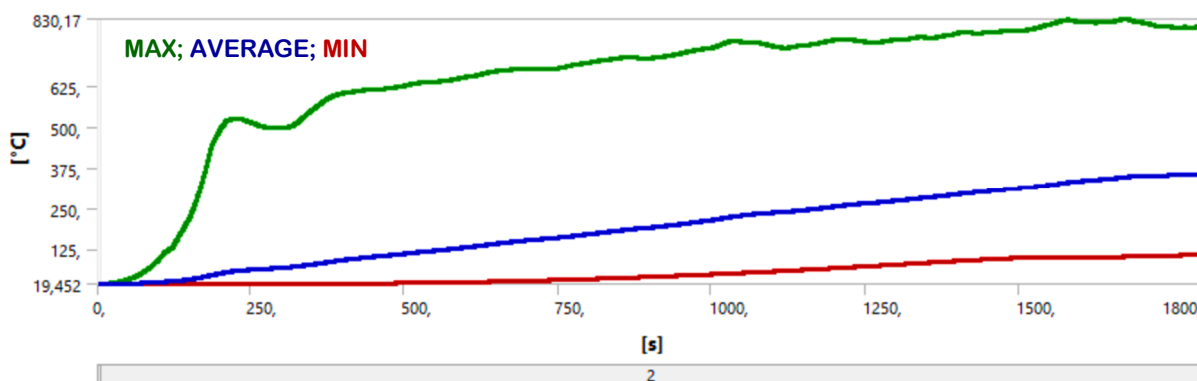
V čase 30 minut je čára zuhelnatění v hloubce 37 mm od okraje kratší strany průřezu dřevěného prvku a v hloubce 25 mm od povrchu druhé strany průřezu. Rychlost zuhelnatění ve směru osy z vychází 1,23 mm/min ve druhém směru je rovna 0,83 mm/min. Obrázek se zakreslenou čárou zuhelnatění ve vyexportovaném obrázku ze simulace pro čas 1800 s je na obr. 48. Poloha čáry zuhelnatění je uvažována bez zaoblení. Plocha ručně vymezeného pravoúhlého obrazce odpovídá ploše v modelu s teplotou do 300 °C.



Obr. 48 Boční pohled na prvek v čase 1800 s se zakreslením čáry zuhelnatění a zakótováním její polohy

#### 7.4.2 Středová část průřezu

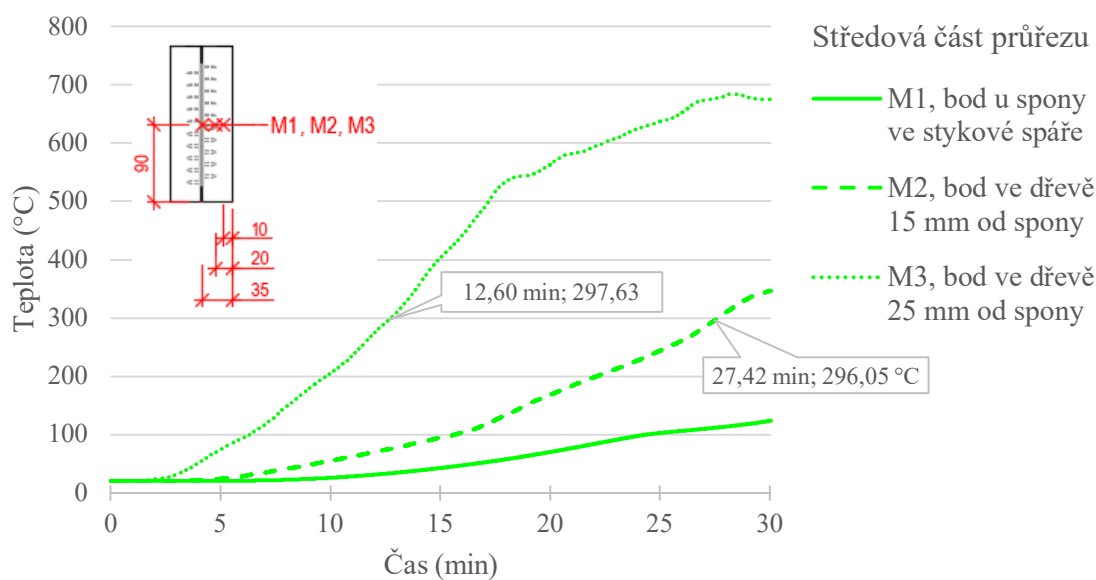
Citlivostní analýzou bylo dosaženo výsledků s minimální teplotou 19,452 °C v prvních minutách simulace. Teplotní šok je malého rozsahu, je proto připuštěn.



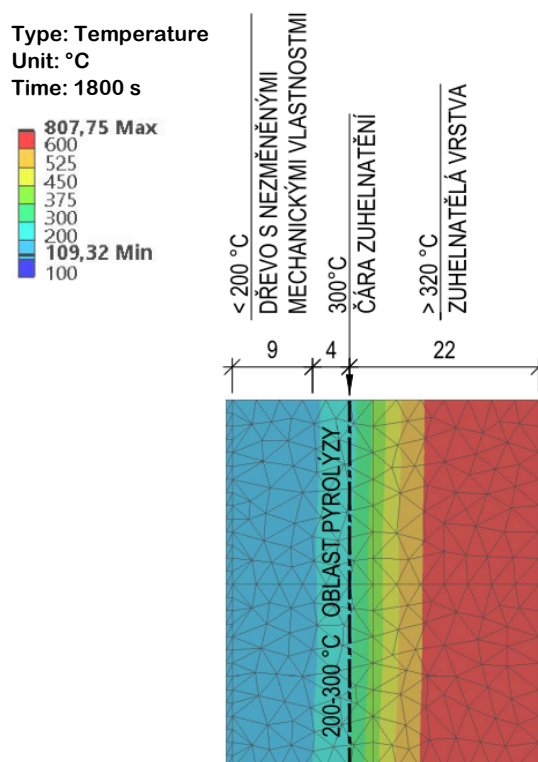
Obr. 49 Průběhy teplot středové části; výsledná teplotní maxima, minima a průměry v závislosti na čase

Průběhy teplot v měřicích bodech jsou zobrazeny v grafu na obr. 50. Rychlost zuhelnatění vypočítaná do bodu 10 mm od povrchu je 0,79 mm/min, podle bodu 20 mm od povrchu je 0,73 mm/min. Rychlost zuhelnatění mezi body M2 a M3, kdy je teplota 300 °C v bodě M3 zaznamenána za 14,82 min, je 0,67 mm/min. Proces zuhelnatění se postupem do hloubky průřezu zpomaluje. Prvek s výslednou hloubkou zuhelnatění v čase 1800 s je na obr. 51.

Kritická teplota spony rovna 458 °C nebyla v bodě u ocelové desky zaznamenána.



Obr. 50 Průběhy teplot ve středové části průřezu spoje bez mezery ve stykové spáře

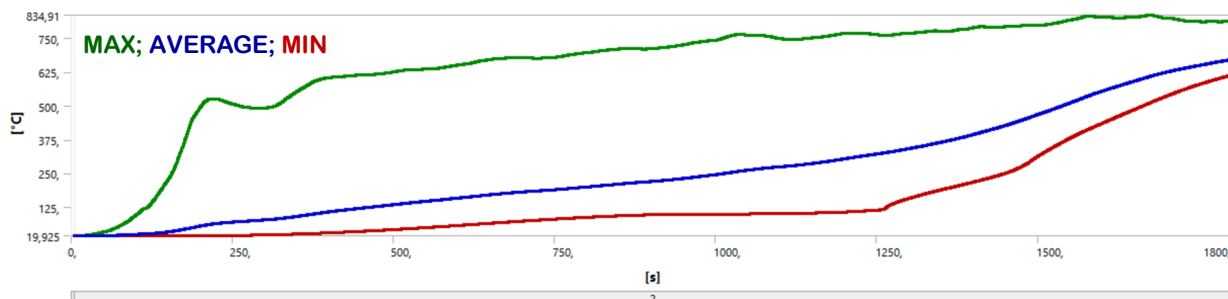


Obr. 51 Pohled shora na prvek v čase 1800 s se zakreslením čáry zuhelnatění a zakótováním její polohy



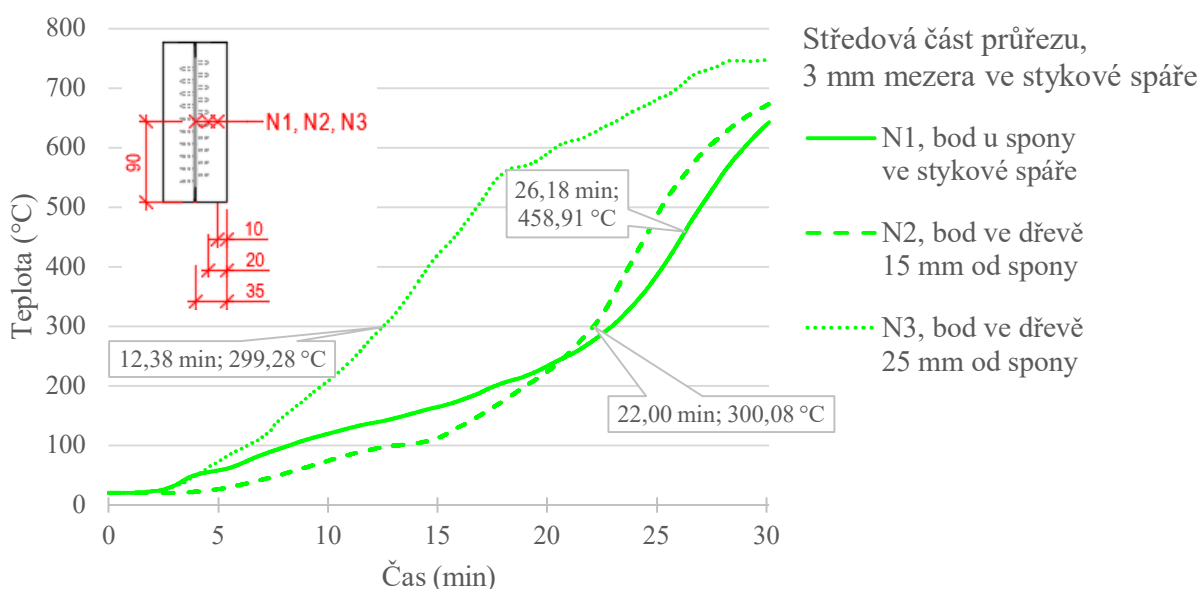
### 7.4.3 Středová část průřezu s mezerou ve stykové spáře

Teplotní šok ve středové části průřezu s 3mm mezerou ve stykové spáře je nepatrný, minimální teplota v prvku je podle numerické simulace 19,925 °C. Na průběhu teplotních minim (obr. 52) je zřetelný teplotní rozdíl s prvkem bez mezery ve stykové spáře (obr. 50).



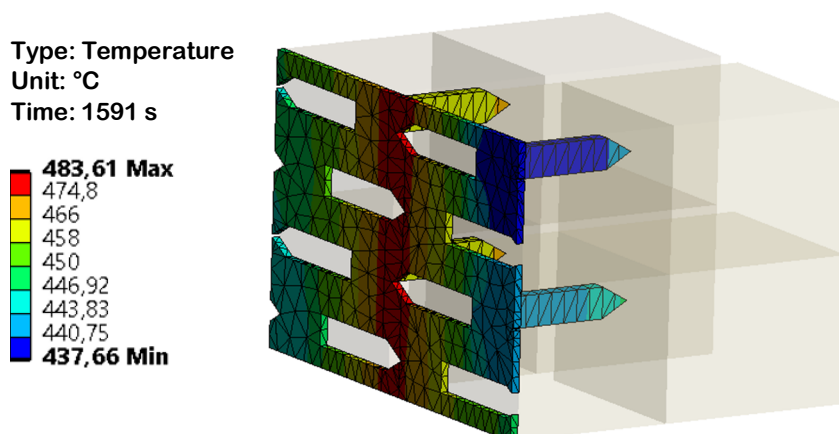
Obr. 52 Průběhy teplot středové části průřezu s 3mm mezerou ve stykové spáře; výsledná teplotní maxima, minima a průměry v závislosti na čase

Průběhy teplot v měřicích bodech jsou zobrazeny v grafu na obr. 53. Rychlost zuhelnatění vypočítaná k hloubce zuhelnatění v 10 mm od povrchu je 0,81 mm/min, k hloubce 20 mm se rovná 0,91 mm/min. Výpočet je proveden podle časů dosažení teploty zuhelnatění v bodech N2 a N3, viz vyznačení v grafu na obr. 53.



Obr. 53 Průběhy teplot ve středové části průřezu spoje s 3mm mezerou ve stykové spáře

Kritická teplota spony rovna 458 °C byla v bodě u ocelové desky překročena v čase 26,18 min (obr. 53). Vliv 3mm mezery ve stykové spáře na průběhy teplot ve sponě je vidět na obr. 54. Ocelová deska je v místě s nejvyšší teplotou zatěžována radiační složkou tepelného zatížení. Z těchto míst je teplo dále vedeno do zbytku ocelové spony.



Obr. 54 Styčnicková deska ve spoji s 3mm mezerou ve stykové spáře po 26. minutě

## 7.5 Shrnutí výsledků

Byla provedena simulace dvou samostatných částí analyzovaného spoje, okrajová část a středová část průřezu, která byla vymodelována také ve variantě s 3mm mezerou ve stykové spáře. Ve všech případech byla vytvořena síť s čtyřstěny velikosti 3 mm. Časový krok platí pro všechny případy stejný, v prvním intervalu byl zvolen 5s krok, v intervalu od 5 s do 1800 s je časový krok proměnný, kde počáteční krok je 0,5 s, minimální 0,005 s a maximální 0,5 s. Teplotní šok byl ve všech variantách zanedbatelný vzhledem k řešenému problému.

Hloubka zuhelnatění okrajové a středové části průřezu v čase 1800 s je v tab. 7. Dle hloubky zuhelnatění jsou v tab. 7 spočítány rychlosti zuhelnatění.

Kritická teplota ocelové spony, 458 °C, byla překročena pouze u prvku s mezerou ve stykové spáře, přibližně ve 26. minutě. V ostatních případech nedošlo v žádném místě ocelové spony k dosažení kritické teploty, viz shrnutí výsledků v tab. 7.

Tab. 7 Shrnutí výsledků simulace – čas dosažení kritické teploty, hloubka zuhelnatění v čase 1800 s

Modelovaný prvek	Hloubka zuhelnatění v čase 1800 s	Rychlost zuhelnatění	Dosažení kritické teploty 458 °C v ocelové desce
Okrajová část	25 mm kolmo k desce; 37 mm z kratší strany průřezu	0,83 mm/min z delší strany průřezu; 1,23 mm/min z kratší strany průřezu	Ne
Středová část	22 mm	0,73 mm/min	Ne
Středová část a 3 mm mezera ve stykové spáře	V celém prvku teplota > 600 °C	(0,91 mm/min do hloubky 20 mm)	Ano, v čase 26,17 min

Výsledky numerické simulace budou v následující kapitole porovnány s výsledky z ostatních částí práce. Na závěr proběhne vyhodnocení výsledků.



## 8 Analýza výsledků

V této kapitole jsou vzájemně porovnány výsledky z jednotlivých částí práce – analytického řešení, požárního experimentu a numerické simulace. Postupně proběhne komparace stěžejních zjišťovaných hodnot. Jedná se o porovnání výsledků analýzy pro 30minutový normový požár, závěrečná tvrzení tedy nemusí platit pro každou situaci.

### 8.1 Rychlost a hloubka zuhelnatění

Rychlost a hloubka zuhelnatění dřeva byla zjištěna v rámci všech zpracovaných metod. Níže je tab. 8 s porovnáním výsledků hloubky zuhelnatění v čase 1800 sekund a rychlosti zuhelnatění podle analytického řešení, požárního experimentu a numerické simulace.

Tab. 8 Tabulka s porovnáním výsledků hloubky zuhelnatění v čase 1800 s a rychlosti zuhelnatění podle analytického řešení, požárního experimentu a numerické simulace

Část průřezu (směr postupu zuhelnatění)	Hloubka zuhelnatění v čase 1800 s			Rychlost zuhelnatění		
	Výpočet	Experiment	Model	Výpočet	Experiment	Model
Okrajová část (z kratší strany průřezu)	26 mm	30 mm	37 mm	0,8 mm/min (dle [1])	0,82 mm/min	1,03 mm/min
Středová část (kolmo k desce)	26 mm	20 mm	22 mm	0,8 mm/min (dle [1])	0,67 mm/min	0,73 mm/min

Ve výpočtu byla rychlost zuhelnatění stanovena podle ČSN EN 1995-1-2 [1] jako nominální rychlosti zuhelnatění pro jehličnaté rostlé dřevo, hloubka zuhelnatění je potom vypočítána jako rychlost zuhelnatění vynásobená dobou trvání požáru. Výsledné hodnoty rychlosti zuhelnatění pro experiment a model jsou stanoveny z hloubky zuhelnatění, případně polohy čáry zuhelnatění v průřezu v určitém čase. Hloubka zuhelnatění prvků z experimentu je určena vizuálně. Z numerického modelu je zjištěna podle teplotního pole po průřezu.

Výsledky z numerického modelu se odlišují od výpočtu a experimentu, rychlost zuhelnatění a následně i hloubka zuhelnatění jsou mírně vyšší. Pravděpodobně je to dáno ideálním simulačním prostředím a neúplným řešením chemických procesů, ke kterým ve dřevě při hoření dochází a které způsobují pomalejší postup zuhelnatění. Ztráta vlhkosti je sice zohledněna v proměnných fyzikálních vlastnostech dřeva, ale její dopady jinde v průřezu modelovány nijak nejsou. Vypočítané hodnoty rychlosti zuhelnatění z numerického modelu jsou na straně bezpečnosti, ale neodpovídají realitě.

Rychlost zuhelnatění je třeba uvažovat podle normových hodnot nebo na základě experimentálních výsledků pro dané dřevo. Stejně tvrzení uvádí i norma ČSN EN 1995-1-2 [1].

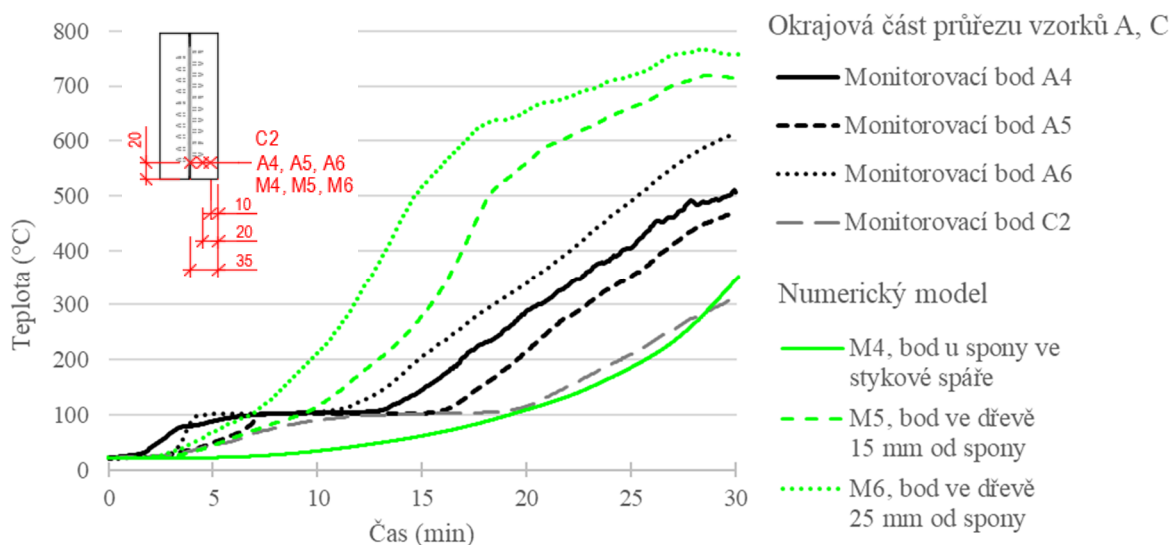
## 8.2 Průběh teplot v průřezu

Teplota v přesně určených bodech byla měřena při požárním experimentu a zjištěna byla z výsledků numerické simulace, ne však z analytického řešení.

### 8.2.1 Okrajová část průřezu

Na následujícím obrázku, obr. 55, jsou v grafu zobrazeny průběhy teplot v monitorovacích bodech během experimentu a určených bodech numerického modelu. Černě jsou vykresleny naměřené hodnoty během experimentu a zeleně jsou vykresleny výstupní hodnoty z numerické simulace. Průběhy teplot se liší jak v počáteční fázi, kdy během experimentu docházelo k prudšímu nárůstu teplot k hodnotě 100 °C, tak v dalším průběhu při setrvání teplot zaznamenaných během experimentu na 100 °C vlivem odpařování vlhkosti ze dřeva.

Pokud by průběhy teplot pokračovaly stejnou tendencí, je pravděpodobné, že při delší požární situaci, by si závěrečné teploty více odpovídaly. Nyní se naměřené teploty a hodnoty teplot ze simulace v bodech ve dřevě liší přibližně o 150-250 °C, u ocelové spony o 50 °C. Otázkou také je, jaké hodnoty by byly během experimentu naměřeny, kdyby byl vzorek jinak orientován a ohříván ze všech stran.

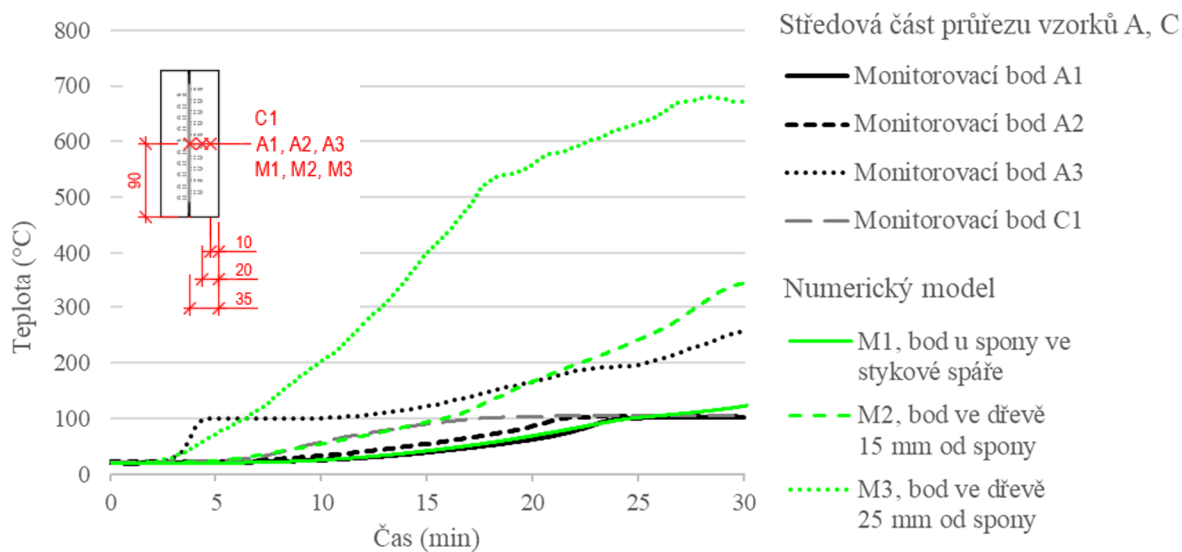


Obr. 55 Okrajová část průřezu a průběhy teplot v měřicích bodech; černě – experimentální výsledky, zeleně – numerická simulace

### 8.2.2 Středová část průřezu

V grafu na obr. 56 jsou vykresleny průběhy teplot v bodech středové části průřezu. V bodech ve dřevě, 15 a 25 mm od spony, jsou průběhy opět odlišné a na křivkách zobrazujících hodnoty z numerického modelu chybí vodorovná část průběhu, která značí odpařování vlhkosti z dřevní hmoty. V numerickém modelu rovněž nebyla nasimulována kondenzace vodní páry na ocelové

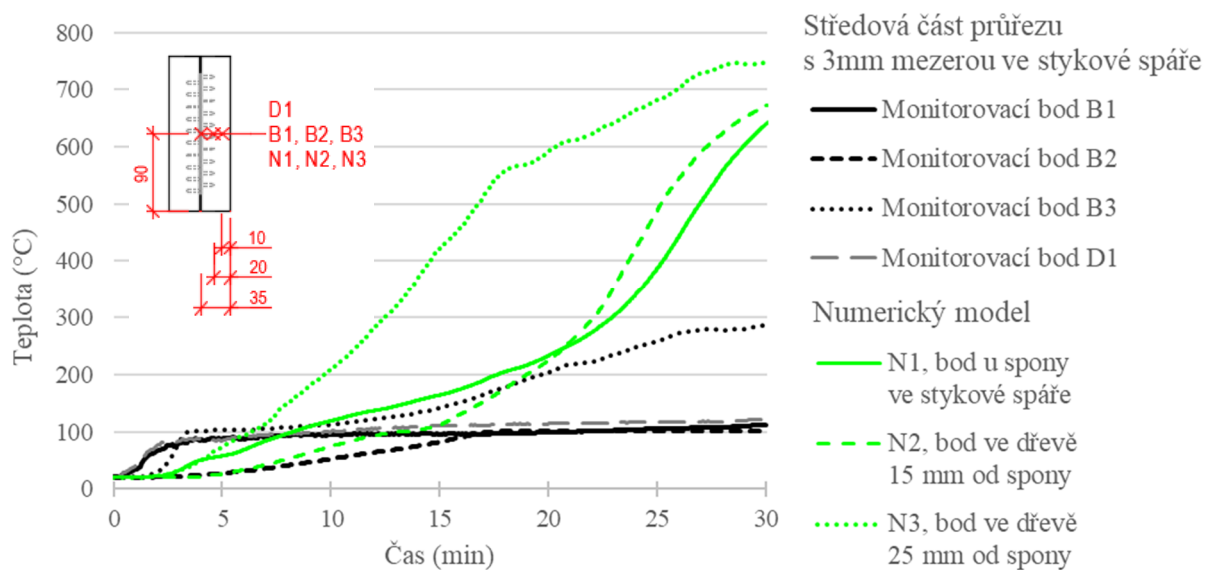
desce, která by její teplotu držela na hodnotách kolem 100 °C, jinak si průběhy teploty v bodě u spony odpovídají.



Obr. 56 Středová část průřezu a průběhy teplot v bodech; černě – experimentální výsledky, zeleně – numerická simulace

### 8.2.3 Středová část s 3mm mezerou ve stykové spáře

Na obr. 57 jsou zobrazeny průběhy teplot v bodech středové části průřezu s 3mm mezerou ve stykové spáře. Naměřené hodnoty během experimentu a výstupní hodnoty z numerické simulace se výrazně liší. Vliv 3mm mezery v bodě u spony je u naměřených hodnot z experimentu znatelný. V numerickém modelu přidané teplotní zatížení v 3mm mezeře způsobilo výrazný nárůst teplot.



Obr. 57 Středová část průřezu s 3mm mezerou ve stykové spáře a průběhy teplot v bodech; černě – experimentální výsledky, zeleně – numerická simulace

### 8.3 Čas dosažení kritické teploty v ocelové desce

Čas dosažení kritické teploty v ocelové desce byl určen analyticky a v numerické simulaci. Při experimentu byla měřena teplota termočlánkem pouze u povrchu ocelové desky.

Při výpočtu pomocí analytické přírůstkové metody podle ČSN EN 1993-1-2 [2] bylo dosaženo kritické teploty v ocelové desce přibližně v čase 26,3 minuty. V numerické simulaci bylo dosaženo sledované hodnoty 458 °C pouze v případě modelovaného prvku s 3 mm mezerou ve stykové spáře. Této teploty bylo dosaženo v čase 26,17 minut. Ovšem v předchozí kapitole 8.2.3 není potvrzena správnost simulace.

Porovnávané časy si odpovídají, ale nemusí odpovídat realitě. Při komparaci výsledků numerické simulace a experimentu v kapitole 8.2.3 jsou teploty z modelu vyšší. Tvrzení, že bylo dosaženo teploty 458 °C v čase 26 minut, je na straně bezpečnosti.

### 8.4 Vyhodnocení použitých metod

Analytické řešení nám dává konzervativní výsledky. V této práci je to jediná metoda, při které byla zjišťována také mechanická únosnost dílčích prvků zkoumaného spoje.

Z numerické simulace jsou, po porovnání s experimentem, získávány nepřesné průběhy teplot ve dřevě. Hloubka a rychlost zuhelnatění také neodpovídá reálným hodnotám. Výsledky z modelu lze označit za přibližné, bezpečné.

Experimentálně získaná data nelze zpochybňovat. Rychlost zuhelnatění odpovídá normovým hodnotám. Naměřené průběhy teplot ve zkušebních vzorcích byly rozporovány z důvodu polohy vzorků a možnosti odpařování vlhkosti ze vzorků, kdy vzorky byly orientovány ocelovou deskou rovnoběžně s podlahou pece. Výsledky získané požární zkouškou potvrzují bezpečnost výpočtů podle technických norem.

Získané výsledky v jednotlivých částech práce jsou stručně vyhodnoceny v tab. 9. Vyhodnocována je rychlost zuhelnatění a čas dosažení kritické teploty v ocelové desce.

Tab. 9 Vyhodnocení získaných výsledků

<i>Metoda</i>	<i>Rychlost zuhelnatění</i>	<i>Čas dosažení kritické teploty v ocelové desce</i>
<i>Analytické řešení</i>	<i>Nominální z normy, na straně bezpečnosti</i>	<i>26,3 min, na straně bezpečnosti</i>
<i>Požární experiment</i>	<i>Ok</i>	<i>Kritická teplota nebyla zaznamenána</i>
<i>Numerický model</i>	<i>Přibližné hodnoty, na straně bezpečnosti</i>	<i>Přibližné hodnoty, na straně bezpečnosti</i>

## 9 Závěr

V diplomové práci byla zpracována tepelná analýza styčnickového spoje tažených dřevěných prvků, ve kterém je spojovacím prostředkem ocelová styčnicková deska s oboustranně prolisovanými trny. Rozbor byl proveden analytickým výpočtem, pomocí požárního experimentu a numerické simulace. Cílem práce bylo určení požární odolnosti spoje.

Ve výpočtech byla únosnost dřevěných prvků za požáru posuzována metodou redukovaného průřezu podle ČSN EN 1995-1-2, požární odolnost ocelové desky byla určena časem dosažení kritické teploty podle ČSN EN 1993-1-2. Požární experiment byl proveden ve středně-rozměrové zkušební peci na 4 vzorcích. Ve vzorcích byly umístěny termočlánky pro snímání teploty na ocelové desce a po hloubce průřezu ve dřevě, po vyjmutí z pece byla vizuálně stanovena hloubka zuhelnatění dřevěných prvků. Numerický model byl proveden v softwaru pracujícím s metodou konečných prvků, z modelu byla získána data pro průběhy teplot ve zvolených bodech a v ocelovém prvku.

Výsledná požární odolnost je vyhodnocena na základě analytických výpočtů ověřených experimentálními daty. Výsledky ze simulace se jeví, po porovnání s výsledky z experimentu, jako méně přesné.

Klasifikační doba požární odolnosti konstrukce se splněním kritéria R je předpokládána v délce 20 minut. Rozhodujícím kritériem byl čas dosažení zvolené kritické teploty v ocelové desce. Tahová únosnost ocelové desky před dosažením kritické teploty 458 °C činí 15,86 kN, to je 59 % z únosnosti za běžné teploty, zbytková tahová únosnost dřevěných prvků je 20,19 kN, 9,5% hodnota únosnosti původního průřezu. Mechanická odolnost spoje jako celku není známa za běžných teplot nebo za požární situace.

V případě, že je ocelová deska dřevem kompletně chráněná, styková spára je bez mezery, k oteplování desky pravděpodobně dochází pozvolnějším nárůstem, než jaký ukazují výsledky analytického výpočtu. Postup výpočtu by mohl být zpřesněn, výsledky uvažovaného řešení se zdají spíše konzervativní. Například přírůstek teploty by mohl být počítán vždy jako pro chráněný prvek s uvažováním zuhelnatělé vrstvy jako izolačního materiálu, i přes vyskytující se trhliny v této vrstvě. Vliv trhlín by byl zohledněn např. ve vyšší tepelné vodivosti.

Spoj s oboustranně prolisovanou styčnickovou sponou byl zamýšlen jako požárně-odolná alternativa k tradičním spojům. V případě dalšího zkoumání této problematiky je třeba se zaměřit na celkovou odolnost spoje s oboustranně prolisovanou styčnickovou deskou. V této práci jsou dřevěné prvky spíše předdimenzované, a to za účelem ochrany tenké ocelové desky před požárem. Pro zachování všech výhod, kterými jsou známé konstrukce se styčnickovými deskami s prolisovanými trny, je nezbytný takový návrh průřezu dřevěných prvků, který bude efektivně využitý. Toho pravděpodobně nemůže být dosaženo, pokud o únosnosti spoje rozhoduje odolnost čistého průřezu oceli tenké ocelové desky v místě stykové spáry.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma hoření dřeva [10].....	12
Obr. 2 Teplotní profil pod zuhelnatělou vrstvou [11] .....	12
Obr. 3 Teplota pod vrstvou pyrolýzy dřeva, které je vystaveno požáru podle normové teplotní křivky [5] .....	13
Obr. 4 Příčný řez dřevo-betonovou konstrukcí [6] .....	14
Obr. 5 Prototyp spony s oboustranně prolisovanými trny pro dřevo-betonové stropy [13].....	14
Obr. 6 Příčný řez spoje trámů z lepeného lamelového dřeva a CLT panelu [15].....	15
Obr. 7 Oboustranně prolisované desky pro spojení CLT panelu a trámu z lepeného lamelového dřeva [15].....	15
Obr. 8 Styčnicková deska oboustranná BV15/O [16].....	17
Obr. 9 Analyzovaný spoj v pohledu, příčném a horizontálním řezu.....	18
Obr. 10 Izometrie spoje s oboustranně prolisovanou styčnickovou deskou spojující dřevěné prvky, modrá šipka značí hlavní směr desky, červené šipky představují síly působící na dřevěné prvky .....	19
Obr. 11 Normová teplotní křivka .....	21
Obr. 12 Schéma výpočetní metody redukovaného průřezu na posuzovaném spoji.....	22
Obr. 13 Schéma fází výpočtu přestupu tepla do ocelové desky .....	24
Obr. 14 Určení součinitele průřezu: (a) $A_p/V$ ; (b) $A_m/V$ .....	26
Obr. 15 Graf s výslednými hodnotami v závislosti na čase.....	27
Obr. 16 Pohled na zkušební pec miniFUR během požární zkoušky. Foto Marek Pokorný.....	28
Obr. 17 Vzorky „A“ a „C“, z výkresu pro zhotovení.....	29
Obr. 18 Z Vzorky „B“ a „D“, z výkresu pro zhotovení .....	29
Obr. 19 Zkušební vzorky vyrobené ve společnosti BOVA Březnice spol. s r.o. Foto Lukáš Velebil .....	30
Obr. 20 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „A“.....	31
Obr. 21 Vzorek „A“ se zabudovanými termočlánky. Foto Lukáš Velebil.....	31
Obr. 22 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „B“ .....	31
Obr. 23 Vzorek „B“ se zabudovanými termočlánky. Foto Lukáš Velebil .....	31
Obr. 24 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „C“ .....	32
Obr. 25 Vzorek „C“ se zabudovanými termočlánky. Foto Lukáš Velebil .....	32
Obr. 26 Pozice monitorovacích bodů ve vzorku „D“.....	32
Obr. 27 Vzorek „D“ se zabudovanými termočlánky. Foto Lukáš Velebil.....	32

---

Obr. 28 Vzorek připravený pro umístění do pece. Foto Lukáš Velebil .....	33
Obr. 29 Fotografie upevněných vzorků ve zkušební peci. Doplněno popisem. Foto Marek Pokorný .....	33
Obr. 30 Porovnání normové teplotní křivky a naměřené teploty plynů v horní části pece.....	34
Obr. 31 Graf s naměřenými teplotami ve středové části průřezu vzorku „A“.....	35
Obr. 32 Graf s naměřenými teplotami v okrajové části průřezu vzorku „A“.....	36
Obr. 33 Graf s naměřenými teplotami ve středové části průřezu vzorku „B“.....	37
Obr. 34 Graf s naměřenými teplotami v okrajové části průřezu vzorku „B“.....	38
Obr. 35 Graf s naměřenými teplotami ve vzorku „C“.....	38
Obr. 36 Graf s naměřenými teplotami ve vzorku „D“.....	39
Obr. 37 Vzorky po zkoušce: (a) varianta vzorku bez mezery ve stykové spáře, (b) varianta vzorku s 3 mm mezerou ve stykové spáře. Foto Lukáš Velebil.....	39
Obr. 38 Vzorek „A“ s vyznačeným zbytkovým průřezem.....	40
Obr. 39 Strom teplotní analýzy proměnné v čase v programu ANSYS Workbench [30].....	41
Obr. 40 Graf měrné tepelné kapacity oceli v závislosti na teplotě po úpravě v knihovně materiálů .....	44
Obr. 41 Vyznačení modelovaných částí průřezu .....	44
Obr. 42 Model okrajové části průřezu s vytvořenou výpočetní sítí.....	45
Obr. 43 Model středové části průřezu s vygenerovanou výpočetní sítí: (a) varianta spoje bez mezery ve stykové spáře; (b) spoj s 3mm mezerou ve stykové spáře.....	45
Obr. 44 Průběhy teplot okrajové části; výsledná teplotní maxima, minima a průměry v závislosti na čase .....	47
Obr. 45 Výsledný 3D model okrajové části prvku, čas simulace 1800 s, šipky ukazují místa u trnů spony.....	47
Obr. 46 Průběhy teplot v okrajové části průřezu spoje bez mezery ve stykové spáře .....	48
Obr. 47 Okrajová část průřezu a teplotní pole v ocelové desce, čas simulace 1800 s .....	48
Obr. 48 Boční pohled na prvek v čase 1800 s se zakreslením čáry zuhelnatění a zakótováním její polohy .....	49
Obr. 49 Průběhy teplot středové části; výsledná teplotní maxima, minima a průměry v závislosti na čase .....	49
Obr. 50 Průběhy teplot ve středové části průřezu spoje bez mezery ve stykové spáře.....	50
Obr. 51 Pohled shora na prvek v čase 1800 s se zakreslením čáry zuhelnatění a zakótováním její polohy .....	50
Obr. 52 Průběhy teplot středové části průřezu s 3mm mezerou ve stykové spáře; výsledná teplotní maxima, minima a průměry v závislosti na čase .....	51

---

---

Obr. 53 Průběhy teplot ve středové části průřezu spoje s 3mm mezerou ve stykové spáře.....	51
Obr. 54 Styčnicková deska ve spoji s 3mm mezerou ve stykové spáře po 26. minutě.....	52
Obr. 55 Okrajová část průřezu a průběhy teplot v měřicích bodech; černě – experimentální výsledky, zeleně – numerická simulace .....	54
Obr. 56 Středová část průřezu a průběhy teplot v bodech; černě – experimentální výsledky, zeleně – numerická simulace.....	55
Obr. 57 Středová část průřezu s 3mm mezerou ve stykové spáře a průběhy teplot v bodech; černě – experimentální výsledky, zeleně – numerická simulace .....	55



---

## Seznam tabulek

Tab. 1 Souhrn výsledků analytického řešení .....	27
Tab. 2 Závislost hustoty dřeva na teplotě a vlhkosti, určeno podle tabulky B.3 ČSN EN 1995-1-2 [1] .....	42
Tab. 3 Závislost tepelné vodivosti dřeva na teplotě, podle tabulky B.1 ČSN EN 1995-1-2 [1]... 42	42
Tab. 4 Měrná tepelná kapacita dřeva podle ČSN EN 1995-1-2 [1] .....	43
Tab. 5 Tepelná vodivost oceli v závislosti na teplotě podle čl. 3.4.1.3 ČSN EN 1993-1-2 [2].... 43	43
Tab. 6 Vztahy pro určení měrné tepelné kapacity oceli .....	43
Tab. 7 Shrnutí výsledků simulace – čas dosažení kritické teploty, hloubka zuhelnatění v čase 1800 s .....	52
Tab. 8 Tabulka s porovnáním výsledků hloubky zuhelnatění v čase 1800 s a rychlosti zuhelnatění podle analytického řešení, požárního experimentu a numerické simulace .....	53
Tab. 9 Vyhodnocení získaných výsledků .....	56

---

## Literatura

- [1] ČSN EN 1995-1-2. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: ÚNMZ. 2006.
- [2] ČSN EN 1993-1-2. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: ÚNMZ. 2006.
- [3] KUPILÍK, Václav. Spojení dřevěných konstrukcí za požáru. *Střechy, fasády, izolace*. 2014, 21(7), 32–34. ISSN 1212-0111.
- [4] GRUNDAHL, Kirk. *National Engineered Lightweight Construction Fire Research Project, Technical Report: Literature Search & Technical Analysis* [online]. B.m.: National Fire Protection Research Foundation. 1992. Dostupné z: [http://www.carbeck.org/pdfs/NFPRF\\_Report\\_WTCA\\_version.pdf](http://www.carbeck.org/pdfs/NFPRF_Report_WTCA_version.pdf)
- [5] KOŽELOUH, Bohumil. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5. STEP 1, STEP 1.*. Zlín: KODR, 1998. ISBN 978-80-238-2620-3.
- [6] KUKLÍK, P., P. NECHANICKÝ a A. KUKLÍKOVÁ. Development of prefabricated timber-concrete composite floors. In: *World Conference on Timber Engineering 2012 (WCTE 2012)*. 2012, s. 519–526. ISBN 978-1-62276-305-4.
- [7] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, 2006. ISBN 978-80-247-1329-8.
- [8] SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. B.m.: Jaga, 2009. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [9] ČSN EN 13501-2. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení*. Praha: ÚNMZ. 2017.
- [10] Hoření dřeva a jeho ochrana proti ohni. In: *Ochrana dřeva 2005* [online]. Březnice: Výzkumný a vývojový ústav dřevařský Praha, 2005. Dostupné z: [http://drevari.humlak.cz/data\\_web/Data\\_skola/HUdreva/12.pdf](http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/12.pdf)
- [11] BUCHANAN, Andrew Hamilton a Anthony ABU. *Structural design for fire safety*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc, 2017. ISBN 978-0-470-97289-2.
- [12] INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURES AND ARCHITECTURE. *Structures and architecture: concepts, applications and challenges: proceedings of the second International Conference on Structures and Architecture, Guimarães, Portugal, 24-26 July 2013*. 2013. ISBN 978-1-4822-2461-0.
- [13] KUKLÍK, P., A. KUKLÍKOVÁ a A. GREGOROVÁ. Kompozitní dřevobetonové stropní konstrukce s mechanickými spojovacími prostředky. *TZB-info* [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/15665-kompozitni-drevobetonove-konstrukce-s-mechanickymi-spojovacicmi-prostredky>

- [14] JACQUIER, Nicolas, LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET, a INSTITUTIONEN FÖR SAMHÄLLSBYGGNAD OCH NATURRESURSER. *Shear tests on glulam-CLT joints with double-sided punched metal plate fasteners and inclined screws*. Lulea: Luleå tekniska universitet, 2014. ISBN 978-91-7439-893-9.
- [15] JACQUIER, Nicolas, LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET, a INSTITUTIONEN FÖR SAMHÄLLSBYGGNAD OCH NATURRESURSER. *Bending tests on glulam-CLT beams connected with double-sided punched metal plate fasteners and inclined screws*. Lulea: Luleå tekniska universitet, 2015. ISBN 978-91-7583-212-8.
- [16] BOVA: *Katalog spojovacích prostředků* [online]. Dostupné z: [http://www.bova-nail.cz/upl/ke\\_stazeni/100001s\\_Katalog\\_20BOVA.pdf](http://www.bova-nail.cz/upl/ke_stazeni/100001s_Katalog_20BOVA.pdf)
- [17] ČSN 73 1702. *Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí - Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ÚNMZ. 2007.
- [18] ČSN EN 1075. *Dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Spoje se styčnickovými deskami s prolisovanými trny*. Praha: ÚNMZ. 2000.
- [19] *Pamir* [online]. B.m.: MiTek®, 2020. Dostupné z: <https://www.mitek.cz/pamir/>
- [20] *Truss4* [online]. B.m.: Fine spol. s r.o., 2020. Dostupné z: <https://www.fine.cz/stresni-konstrukce/>
- [21] ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ÚNMZ. 2006.
- [22] ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ÚNMZ. 2006.
- [23] ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti*. Praha: ÚNMZ. 2016.
- [24] ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli*. Praha: ÚNMZ. 2017.
- [25] ČSN EN 1991-1-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: ÚNMZ. 2004.
- [26] MICROSOFT®. *Excel®*. nedatováno. Office 365 MSO (16.0.12527.21378).
- [27] Vyvinuli jsme pec miniFUR pro středněrozměrové požární zkoušky. *Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze* [online]. 2. září 2019. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/aktuality/vyvinuli-jsme-pec-minifur-pro-strednerozmerove-pozarni-zkousky>
- [28] CHLÁDEK, Jiří. *Malorozměrové zkoušky požární odolnosti* [online]. B.m., 2019. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/80902>
- [29] ČSN EN 1363-1. *Zkoušky požární odolnosti – Část 1: Obecné požadavky*. Praha: ÚNMZ. 2020.
- [30] *Ansys® Academic Student, verze 2020 R2*. B.m.: ANSYS, Inc., 2020.

## Příloha 1 – Výsledky analytického řešení

*Přírůstkový výpočet – část 1: tahová únosnost dřevěných prvků při požáru*

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost dřevěných prvků
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
0	0,00	20,00	0,00	0,00	0,00	12154,50	212,70
5	0,08	96,54	0,07	0,01	0,13	12092,06	211,61
10	0,17	146,95	0,13	0,01	0,22	12044,28	210,77
15	0,25	184,61	0,20	0,02	0,32	11996,57	209,94
20	0,33	214,67	0,27	0,02	0,41	11948,93	209,11
25	0,42	239,70	0,33	0,03	0,51	11901,37	208,27
30	0,50	261,14	0,40	0,03	0,60	11853,88	207,44
35	0,58	279,90	0,47	0,03	0,70	11806,46	206,61
40	0,67	296,56	0,53	0,04	0,80	11759,12	205,78
45	0,75	311,56	0,60	0,04	0,89	11711,85	204,96
50	0,83	325,19	0,67	0,05	0,99	11664,65	204,13
55	0,92	337,68	0,73	0,05	1,08	11617,53	203,31
60	1,00	349,21	0,80	0,05	1,18	11570,48	202,48
65	1,08	359,92	0,87	0,06	1,28	11523,50	201,66
70	1,17	369,91	0,93	0,06	1,37	11476,60	200,84
75	1,25	379,28	1,00	0,07	1,47	11429,77	200,02
80	1,33	388,10	1,07	0,07	1,56	11383,02	199,20
85	1,42	396,42	1,13	0,08	1,66	11336,33	198,39
90	1,50	404,31	1,20	0,08	1,75	11289,73	197,57
95	1,58	411,80	1,27	0,08	1,85	11243,19	196,76
100	1,67	418,94	1,33	0,09	1,95	11196,73	195,94
105	1,75	425,75	1,40	0,09	2,04	11150,34	195,13
110	1,83	432,27	1,47	0,10	2,14	11104,03	194,32
115	1,92	438,51	1,53	0,10	2,23	11057,78	193,51
120	2,00	444,50	1,60	0,10	2,33	11011,62	192,70
125	2,08	450,27	1,67	0,11	2,43	10965,52	191,90
130	2,17	455,82	1,73	0,11	2,52	10919,50	191,09
135	2,25	461,17	1,80	0,12	2,62	10873,55	190,29
140	2,33	466,34	1,87	0,12	2,71	10827,68	189,48
145	2,42	471,33	1,93	0,13	2,81	10781,88	188,68
150	2,50	476,17	2,00	0,13	2,90	10736,15	187,88
155	2,58	480,85	2,07	0,13	3,00	10690,50	187,08
160	2,67	485,39	2,13	0,14	3,10	10644,92	186,29

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Ra,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
165	2,75	489,80	2,20	0,14	3,19	10599,41	185,49
170	2,83	494,08	2,27	0,15	3,29	10553,98	184,69
175	2,92	498,24	2,33	0,15	3,38	10508,62	183,90
180	3,00	502,29	2,40	0,15	3,48	10463,34	183,11
185	3,08	506,23	2,47	0,16	3,58	10418,12	182,32
190	3,17	510,07	2,53	0,16	3,67	10372,98	181,53
195	3,25	513,82	2,60	0,17	3,77	10327,92	180,74
200	3,33	517,48	2,67	0,17	3,86	10282,93	179,95
205	3,42	521,04	2,73	0,18	3,96	10238,01	179,17
210	3,50	524,53	2,80	0,18	4,05	10193,16	178,38
215	3,58	527,93	2,87	0,18	4,15	10148,39	177,60
220	3,67	531,26	2,93	0,19	4,25	10103,69	176,81
225	3,75	534,52	3,00	0,19	4,34	10059,07	176,03
230	3,83	537,71	3,07	0,20	4,44	10014,52	175,25
235	3,92	540,83	3,13	0,20	4,53	9970,04	174,48
240	4,00	543,89	3,20	0,20	4,63	9925,63	173,70
245	4,08	546,88	3,27	0,21	4,73	9881,30	172,92
250	4,17	549,82	3,33	0,21	4,82	9837,05	172,15
255	4,25	552,70	3,40	0,22	4,92	9792,86	171,38
260	4,33	555,53	3,47	0,22	5,01	9748,75	170,60
265	4,42	558,31	3,53	0,23	5,11	9704,71	169,83
270	4,50	561,03	3,60	0,23	5,20	9660,75	169,06
275	4,58	563,71	3,67	0,23	5,30	9616,86	168,30
280	4,67	566,33	3,73	0,24	5,40	9573,04	167,53
285	4,75	568,92	3,80	0,24	5,49	9529,30	166,76
290	4,83	571,46	3,87	0,25	5,59	9485,63	166,00
295	4,92	573,95	3,93	0,25	5,68	9442,03	165,24
300	5,00	576,41	4,00	0,25	5,78	9398,51	164,47
305	5,08	578,83	4,07	0,26	5,88	9355,06	163,71
310	5,17	581,21	4,13	0,26	5,97	9311,69	162,95
315	5,25	583,55	4,20	0,27	6,07	9268,38	162,20
320	5,33	585,85	4,27	0,27	6,16	9225,16	161,44
325	5,42	588,12	4,33	0,28	6,26	9182,00	160,69
330	5,50	590,36	4,40	0,28	6,35	9138,92	159,93
335	5,58	592,56	4,47	0,28	6,45	9095,91	159,18
340	5,67	594,73	4,53	0,29	6,55	9052,98	158,43
345	5,75	596,87	4,60	0,29	6,64	9010,11	157,68

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Ra,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
350	5,83	598,98	4,67	0,30	6,74	8967,33	156,93
355	5,92	601,07	4,73	0,30	6,83	8924,61	156,18
360	6,00	603,12	4,80	0,30	6,93	8881,97	155,43
365	6,08	605,14	4,87	0,31	7,03	8839,40	154,69
370	6,17	607,14	4,93	0,31	7,12	8796,91	153,95
375	6,25	609,11	5,00	0,32	7,22	8754,49	153,20
380	6,33	611,06	5,07	0,32	7,31	8712,14	152,46
385	6,42	612,98	5,13	0,33	7,41	8669,87	151,72
390	6,50	614,88	5,20	0,33	7,50	8627,67	150,98
395	6,58	616,75	5,27	0,33	7,60	8585,54	150,25
400	6,67	618,60	5,33	0,34	7,70	8543,49	149,51
405	6,75	620,43	5,40	0,34	7,79	8501,51	148,78
410	6,83	622,23	5,47	0,35	7,89	8459,60	148,04
415	6,92	624,01	5,53	0,35	7,98	8417,77	147,31
420	7,00	625,78	5,60	0,35	8,08	8376,01	146,58
425	7,08	627,52	5,67	0,36	8,18	8334,32	145,85
430	7,17	629,24	5,73	0,36	8,27	8292,71	145,12
435	7,25	630,94	5,80	0,37	8,37	8251,17	144,40
440	7,33	632,63	5,87	0,37	8,46	8209,71	143,67
445	7,42	634,29	5,93	0,38	8,56	8168,31	142,95
450	7,50	635,94	6,00	0,38	8,65	8127,00	142,22
455	7,58	637,57	6,07	0,38	8,75	8085,75	141,50
460	7,67	639,18	6,13	0,39	8,85	8044,58	140,78
465	7,75	640,77	6,20	0,39	8,94	8003,48	140,06
470	7,83	642,35	6,27	0,40	9,04	7962,46	139,34
475	7,92	643,91	6,33	0,40	9,13	7921,50	138,63
480	8,00	645,46	6,40	0,40	9,23	7880,63	137,91
485	8,08	646,98	6,47	0,41	9,33	7839,82	137,20
490	8,17	648,50	6,53	0,41	9,42	7799,09	136,48
495	8,25	650,00	6,60	0,42	9,52	7758,43	135,77
500	8,33	651,48	6,67	0,42	9,61	7717,85	135,06
505	8,42	652,95	6,73	0,43	9,71	7677,34	134,35
510	8,50	654,40	6,80	0,43	9,80	7636,90	133,65
515	8,58	655,84	6,87	0,43	9,90	7596,54	132,94
520	8,67	657,27	6,93	0,44	10,00	7556,25	132,23
525	8,75	658,68	7,00	0,44	10,09	7516,03	131,53
530	8,83	660,08	7,07	0,45	10,19	7475,89	130,83

Čas	Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků				
			Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost	
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Ra,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
535	8,92	661,47	7,13	0,45	10,28	7435,82	130,13
540	9,00	662,85	7,20	0,45	10,38	7395,83	129,43
545	9,08	664,21	7,27	0,46	10,48	7355,90	128,73
550	9,17	665,56	7,33	0,46	10,57	7316,05	128,03
555	9,25	666,90	7,40	0,47	10,67	7276,28	127,33
560	9,33	668,22	7,47	0,47	10,76	7236,58	126,64
565	9,42	669,54	7,53	0,48	10,86	7196,95	125,95
570	9,50	670,84	7,60	0,48	10,95	7157,39	125,25
575	9,58	672,13	7,67	0,48	11,05	7117,91	124,56
580	9,67	673,41	7,73	0,49	11,15	7078,50	123,87
585	9,75	674,68	7,80	0,49	11,24	7039,17	123,19
590	9,83	675,94	7,87	0,50	11,34	6999,91	122,50
595	9,92	677,19	7,93	0,50	11,43	6960,72	121,81
600	10,00	678,43	8,00	0,50	11,53	6921,60	121,13
605	10,08	679,66	8,07	0,51	11,63	6882,56	120,44
610	10,17	680,87	8,13	0,51	11,72	6843,60	119,76
615	10,25	682,08	8,20	0,52	11,82	6804,70	119,08
620	10,33	683,28	8,27	0,52	11,91	6765,88	118,40
625	10,42	684,47	8,33	0,53	12,01	6727,13	117,72
630	10,50	685,65	8,40	0,53	12,10	6688,46	117,05
635	10,58	686,82	8,47	0,53	12,20	6649,86	116,37
640	10,67	687,98	8,53	0,54	12,30	6611,33	115,70
645	10,75	689,13	8,60	0,54	12,39	6572,88	115,03
650	10,83	690,28	8,67	0,55	12,49	6534,50	114,35
655	10,92	691,41	8,73	0,55	12,58	6496,19	113,68
660	11,00	692,54	8,80	0,55	12,68	6457,96	113,01
665	11,08	693,66	8,87	0,56	12,78	6419,80	112,35
670	11,17	694,77	8,93	0,56	12,87	6381,72	111,68
675	11,25	695,87	9,00	0,57	12,97	6343,70	111,01
680	11,33	696,96	9,07	0,57	13,06	6305,77	110,35
685	11,42	698,05	9,13	0,58	13,16	6267,90	109,69
690	11,50	699,13	9,20	0,58	13,25	6230,11	109,03
695	11,58	700,20	9,27	0,58	13,35	6192,39	108,37
700	11,67	701,26	9,33	0,59	13,45	6154,75	107,71
705	11,75	702,31	9,40	0,59	13,54	6117,17	107,05
715	11,92	704,40	9,53	0,60	13,73	6042,25	105,74
720	12,00	705,44	9,60	0,60	13,83	6004,90	105,09

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
710	11,83	703,36	9,47	0,60	13,64	6079,68	106,39
725	12,08	706,46	9,67	0,61	13,93	5967,62	104,43
730	12,17	707,48	9,73	0,61	14,02	5930,42	103,78
735	12,25	708,49	9,80	0,62	14,12	5893,29	103,13
740	12,33	709,50	9,87	0,62	14,21	5856,23	102,48
745	12,42	710,50	9,93	0,63	14,31	5819,25	101,84
750	12,50	711,49	10,00	0,63	14,40	5782,34	101,19
755	12,58	712,48	10,07	0,63	14,50	5745,50	100,55
760	12,67	713,46	10,13	0,64	14,60	5708,74	99,90
765	12,75	714,43	10,20	0,64	14,69	5672,05	99,26
770	12,83	715,40	10,27	0,65	14,79	5635,43	98,62
775	12,92	716,36	10,33	0,65	14,88	5598,89	97,98
780	13,00	717,31	10,40	0,65	14,98	5562,42	97,34
785	13,08	718,26	10,47	0,66	15,08	5526,02	96,71
790	13,17	719,20	10,53	0,66	15,17	5489,70	96,07
795	13,25	720,14	10,60	0,67	15,27	5453,45	95,44
800	13,33	721,07	10,67	0,67	15,36	5417,28	94,80
805	13,42	721,99	10,73	0,68	15,46	5381,17	94,17
810	13,50	722,91	10,80	0,68	15,55	5345,15	93,54
815	13,58	723,83	10,87	0,68	15,65	5309,19	92,91
820	13,67	724,73	10,93	0,69	15,75	5273,31	92,28
825	13,75	725,64	11,00	0,69	15,84	5237,50	91,66
830	13,83	726,53	11,07	0,70	15,94	5201,77	91,03
835	13,92	727,43	11,13	0,70	16,03	5166,10	90,41
840	14,00	728,31	11,20	0,70	16,13	5130,52	89,78
845	14,08	729,19	11,27	0,71	16,23	5095,00	89,16
850	14,17	730,07	11,33	0,71	16,32	5059,56	88,54
855	14,25	730,94	11,40	0,72	16,42	5024,19	87,92
860	14,33	731,81	11,47	0,72	16,51	4988,90	87,31
865	14,42	732,67	11,53	0,73	16,61	4953,68	86,69
870	14,50	733,52	11,60	0,73	16,70	4918,53	86,07
875	14,58	734,38	11,67	0,73	16,80	4883,46	85,46
880	14,67	735,22	11,73	0,74	16,90	4848,46	84,85
885	14,75	736,06	11,80	0,74	16,99	4813,53	84,24
890	14,83	736,90	11,87	0,75	17,09	4778,68	83,63
895	14,92	737,73	11,93	0,75	17,18	4743,90	83,02
900	15,00	738,56	12,00	0,75	17,28	4709,20	82,41



Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Ra,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
905	15,08	739,38	12,07	0,76	17,38	4674,56	81,80
910	15,17	740,20	12,13	0,76	17,47	4640,00	81,20
915	15,25	741,02	12,20	0,77	17,57	4605,52	80,60
920	15,33	741,83	12,27	0,77	17,66	4571,11	79,99
925	15,42	742,63	12,33	0,78	17,76	4536,77	79,39
930	15,50	743,43	12,40	0,78	17,85	4502,50	78,79
935	15,58	744,23	12,47	0,78	17,95	4468,31	78,20
940	15,67	745,02	12,53	0,79	18,05	4434,19	77,60
945	15,75	745,81	12,60	0,79	18,14	4400,15	77,00
950	15,83	746,60	12,67	0,80	18,24	4366,18	76,41
955	15,92	747,38	12,73	0,80	18,33	4332,28	75,81
960	16,00	748,15	12,80	0,80	18,43	4298,45	75,22
965	16,08	748,93	12,87	0,81	18,53	4264,70	74,63
970	16,17	749,69	12,93	0,81	18,62	4231,03	74,04
975	16,25	750,46	13,00	0,82	18,72	4197,42	73,45
980	16,33	751,22	13,07	0,82	18,81	4163,89	72,87
985	16,42	751,98	13,13	0,83	18,91	4130,43	72,28
990	16,50	752,73	13,20	0,83	19,00	4097,05	71,70
995	16,58	753,48	13,27	0,83	19,10	4063,74	71,12
1000	16,67	754,22	13,33	0,84	19,20	4030,50	70,53
1005	16,75	754,97	13,40	0,84	19,29	3997,34	69,95
1010	16,83	755,70	13,47	0,85	19,39	3964,25	69,37
1015	16,92	756,44	13,53	0,85	19,48	3931,23	68,80
1020	17,00	757,17	13,60	0,85	19,58	3898,29	68,22
1025	17,08	757,90	13,67	0,86	19,68	3865,42	67,64
1030	17,17	758,62	13,73	0,86	19,77	3832,63	67,07
1035	17,25	759,34	13,80	0,87	19,87	3799,90	66,50
1040	17,33	760,06	13,87	0,87	19,96	3767,26	65,93
1045	17,42	760,77	13,93	0,88	20,06	3734,68	65,36
1050	17,50	761,48	14,00	0,88	20,15	3702,18	64,79
1055	17,58	762,19	14,07	0,88	20,25	3669,75	64,22
1060	17,67	762,89	14,13	0,89	20,35	3637,40	63,65
1065	17,75	763,59	14,20	0,89	20,44	3605,11	63,09
1070	17,83	764,29	14,27	0,90	20,54	3572,91	62,53
1075	17,92	764,98	14,33	0,90	20,63	3540,77	61,96
1080	18,00	765,67	14,40	0,90	20,73	3508,71	61,40
1085	18,08	766,36	14,47	0,91	20,83	3476,72	60,84

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Ra,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
1090	18,17	767,04	14,53	0,91	20,92	3444,81	60,28
1095	18,25	767,72	14,60	0,92	21,02	3412,97	59,73
1100	18,33	768,40	14,67	0,92	21,11	3381,20	59,17
1105	18,42	769,08	14,73	0,93	21,21	3349,51	58,62
1110	18,50	769,75	14,80	0,93	21,30	3317,89	58,06
1115	18,58	770,42	14,87	0,93	21,40	3286,34	57,51
1120	18,67	771,08	14,93	0,94	21,50	3254,87	56,96
1125	18,75	771,75	15,00	0,94	21,59	3223,47	56,41
1130	18,83	772,41	15,07	0,95	21,69	3192,14	55,86
1135	18,92	773,06	15,13	0,95	21,78	3160,89	55,32
1140	19,00	773,72	15,20	0,95	21,88	3129,71	54,77
1145	19,08	774,37	15,27	0,96	21,98	3098,60	54,23
1150	19,17	775,02	15,33	0,96	22,07	3067,57	53,68
1155	19,25	775,66	15,40	0,97	22,17	3036,61	53,14
1160	19,33	776,31	15,47	0,97	22,26	3005,73	52,60
1165	19,42	776,95	15,53	0,98	22,36	2974,91	52,06
1170	19,50	777,59	15,60	0,98	22,45	2944,18	51,52
1175	19,58	778,22	15,67	0,98	22,55	2913,51	50,99
1180	19,67	778,85	15,73	0,99	22,65	2882,92	50,45
1185	19,75	779,48	15,80	0,99	22,74	2852,40	49,92
1190	19,83	780,11	15,87	1,00	22,84	2821,96	49,38
1195	19,92	780,73	15,93	1,00	22,93	2791,58	48,85
1200	20,00	781,35	16,00	1,00	23,00	2770,50	48,48
1205	20,08	781,97	16,07	1,00	23,07	2749,45	48,12
1210	20,17	782,59	16,13	1,00	23,13	2728,44	47,75
1215	20,25	783,20	16,20	1,00	23,20	2707,46	47,38
1220	20,33	783,82	16,27	1,00	23,27	2686,52	47,01
1225	20,42	784,43	16,33	1,00	23,33	2665,61	46,65
1230	20,50	785,03	16,40	1,00	23,40	2644,74	46,28
1235	20,58	785,64	16,47	1,00	23,47	2623,90	45,92
1240	20,67	786,24	16,53	1,00	23,53	2603,10	45,55
1245	20,75	786,84	16,60	1,00	23,60	2582,34	45,19
1250	20,83	787,43	16,67	1,00	23,67	2561,61	44,83
1255	20,92	788,03	16,73	1,00	23,73	2540,92	44,47
1260	21,00	788,62	16,80	1,00	23,80	2520,26	44,10
1265	21,08	789,21	16,87	1,00	23,87	2499,64	43,74
1270	21,17	789,80	16,93	1,00	23,93	2479,05	43,38

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
1275	21,25	790,38	17,00	1,00	24,00	2458,50	43,02
1280	21,33	790,97	17,07	1,00	24,07	2437,98	42,66
1285	21,42	791,55	17,13	1,00	24,13	2417,50	42,31
1290	21,50	792,13	17,20	1,00	24,20	2397,06	41,95
1295	21,58	792,70	17,27	1,00	24,27	2376,65	41,59
1300	21,67	793,28	17,33	1,00	24,33	2356,28	41,23
1305	21,75	793,85	17,40	1,00	24,40	2335,94	40,88
1310	21,83	794,42	17,47	1,00	24,47	2315,64	40,52
1315	21,92	794,99	17,53	1,00	24,53	2295,37	40,17
1320	22,00	795,55	17,60	1,00	24,60	2275,14	39,81
1325	22,08	796,11	17,67	1,00	24,67	2254,94	39,46
1330	22,17	796,68	17,73	1,00	24,73	2234,78	39,11
1335	22,25	797,23	17,80	1,00	24,80	2214,66	38,76
1340	22,33	797,79	17,87	1,00	24,87	2194,57	38,40
1345	22,42	798,35	17,93	1,00	24,93	2174,52	38,05
1350	22,50	798,90	18,00	1,00	25,00	2154,50	37,70
1355	22,58	799,45	18,07	1,00	25,07	2134,52	37,35
1360	22,67	800,00	18,13	1,00	25,13	2114,57	37,00
1365	22,75	800,55	18,20	1,00	25,20	2094,66	36,66
1370	22,83	801,09	18,27	1,00	25,27	2074,78	36,31
1375	22,92	801,63	18,33	1,00	25,33	2054,94	35,96
1380	23,00	802,17	18,40	1,00	25,40	2035,14	35,61
1385	23,08	802,71	18,47	1,00	25,47	2015,37	35,27
1390	23,17	803,25	18,53	1,00	25,53	1995,64	34,92
1395	23,25	803,79	18,60	1,00	25,60	1975,94	34,58
1400	23,33	804,32	18,67	1,00	25,67	1956,28	34,23
1405	23,42	804,85	18,73	1,00	25,73	1936,65	33,89
1410	23,50	805,38	18,80	1,00	25,80	1917,06	33,55
1415	23,58	805,91	18,87	1,00	25,87	1897,50	33,21
1420	23,67	806,43	18,93	1,00	25,93	1877,98	32,86
1425	23,75	806,96	19,00	1,00	26,00	1858,50	32,52
1430	23,83	807,48	19,07	1,00	26,07	1839,05	32,18
1435	23,92	808,00	19,13	1,00	26,13	1819,64	31,84
1440	24,00	808,52	19,20	1,00	26,20	1800,26	31,50
1445	24,08	809,03	19,27	1,00	26,27	1780,92	31,17
1450	24,17	809,55	19,33	1,00	26,33	1761,61	30,83
1455	24,25	810,06	19,40	1,00	26,40	1742,34	30,49

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
1460	24,33	810,57	19,47	1,00	26,47	1723,10	30,15
1465	24,42	811,08	19,53	1,00	26,53	1703,90	29,82
1470	24,50	811,59	19,60	1,00	26,60	1684,74	29,48
1475	24,58	812,10	19,67	1,00	26,67	1665,61	29,15
1480	24,67	812,60	19,73	1,00	26,73	1646,52	28,81
1485	24,75	813,10	19,80	1,00	26,80	1627,46	28,48
1490	24,83	813,61	19,87	1,00	26,87	1608,44	28,15
1495	24,92	814,10	19,93	1,00	26,93	1589,45	27,82
1500	25,00	814,60	20,00	1,00	27,00	1570,50	27,48
1505	25,08	815,10	20,10	1,00	27,10	1542,14	26,99
1510	25,17	815,59	20,20	1,00	27,20	1513,86	26,49
1515	25,25	816,09	20,30	1,00	27,30	1485,66	26,00
1520	25,33	816,58	20,40	1,00	27,40	1457,54	25,51
1525	25,42	817,07	20,50	1,00	27,50	1429,50	25,02
1530	25,50	817,56	20,60	1,00	27,60	1401,54	24,53
1535	25,58	818,04	20,70	1,00	27,70	1373,66	24,04
1540	25,67	818,53	20,80	1,00	27,80	1345,86	23,55
1545	25,75	819,01	20,90	1,00	27,90	1318,14	23,07
1550	25,83	819,49	21,00	1,00	28,00	1290,50	22,58
1555	25,92	819,97	21,10	1,00	28,10	1262,94	22,10
1560	26,00	820,45	21,20	1,00	28,20	1235,46	21,62
1565	26,08	820,93	21,30	1,00	28,30	1208,06	21,14
1570	26,17	821,40	21,40	1,00	28,40	1180,74	20,66
1575	26,25	821,88	21,50	1,00	28,50	1153,50	20,19
1580	26,33	822,35	21,60	1,00	28,60	1126,34	19,71
1585	26,42	822,82	21,70	1,00	28,70	1099,26	19,24
1590	26,50	823,29	21,80	1,00	28,80	1072,26	18,76
1595	26,58	823,76	21,90	1,00	28,90	1045,34	18,29
1600	26,67	824,23	22,00	1,00	29,00	1018,50	17,82
1605	26,75	824,69	22,10	1,00	29,10	991,74	17,36
1610	26,83	825,16	22,20	1,00	29,20	965,06	16,89
1615	26,92	825,62	22,30	1,00	29,30	938,46	16,42
1620	27,00	826,08	22,40	1,00	29,40	911,94	15,96
1625	27,08	826,54	22,50	1,00	29,50	885,50	15,50
1630	27,17	827,00	22,60	1,00	29,60	859,14	15,03
1635	27,25	827,45	22,70	1,00	29,70	832,86	14,58
1640	27,33	827,91	22,80	1,00	29,80	806,66	14,12

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Stanovení tahové únosnosti dřevěných prvků			
				Součinitel tloušťky nulové pevnosti	Účinná hloubka zuhelnatění	Redukovaný průřez	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$k_0$	$d_{ef}$	$A_{ef}$	$R_{Ra,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(-)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)
1645	27,42	828,36	22,90	1,00	29,90	780,54	13,66
1650	27,50	828,82	23,00	1,00	30,00	754,50	13,20
1655	27,58	829,27	23,10	1,00	30,10	728,54	12,75
1660	27,67	829,72	23,20	1,00	30,20	702,66	12,30
1665	27,75	830,17	23,30	1,00	30,30	676,86	11,85
1670	27,83	830,61	23,40	1,00	30,40	651,14	11,39
1675	27,92	831,06	23,50	1,00	30,50	625,50	10,95
1680	28,00	831,50	23,60	1,00	30,60	599,94	10,50
1685	28,08	831,95	23,70	1,00	30,70	574,46	10,05
1690	28,17	832,39	23,80	1,00	30,80	549,06	9,61
1695	28,25	832,83	23,90	1,00	30,90	523,74	9,17
1700	28,33	833,27	24,00	1,00	31,00	498,50	8,72
1705	28,42	833,71	24,10	1,00	31,10	473,34	8,28
1710	28,50	834,14	24,20	1,00	31,20	448,26	7,84
1715	28,58	834,58	24,30	1,00	31,30	423,26	7,41
1720	28,67	835,01	24,40	1,00	31,40	398,34	6,97
1725	28,75	835,45	24,50	1,00	31,50	373,50	6,54
1730	28,83	835,88	24,60	1,00	31,60	348,74	6,10
1735	28,92	836,31	24,70	1,00	31,70	324,06	5,67
1740	29,00	836,74	24,80	1,00	31,80	299,46	5,24
1745	29,08	837,17	24,90	1,00	31,90	274,94	4,81
1750	29,17	837,59	25,00	1,00	32,00	250,50	4,38
1755	29,25	838,02	25,10	1,00	32,10	226,14	3,96
1760	29,33	838,44	25,20	1,00	32,20	201,86	3,53
1765	29,42	838,87	25,30	1,00	32,30	177,66	3,11
1770	29,50	839,29	25,40	1,00	32,40	153,54	2,69
1775	29,58	839,71	25,50	1,00	32,50	129,50	2,27
1780	29,67	840,13	25,60	1,00	32,60	105,54	1,85
1785	29,75	840,55	25,70	1,00	32,70	81,66	1,43
1790	29,83	840,96	25,80	1,00	32,80	57,86	1,01
1795	29,92	841,38	25,90	1,00	32,90	34,14	0,60
1800	30,00	841,80	26,00	1,00	33,00	10,50	0,18

Přírůstkový výpočet – část 2: přírůstek teploty v ocelovém prvku, I. fáze,  $d_{char} < 20$  mm

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(mm)		
0	0,00	20,00	0,00	439,80	35,00	2,453	0,00
5	0,08	96,54	0,07	439,80	34,93	2,448	0,00
10	0,17	146,95	0,13	439,80	34,87	2,443	0,00
15	0,25	184,61	0,20	439,80	34,80	2,439	0,00
20	0,33	214,67	0,27	439,80	34,73	2,434	0,00
25	0,42	239,70	0,33	439,80	34,67	2,429	0,00
30	0,50	261,14	0,40	439,80	34,60	2,425	0,00
35	0,58	279,90	0,47	439,80	34,53	2,420	0,00
40	0,67	296,56	0,53	439,80	34,47	2,415	0,00
45	0,75	311,56	0,60	439,80	34,40	2,410	0,00
50	0,83	325,19	0,67	439,80	34,33	2,406	0,00
55	0,92	337,68	0,73	439,80	34,27	2,401	0,00
60	1,00	349,21	0,80	439,80	34,20	2,396	0,00
65	1,08	359,92	0,87	439,80	34,13	2,392	0,00
70	1,17	369,91	0,93	439,80	34,07	2,387	0,00
75	1,25	379,28	1,00	439,80	34,00	2,382	0,00
80	1,33	388,10	1,07	439,80	33,93	2,378	0,00
85	1,42	396,42	1,13	439,80	33,87	2,373	0,00
90	1,50	404,31	1,20	439,80	33,80	2,368	0,00
95	1,58	411,80	1,27	439,80	33,73	2,364	0,00
100	1,67	418,94	1,33	439,80	33,67	2,359	0,00
105	1,75	425,75	1,40	439,80	33,60	2,354	0,00
110	1,83	432,27	1,47	439,80	33,53	2,350	0,00
115	1,92	438,51	1,53	439,80	33,47	2,345	0,00
120	2,00	444,50	1,60	439,80	33,40	2,340	0,00
125	2,08	450,27	1,67	439,80	33,33	2,336	0,00
130	2,17	455,82	1,73	439,80	33,27	2,331	0,00
135	2,25	461,17	1,80	439,80	33,20	2,326	0,00
140	2,33	466,34	1,87	439,80	33,13	2,322	0,00
145	2,42	471,33	1,93	439,80	33,07	2,317	0,00
150	2,50	476,17	2,00	439,80	33,00	2,312	0,00
155	2,58	480,85	2,07	439,80	32,93	2,308	0,00
160	2,67	485,39	2,13	439,80	32,87	2,303	0,00
165	2,75	489,80	2,20	439,80	32,80	2,298	0,00
170	2,83	494,08	2,27	439,80	32,73	2,294	0,00
175	2,92	498,24	2,33	439,80	32,67	2,289	0,00
180	3,00	502,29	2,40	439,80	32,60	2,284	0,00

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(mm)		
185	3,08	506,23	2,47	439,80	32,53	2,280	0,00
190	3,17	510,07	2,53	439,80	32,47	2,275	0,00
195	3,25	513,82	2,60	439,80	32,40	2,270	0,00
200	3,33	517,48	2,67	439,80	32,33	2,266	0,00
205	3,42	521,04	2,73	439,80	32,27	2,261	0,00
210	3,50	524,53	2,80	439,80	32,20	2,256	0,00
215	3,58	527,93	2,87	439,80	32,13	2,252	0,00
220	3,67	531,26	2,93	439,80	32,07	2,247	0,00
225	3,75	534,52	3,00	439,80	32,00	2,242	0,00
230	3,83	537,71	3,07	439,80	31,93	2,238	0,00
235	3,92	540,83	3,13	439,80	31,87	2,233	0,00
240	4,00	543,89	3,20	439,80	31,80	2,228	0,00
245	4,08	546,88	3,27	439,80	31,73	2,224	0,00
250	4,17	549,82	3,33	439,80	31,67	2,219	0,00
255	4,25	552,70	3,40	439,80	31,60	2,214	0,00
260	4,33	555,53	3,47	439,80	31,53	2,210	0,00
265	4,42	558,31	3,53	439,80	31,47	2,205	0,00
270	4,50	561,03	3,60	439,80	31,40	2,200	0,00
275	4,58	563,71	3,67	439,80	31,33	2,196	0,00
280	4,67	566,33	3,73	439,80	31,27	2,191	0,00
285	4,75	568,92	3,80	439,80	31,20	2,186	0,01
290	4,83	571,46	3,87	439,81	31,13	2,182	0,03
295	4,92	573,95	3,93	439,83	31,07	2,177	0,04
300	5,00	576,41	4,00	439,86	31,00	2,172	0,06
305	5,08	578,83	4,07	439,90	30,93	2,167	0,08
310	5,17	581,21	4,13	439,95	30,87	2,162	0,09
315	5,25	583,55	4,20	440,02	30,80	2,157	0,11
320	5,33	585,85	4,27	440,09	30,73	2,152	0,12
325	5,42	588,12	4,33	440,18	30,67	2,147	0,14
330	5,50	590,36	4,40	440,28	30,60	2,142	0,15
335	5,58	592,56	4,47	440,38	30,53	2,137	0,16
340	5,67	594,73	4,53	440,50	30,47	2,132	0,18
345	5,75	596,87	4,60	440,62	30,40	2,126	0,19
350	5,83	598,98	4,67	440,76	30,33	2,121	0,20
355	5,92	601,07	4,73	440,90	30,27	2,116	0,22
360	6,00	603,12	4,80	441,05	30,20	2,110	0,23
365	6,08	605,14	4,87	441,21	30,13	2,105	0,24
370	6,17	607,14	4,93	441,38	30,07	2,099	0,25
375	6,25	609,11	5,00	441,56	30,00	2,094	0,26

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(mm)		
380	6,33	611,06	5,07	441,74	29,93	2,088	0,28
385	6,42	612,98	5,13	441,93	29,87	2,083	0,29
390	6,50	614,88	5,20	442,13	29,80	2,077	0,30
395	6,58	616,75	5,27	442,34	29,73	2,072	0,31
400	6,67	618,60	5,33	442,56	29,67	2,066	0,32
405	6,75	620,43	5,40	442,78	29,60	2,060	0,33
410	6,83	622,23	5,47	443,01	29,53	2,054	0,34
415	6,92	624,01	5,53	443,25	29,47	2,049	0,35
420	7,00	625,78	5,60	443,49	29,40	2,043	0,36
425	7,08	627,52	5,67	443,74	29,33	2,037	0,37
430	7,17	629,24	5,73	443,99	29,27	2,031	0,38
435	7,25	630,94	5,80	444,26	29,20	2,026	0,39
440	7,33	632,63	5,87	444,52	29,13	2,020	0,40
445	7,42	634,29	5,93	444,80	29,07	2,014	0,41
450	7,50	635,94	6,00	445,08	29,00	2,008	0,42
455	7,58	637,57	6,07	445,36	28,93	2,002	0,43
460	7,67	639,18	6,13	445,65	28,87	1,996	0,44
465	7,75	640,77	6,20	445,95	28,80	1,990	0,44
470	7,83	642,35	6,27	446,25	28,73	1,984	0,45
475	7,92	643,91	6,33	446,56	28,67	1,978	0,46
480	8,00	645,46	6,40	446,87	28,60	1,972	0,47
485	8,08	646,98	6,47	447,19	28,53	1,966	0,48
490	8,17	648,50	6,53	447,51	28,47	1,960	0,49
495	8,25	650,00	6,60	447,84	28,40	1,954	0,49
500	8,33	651,48	6,67	448,17	28,33	1,948	0,50
505	8,42	652,95	6,73	448,51	28,27	1,942	0,51
510	8,50	654,40	6,80	448,85	28,20	1,936	0,52
515	8,58	655,84	6,87	449,20	28,13	1,930	0,53
520	8,67	657,27	6,93	449,54	28,07	1,924	0,53
525	8,75	658,68	7,00	449,90	28,00	1,918	0,54
530	8,83	660,08	7,07	450,26	27,93	1,912	0,55
535	8,92	661,47	7,13	450,62	27,87	1,906	0,55
540	9,00	662,85	7,20	450,98	27,80	1,900	0,56
545	9,08	664,21	7,27	451,35	27,73	1,894	0,57
550	9,17	665,56	7,33	451,73	27,67	1,887	0,58
555	9,25	666,90	7,40	452,11	27,60	1,881	0,58
560	9,33	668,22	7,47	452,49	27,53	1,875	0,59
565	9,42	669,54	7,53	452,87	27,47	1,869	0,60
570	9,50	670,84	7,60	453,26	27,40	1,863	0,60



Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(mm)		
575	9,58	672,13	7,67	453,65	27,33	1,857	0,61
580	9,67	673,41	7,73	454,04	27,27	1,851	0,62
585	9,75	674,68	7,80	454,44	27,20	1,845	0,62
590	9,83	675,94	7,87	454,84	27,13	1,838	0,63
595	9,92	677,19	7,93	455,25	27,07	1,832	0,64
600	10,00	678,43	8,00	455,65	27,00	1,826	0,64
605	10,08	679,66	8,07	456,06	26,93	1,820	0,65
610	10,17	680,87	8,13	456,48	26,87	1,814	0,66
615	10,25	682,08	8,20	456,89	26,80	1,808	0,66
620	10,33	683,28	8,27	457,31	26,73	1,802	0,67
625	10,42	684,47	8,33	457,73	26,67	1,795	0,67
630	10,50	685,65	8,40	458,15	26,60	1,789	0,68
635	10,58	686,82	8,47	458,58	26,53	1,783	0,69
640	10,67	687,98	8,53	459,01	26,47	1,777	0,69
645	10,75	689,13	8,60	459,44	26,40	1,771	0,70
650	10,83	690,28	8,67	459,87	26,33	1,765	0,70
655	10,92	691,41	8,73	460,31	26,27	1,759	0,71
660	11,00	692,54	8,80	460,75	26,20	1,752	0,72
665	11,08	693,66	8,87	461,19	26,13	1,746	0,72
670	11,17	694,77	8,93	461,63	26,07	1,740	0,73
675	11,25	695,87	9,00	462,07	26,00	1,734	0,73
680	11,33	696,96	9,07	462,52	25,93	1,728	0,74
685	11,42	698,05	9,13	462,97	25,87	1,722	0,74
690	11,50	699,13	9,20	463,42	25,80	1,716	0,75
695	11,58	700,20	9,27	463,87	25,73	1,710	0,75
700	11,67	701,26	9,33	464,32	25,67	1,704	0,76
705	11,75	702,31	9,40	464,78	25,60	1,697	0,77
710	11,83	703,36	9,47	465,24	25,53	1,691	0,77
715	11,92	704,40	9,53	465,69	25,47	1,685	0,78
720	12,00	705,44	9,60	466,15	25,40	1,679	0,78
725	12,08	706,46	9,67	466,62	25,33	1,673	0,79
730	12,17	707,48	9,73	467,08	25,27	1,667	0,79
735	12,25	708,49	9,80	467,55	25,20	1,661	0,80
740	12,33	709,50	9,87	468,01	25,13	1,655	0,80
745	12,42	710,50	9,93	468,48	25,07	1,649	0,81
750	12,50	711,49	10,00	468,95	25,00	1,643	0,81
755	12,58	712,48	10,07	469,42	24,93	1,637	0,82
760	12,67	713,46	10,13	469,89	24,87	1,631	0,82
765	12,75	714,43	10,20	470,37	24,80	1,625	0,83

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(mm)		
770	12,83	715,40	10,27	470,84	24,73	1,619	0,83
775	12,92	716,36	10,33	471,32	24,67	1,613	0,84
780	13,00	717,31	10,40	471,79	24,60	1,607	0,84
785	13,08	718,26	10,47	472,27	24,53	1,601	0,85
790	13,17	719,20	10,53	472,75	24,47	1,595	0,85
795	13,25	720,14	10,60	473,23	24,40	1,589	0,86
800	13,33	721,07	10,67	473,71	24,33	1,583	0,86
805	13,42	721,99	10,73	474,19	24,27	1,577	0,87
810	13,50	722,91	10,80	474,67	24,20	1,571	0,87
815	13,58	723,83	10,87	475,16	24,13	1,565	0,88
820	13,67	724,73	10,93	475,64	24,07	1,559	0,88
825	13,75	725,64	11,00	476,13	24,00	1,553	0,89
830	13,83	726,53	11,07	476,61	23,93	1,548	0,89
835	13,92	727,43	11,13	477,10	23,87	1,542	0,90
840	14,00	728,31	11,20	477,59	23,80	1,536	0,90
845	14,08	729,19	11,27	478,08	23,73	1,530	0,90
850	14,17	730,07	11,33	478,56	23,67	1,524	0,91
855	14,25	730,94	11,40	479,05	23,60	1,518	0,91
860	14,33	731,81	11,47	479,54	23,53	1,512	0,92
865	14,42	732,67	11,53	480,03	23,47	1,507	0,92
870	14,50	733,52	11,60	480,53	23,40	1,501	0,93
875	14,58	734,38	11,67	481,02	23,33	1,495	0,93
880	14,67	735,22	11,73	481,51	23,27	1,489	0,94
885	14,75	736,06	11,80	482,00	23,20	1,483	0,94
890	14,83	736,90	11,87	482,50	23,13	1,478	0,95
895	14,92	737,73	11,93	482,99	23,07	1,472	0,95
900	15,00	738,56	12,00	483,48	23,00	1,466	0,96
905	15,08	739,38	12,07	483,98	22,93	1,460	0,96
910	15,17	740,20	12,13	484,47	22,87	1,455	0,96
915	15,25	741,02	12,20	484,97	22,80	1,449	0,97
920	15,33	741,83	12,27	485,46	22,73	1,443	0,97
925	15,42	742,63	12,33	485,96	22,67	1,437	0,98
930	15,50	743,43	12,40	486,45	22,60	1,432	0,98
935	15,58	744,23	12,47	486,95	22,53	1,426	0,99
940	15,67	745,02	12,53	487,45	22,47	1,420	0,99
945	15,75	745,81	12,60	487,94	22,40	1,415	1,00
950	15,83	746,60	12,67	488,44	22,33	1,409	1,00
955	15,92	747,38	12,73	488,94	22,27	1,403	1,00
960	16,00	748,15	12,80	489,43	22,20	1,398	1,01

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(mm)		
965	16,08	748,93	12,87	489,93	22,13	1,392	1,01
970	16,17	749,69	12,93	490,43	22,07	1,387	1,02
975	16,25	750,46	13,00	490,93	22,00	1,381	1,02
980	16,33	751,22	13,07	491,42	21,93	1,375	1,03
985	16,42	751,98	13,13	491,92	21,87	1,370	1,03
990	16,50	752,73	13,20	492,42	21,80	1,364	1,03
995	16,58	753,48	13,27	492,92	21,73	1,359	1,04
1000	16,67	754,22	13,33	493,42	21,67	1,353	1,04
1005	16,75	754,97	13,40	493,91	21,60	1,348	1,05
1010	16,83	755,70	13,47	494,41	21,53	1,342	1,05
1015	16,92	756,44	13,53	494,91	21,47	1,337	1,06
1020	17,00	757,17	13,60	495,41	21,40	1,331	1,06
1025	17,08	757,90	13,67	495,90	21,33	1,326	1,06
1030	17,17	758,62	13,73	496,40	21,27	1,320	1,07
1035	17,25	759,34	13,80	496,90	21,20	1,315	1,07
1040	17,33	760,06	13,87	497,40	21,13	1,309	1,08
1045	17,42	760,77	13,93	497,90	21,07	1,304	1,08
1050	17,50	761,48	14,00	498,39	21,00	1,299	1,09
1055	17,58	762,19	14,07	498,89	20,93	1,293	1,09
1060	17,67	762,89	14,13	499,39	20,87	1,288	1,09
1065	17,75	763,59	14,20	499,89	20,80	1,282	1,10
1070	17,83	764,29	14,27	500,38	20,73	1,277	1,10
1075	17,92	764,98	14,33	500,88	20,67	1,272	1,11
1080	18,00	765,67	14,40	501,38	20,60	1,266	1,11
1085	18,08	766,36	14,47	501,87	20,53	1,261	1,12
1090	18,17	767,04	14,53	502,37	20,47	1,256	1,12
1095	18,25	767,72	14,60	502,87	20,40	1,250	1,12
1100	18,33	768,40	14,67	503,36	20,33	1,245	1,13
1105	18,42	769,08	14,73	503,86	20,27	1,240	1,13
1110	18,50	769,75	14,80	504,35	20,20	1,234	1,14
1115	18,58	770,42	14,87	504,85	20,13	1,229	1,14
1120	18,67	771,08	14,93	505,35	20,07	1,224	1,15
1125	18,75	771,75	15,00	505,84	20,00	1,218	1,15
1130	18,83	772,41	15,07	506,34	19,93	1,213	1,15
1135	18,92	773,06	15,13	506,83	19,87	1,208	1,16
1140	19,00	773,72	15,20	507,33	19,80	1,203	1,16
1145	19,08	774,37	15,27	507,82	19,73	1,198	1,17
1150	19,17	775,02	15,33	508,32	19,67	1,192	1,17
1155	19,25	775,66	15,40	508,81	19,60	1,187	1,18

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	(mm)		
1160	19,33	776,31	15,47	509,31	19,53	1,182	1,18
1165	19,42	776,95	15,53	509,80	19,47	1,177	1,18
1170	19,50	777,59	15,60	510,29	19,40	1,172	1,19
1175	19,58	778,22	15,67	510,79	19,33	1,166	1,19
1180	19,67	778,85	15,73	511,28	19,27	1,161	1,20
1185	19,75	779,48	15,80	511,78	19,20	1,156	1,20
1190	19,83	780,11	15,87	512,27	19,13	1,151	1,21
1195	19,92	780,73	15,93	512,76	19,07	1,146	1,21
1200	20,00	781,35	16,00	513,26	19,00	1,141	1,21
1205	20,08	781,97	16,07	513,75	18,93	1,136	1,22
1210	20,17	782,59	16,13	514,24	18,87	1,131	1,22
1215	20,25	783,20	16,20	514,73	18,80	1,126	1,23
1220	20,33	783,82	16,27	515,23	18,73	1,121	1,23
1225	20,42	784,43	16,33	515,72	18,67	1,115	1,24
1230	20,50	785,03	16,40	516,21	18,60	1,110	1,24
1235	20,58	785,64	16,47	516,70	18,53	1,105	1,25
1240	20,67	786,24	16,53	517,20	18,47	1,100	1,25
1245	20,75	786,84	16,60	517,69	18,40	1,095	1,25
1250	20,83	787,43	16,67	518,18	18,33	1,090	1,26
1255	20,92	788,03	16,73	518,67	18,27	1,085	1,26
1260	21,00	788,62	16,80	519,16	18,20	1,080	1,27
1265	21,08	789,21	16,87	519,66	18,13	1,075	1,27
1270	21,17	789,80	16,93	520,15	18,07	1,070	1,28
1275	21,25	790,38	17,00	520,64	18,00	1,065	1,28
1280	21,33	790,97	17,07	521,13	17,93	1,061	1,28
1285	21,42	791,55	17,13	521,62	17,87	1,056	1,29
1290	21,50	792,13	17,20	522,12	17,80	1,051	1,29
1295	21,58	792,70	17,27	522,61	17,73	1,046	1,30
1300	21,67	793,28	17,33	523,10	17,67	1,041	1,30
1305	21,75	793,85	17,40	523,59	17,60	1,036	1,31
1310	21,83	794,42	17,47	524,08	17,53	1,031	1,31
1315	21,92	794,99	17,53	524,58	17,47	1,026	1,32
1320	22,00	795,55	17,60	525,07	17,40	1,021	1,32
1325	22,08	796,11	17,67	525,56	17,33	1,016	1,32
1330	22,17	796,68	17,73	526,05	17,27	1,012	1,33
1335	22,25	797,23	17,80	526,55	17,20	1,007	1,33
1340	22,33	797,79	17,87	527,04	17,13	1,002	1,34
1345	22,42	798,35	17,93	527,53	17,07	0,997	1,34
1350	22,50	798,90	18,00	528,03	17,00	0,992	1,35

Čas		Teplota plynů	Hloubka zuhelnatění	Přírůstek teploty chráněného ocelového prvku			
				Měrné teplo oceli	Tloušťka dřeva	$\varphi$	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$c_a$	$d_p$		(-)
(s)	(min)	(°C)	(mm)	( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	(mm)		
1355	22,58	799,45	18,07	528,52	16,93	0,987	1,35
1360	22,67	800,00	18,13	529,01	16,87	0,983	1,36
1365	22,75	800,55	18,20	529,51	16,80	0,978	1,36
1370	22,83	801,09	18,27	530,00	16,73	0,973	1,37
1375	22,92	801,63	18,33	530,50	16,67	0,968	1,37
1380	23,00	802,17	18,40	530,99	16,60	0,963	1,37
1385	23,08	802,71	18,47	531,49	16,53	0,959	1,38
1390	23,17	803,25	18,53	531,99	16,47	0,954	1,38
1395	23,25	803,79	18,60	532,48	16,40	0,949	1,39
1400	23,33	804,32	18,67	532,98	16,33	0,944	1,39
1405	23,42	804,85	18,73	533,48	16,27	0,940	1,40
1410	23,50	805,38	18,80	533,97	16,20	0,935	1,40
1415	23,58	805,91	18,87	534,47	16,13	0,930	1,41
1420	23,67	806,43	18,93	534,97	16,07	0,926	1,41
1425	23,75	806,96	19,00	535,47	16,00	0,921	1,42
1430	23,83	807,48	19,07	535,97	15,93	0,916	1,42
1435	23,92	808,00	19,13	536,48	15,87	0,911	1,43
1440	24,00	808,52	19,20	536,98	15,80	0,907	1,43
1445	24,08	809,03	19,27	537,48	15,73	0,902	1,44
1450	24,17	809,55	19,33	537,98	15,67	0,897	1,44
1455	24,25	810,06	19,40	538,49	15,60	0,893	1,45
1460	24,33	810,57	19,47	538,99	15,53	0,888	1,45
1465	24,42	811,08	19,53	539,50	15,47	0,884	1,46
1470	24,50	811,59	19,60	540,01	15,40	0,879	1,46
1475	24,58	812,10	19,67	540,52	15,33	0,874	1,47
1480	24,67	812,60	19,73	541,02	15,27	0,870	1,47
1485	24,75	813,10	19,80	541,54	15,20	0,865	1,47
1490	24,83	813,61	19,87	542,05	15,13	0,860	1,48
1495	24,92	814,10	19,93	542,56	15,07	0,856	1,48

Přírůstkový výpočet – část 3: přírůstek teploty v ocelovém prvku, II. fáze,  $d_{char} \geq 20$  mm

Čas		Teplota plynů v okolí	Přírůstek teploty exponovaného ocelového prvku				
			Hloubka zuhelnatění	Exponovaný obvod	Součinitel průřezu	Celkový tepelný tok	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$A_m$	$A_m/V$	$h_{net,c}$	$\Delta\theta_{a,t}$
(s)	(min)	(mm)	(mm)	(m)	( $m^{-1}$ )	( $W \cdot m^{-2}$ )	( $^{\circ}C$ )
1505	25,08	814,60	20,00	0,160	173,25	14099,810	13,45
1510	25,17	815,10	20,10	0,163	176,65	13775,998	13,49
1515	25,25	815,59	20,20	0,166	180,04	13451,188	13,51
1520	25,33	816,09	20,30	0,170	183,44	13125,665	13,53
1525	25,42	816,58	20,40	0,173	186,84	12799,735	13,53
1530	25,50	817,07	20,50	0,176	190,23	12473,729	13,52
1535	25,58	817,56	20,60	0,179	193,63	12147,997	13,49
1540	25,67	818,04	20,70	0,182	197,03	11822,906	13,45
1545	25,75	818,53	20,80	0,186	200,42	11498,840	13,39
1550	25,83	819,01	20,90	0,189	203,82	11176,195	13,31
1555	25,92	819,49	21,00	0,192	207,22	10855,375	13,22
1560	26,00	819,97	21,10	0,195	210,62	10536,793	13,11
1565	26,08	820,45	21,20	0,198	214,01	10220,859	12,99
1570	26,17	820,93	21,30	0,202	217,41	9907,983	12,85
1575	26,25	821,40	21,40	0,205	220,81	9598,567	12,70
1580	26,33	821,88	21,50	0,208	224,20	9293,002	12,52
1585	26,42	822,35	21,60	0,211	227,60	8991,663	12,34
1590	26,50	822,82	21,70	0,214	231,00	8694,906	12,14
1595	26,58	823,29	21,80	0,218	234,39	8403,066	11,93
1600	26,67	823,76	21,90	0,221	237,79	8116,452	11,71
1605	26,75	824,23	22,00	0,224	241,19	7835,344	11,48
1610	26,83	824,69	22,10	0,227	244,59	7559,995	11,24
1615	26,92	825,16	22,20	0,230	247,98	7290,627	10,99
1620	27,00	825,62	22,30	0,234	251,38	7027,430	10,73
1625	27,08	826,08	22,40	0,237	254,78	6770,565	10,47
1630	27,17	826,54	22,50	0,240	258,17	6520,159	10,21
1635	27,25	827,00	22,60	0,243	261,57	6276,313	9,94
1640	27,33	827,45	22,70	0,246	264,97	6039,096	9,68
1645	27,42	827,91	22,80	0,250	268,37	5808,554	9,41
1650	27,50	828,36	22,90	0,253	271,76	5584,704	9,16
1655	27,58	828,82	23,00	0,256	275,16	5366,909	8,93
1660	27,67	829,27	23,10	0,259	278,56	5154,789	8,69
1665	27,75	829,72	23,20	0,262	281,95	4948,653	8,44
1670	27,83	830,17	23,30	0,266	285,35	4748,810	8,18
1675	27,92	830,61	23,40	0,269	288,75	4555,559	7,90
1680	28,00	831,06	23,50	0,272	292,14	4369,201	7,61
1685	28,08	831,50	23,60	0,275	295,54	4190,033	7,31
1690	28,17	831,95	23,70	0,278	298,94	4018,357	7,00

Čas		Teplota plynu v okolí	Přírůstek teploty exponovaného ocelového prvku				
			Hloubka zuhlňatění	Exponovaný obvod	Součinitel průřezu	Celkový tepelný tok	Přírůstek teploty
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$A_m$	$A_m/V$	$h_{net,c}$	$\Delta\theta_{a,t}$
(s)	(min)	(mm)	(mm)	(m)	( $m^{-1}$ )	( $W \cdot m^{-2}$ )	( $^{\circ}C$ )
1695	28,25	832,39	23,80	0,282	302,34	3854,484	6,67
1700	28,33	832,83	23,90	0,285	305,73	3698,733	6,33
1705	28,42	833,27	24,00	0,288	309,13	3551,445	5,98
1710	28,50	833,71	24,10	0,291	312,53	3412,986	5,60
1715	28,58	834,14	24,20	0,294	315,92	3283,751	5,22
1720	28,67	834,58	24,30	0,298	319,32	3164,174	4,81
1725	28,75	835,01	24,40	0,301	322,72	3054,722	4,38
1730	28,83	835,45	24,50	0,304	326,11	2955,893	3,94
1735	28,92	835,88	24,60	0,307	329,51	2868,186	3,47
1740	29,00	836,31	24,70	0,310	332,91	2792,061	3,00
1745	29,08	836,74	24,80	0,314	336,31	2727,852	2,51
1750	29,17	837,17	24,90	0,317	339,70	2675,665	2,04
1755	29,25	837,59	25,00	0,320	343,10	2635,243	1,60
1760	29,33	838,02	25,10	0,323	346,50	2605,876	1,20
1765	29,42	838,44	25,20	0,326	349,89	2586,374	1,08
1770	29,50	838,87	25,30	0,330	353,29	2569,945	1,31
1775	29,58	839,29	25,40	0,333	356,69	2547,665	1,58
1780	29,67	839,71	25,50	0,336	360,08	2518,750	1,87
1785	29,75	840,13	25,60	0,339	363,48	2482,513	2,18
1790	29,83	840,55	25,70	0,342	366,88	2438,445	2,50
1795	29,92	840,96	25,80	0,346	370,28	2386,287	2,82
1800	30,00	841,38	25,90	0,349	373,67	2326,078	3,13

## Přírůstkový výpočet – část 4: tahová únosnost ocelové desky v kritickém řezu při požáru

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
0	0,00	20,00	0,00	20,00	1,000	26,88
5	0,08	96,54	0,07	20,00	1,000	26,88
10	0,17	146,95	0,13	20,00	1,000	26,88
15	0,25	184,61	0,20	20,00	1,000	26,88
20	0,33	214,67	0,27	20,00	1,000	26,88
25	0,42	239,70	0,33	20,00	1,000	26,88
30	0,50	261,14	0,40	20,00	1,000	26,88
35	0,58	279,90	0,47	20,00	1,000	26,88
40	0,67	296,56	0,53	20,00	1,000	26,88
45	0,75	311,56	0,60	20,00	1,000	26,88
50	0,83	325,19	0,67	20,00	1,000	26,88
55	0,92	337,68	0,73	20,00	1,000	26,88
60	1,00	349,21	0,80	20,00	1,000	26,88
65	1,08	359,92	0,87	20,00	1,000	26,88
70	1,17	369,91	0,93	20,00	1,000	26,88
75	1,25	379,28	1,00	20,00	1,000	26,88
80	1,33	388,10	1,07	20,00	1,000	26,88
85	1,42	396,42	1,13	20,00	1,000	26,88
90	1,50	404,31	1,20	20,00	1,000	26,88
95	1,58	411,80	1,27	20,00	1,000	26,88
100	1,67	418,94	1,33	20,00	1,000	26,88
105	1,75	425,75	1,40	20,00	1,000	26,88
110	1,83	432,27	1,47	20,00	1,000	26,88
115	1,92	438,51	1,53	20,00	1,000	26,88
120	2,00	444,50	1,60	20,00	1,000	26,88
125	2,08	450,27	1,67	20,00	1,000	26,88
130	2,17	455,82	1,73	20,00	1,000	26,88
135	2,25	461,17	1,80	20,00	1,000	26,88
140	2,33	466,34	1,87	20,00	1,000	26,88
145	2,42	471,33	1,93	20,00	1,000	26,88
150	2,50	476,17	2,00	20,00	1,000	26,88
155	2,58	480,85	2,07	20,00	1,000	26,88
160	2,67	485,39	2,13	20,00	1,000	26,88
165	2,75	489,80	2,20	20,00	1,000	26,88
170	2,83	494,08	2,27	20,00	1,000	26,88
175	2,92	498,24	2,33	20,00	1,000	26,88
180	3,00	502,29	2,40	20,00	1,000	26,88



Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
185	3,08	506,23	2,47	20,00	1,000	26,88
190	3,17	510,07	2,53	20,00	1,000	26,88
195	3,25	513,82	2,60	20,00	1,000	26,88
200	3,33	517,48	2,67	20,00	1,000	26,88
205	3,42	521,04	2,73	20,00	1,000	26,88
210	3,50	524,53	2,80	20,00	1,000	26,88
215	3,58	527,93	2,87	20,00	1,000	26,88
220	3,67	531,26	2,93	20,00	1,000	26,88
225	3,75	534,52	3,00	20,00	1,000	26,88
230	3,83	537,71	3,07	20,00	1,000	26,88
235	3,92	540,83	3,13	20,00	1,000	26,88
240	4,00	543,89	3,20	20,00	1,000	26,88
245	4,08	546,88	3,27	20,00	1,000	26,88
250	4,17	549,82	3,33	20,00	1,000	26,88
255	4,25	552,70	3,40	20,00	1,000	26,88
260	4,33	555,53	3,47	20,00	1,000	26,88
265	4,42	558,31	3,53	20,00	1,000	26,88
270	4,50	561,03	3,60	20,00	1,000	26,88
275	4,58	563,71	3,67	20,00	1,000	26,88
280	4,67	566,33	3,73	20,00	1,000	26,88
285	4,75	568,92	3,80	20,01	1,000	26,88
290	4,83	571,46	3,87	20,04	1,000	26,88
295	4,92	573,95	3,93	20,08	1,000	26,88
300	5,00	576,41	4,00	20,14	1,000	26,88
305	5,08	578,83	4,07	20,22	1,000	26,88
310	5,17	581,21	4,13	20,31	1,000	26,88
315	5,25	583,55	4,20	20,41	1,000	26,88
320	5,33	585,85	4,27	20,53	1,000	26,88
325	5,42	588,12	4,33	20,67	1,000	26,88
330	5,50	590,36	4,40	20,82	1,000	26,88
335	5,58	592,56	4,47	20,98	1,000	26,88
340	5,67	594,73	4,53	21,16	1,000	26,88
345	5,75	596,87	4,60	21,35	1,000	26,88
350	5,83	598,98	4,67	21,55	1,000	26,88
355	5,92	601,07	4,73	21,77	1,000	26,88
360	6,00	603,12	4,80	22,00	1,000	26,88
365	6,08	605,14	4,87	22,24	1,000	26,88
370	6,17	607,14	4,93	22,49	1,000	26,88
375	6,25	609,11	5,00	22,76	1,000	26,88

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
380	6,33	611,06	5,07	23,03	1,000	26,88
385	6,42	612,98	5,13	23,32	1,000	26,88
390	6,50	614,88	5,20	23,62	1,000	26,88
395	6,58	616,75	5,27	23,93	1,000	26,88
400	6,67	618,60	5,33	24,25	1,000	26,88
405	6,75	620,43	5,40	24,58	1,000	26,88
410	6,83	622,23	5,47	24,92	1,000	26,88
415	6,92	624,01	5,53	25,27	1,000	26,88
420	7,00	625,78	5,60	25,63	1,000	26,88
425	7,08	627,52	5,67	26,00	1,000	26,88
430	7,17	629,24	5,73	26,38	1,000	26,88
435	7,25	630,94	5,80	26,77	1,000	26,88
440	7,33	632,63	5,87	27,17	1,000	26,88
445	7,42	634,29	5,93	27,58	1,000	26,88
450	7,50	635,94	6,00	27,99	1,000	26,88
455	7,58	637,57	6,07	28,42	1,000	26,88
460	7,67	639,18	6,13	28,86	1,000	26,88
465	7,75	640,77	6,20	29,30	1,000	26,88
470	7,83	642,35	6,27	29,75	1,000	26,88
475	7,92	643,91	6,33	30,21	1,000	26,88
480	8,00	645,46	6,40	30,68	1,000	26,88
485	8,08	646,98	6,47	31,16	1,000	26,88
490	8,17	648,50	6,53	31,65	1,000	26,88
495	8,25	650,00	6,60	32,14	1,000	26,88
500	8,33	651,48	6,67	32,64	1,000	26,88
505	8,42	652,95	6,73	33,15	1,000	26,88
510	8,50	654,40	6,80	33,67	1,000	26,88
515	8,58	655,84	6,87	34,19	1,000	26,88
520	8,67	657,27	6,93	34,73	1,000	26,88
525	8,75	658,68	7,00	35,27	1,000	26,88
530	8,83	660,08	7,07	35,81	1,000	26,88
535	8,92	661,47	7,13	36,37	1,000	26,88
540	9,00	662,85	7,20	36,93	1,000	26,88
545	9,08	664,21	7,27	37,50	1,000	26,88
550	9,17	665,56	7,33	38,08	1,000	26,88
555	9,25	666,90	7,40	38,66	1,000	26,88
560	9,33	668,22	7,47	39,25	1,000	26,88
565	9,42	669,54	7,53	39,85	1,000	26,88
570	9,50	670,84	7,60	40,45	1,000	26,88

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
575	9,58	672,13	7,67	41,06	1,000	26,88
580	9,67	673,41	7,73	41,68	1,000	26,88
585	9,75	674,68	7,80	42,30	1,000	26,88
590	9,83	675,94	7,87	42,93	1,000	26,88
595	9,92	677,19	7,93	43,57	1,000	26,88
600	10,00	678,43	8,00	44,21	1,000	26,88
605	10,08	679,66	8,07	44,86	1,000	26,88
610	10,17	680,87	8,13	45,52	1,000	26,88
615	10,25	682,08	8,20	46,18	1,000	26,88
620	10,33	683,28	8,27	46,85	1,000	26,88
625	10,42	684,47	8,33	47,52	1,000	26,88
630	10,50	685,65	8,40	48,20	1,000	26,88
635	10,58	686,82	8,47	48,89	1,000	26,88
640	10,67	687,98	8,53	49,58	1,000	26,88
645	10,75	689,13	8,60	50,28	1,000	26,88
650	10,83	690,28	8,67	50,98	1,000	26,88
655	10,92	691,41	8,73	51,69	1,000	26,88
660	11,00	692,54	8,80	52,40	1,000	26,88
665	11,08	693,66	8,87	53,12	1,000	26,88
670	11,17	694,77	8,93	53,85	1,000	26,88
675	11,25	695,87	9,00	54,58	1,000	26,88
680	11,33	696,96	9,07	55,32	1,000	26,88
685	11,42	698,05	9,13	56,06	1,000	26,88
690	11,50	699,13	9,20	56,81	1,000	26,88
695	11,58	700,20	9,27	57,57	1,000	26,88
700	11,67	701,26	9,33	58,33	1,000	26,88
705	11,75	702,31	9,40	59,09	1,000	26,88
710	11,83	703,36	9,47	59,86	1,000	26,88
715	11,92	704,40	9,53	60,64	1,000	26,88
720	12,00	705,44	9,60	61,42	1,000	26,88
725	12,08	706,46	9,67	62,21	1,000	26,88
730	12,17	707,48	9,73	63,00	1,000	26,88
735	12,25	708,49	9,80	63,80	1,000	26,88
740	12,33	709,50	9,87	64,60	1,000	26,88
745	12,42	710,50	9,93	65,40	1,000	26,88
750	12,50	711,49	10,00	66,22	1,000	26,88
755	12,58	712,48	10,07	67,03	1,000	26,88
760	12,67	713,46	10,13	67,86	1,000	26,88
765	12,75	714,43	10,20	68,68	1,000	26,88

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhlňatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
770	12,83	715,40	10,27	69,52	1,000	26,88
775	12,92	716,36	10,33	70,35	1,000	26,88
780	13,00	717,31	10,40	71,20	1,000	26,88
785	13,08	718,26	10,47	72,04	1,000	26,88
790	13,17	719,20	10,53	72,90	1,000	26,88
795	13,25	720,14	10,60	73,75	1,000	26,88
800	13,33	721,07	10,67	74,62	1,000	26,88
805	13,42	721,99	10,73	75,48	1,000	26,88
810	13,50	722,91	10,80	76,35	1,000	26,88
815	13,58	723,83	10,87	77,23	1,000	26,88
820	13,67	724,73	10,93	78,11	1,000	26,88
825	13,75	725,64	11,00	79,00	1,000	26,88
830	13,83	726,53	11,07	79,89	1,000	26,88
835	13,92	727,43	11,13	80,78	1,000	26,88
840	14,00	728,31	11,20	81,68	1,000	26,88
845	14,08	729,19	11,27	82,59	1,000	26,88
850	14,17	730,07	11,33	83,50	1,000	26,88
855	14,25	730,94	11,40	84,41	1,000	26,88
860	14,33	731,81	11,47	85,33	1,000	26,88
865	14,42	732,67	11,53	86,25	1,000	26,88
870	14,50	733,52	11,60	87,18	1,000	26,88
875	14,58	734,38	11,67	88,11	1,000	26,88
880	14,67	735,22	11,73	89,05	1,000	26,88
885	14,75	736,06	11,80	89,99	1,000	26,88
890	14,83	736,90	11,87	90,94	1,000	26,88
895	14,92	737,73	11,93	91,89	1,000	26,88
900	15,00	738,56	12,00	92,84	1,000	26,88
905	15,08	739,38	12,07	93,80	1,000	26,88
910	15,17	740,20	12,13	94,77	1,000	26,88
915	15,25	741,02	12,20	95,74	1,000	26,88
920	15,33	741,83	12,27	96,71	1,000	26,88
925	15,42	742,63	12,33	97,69	1,000	26,88
930	15,50	743,43	12,40	98,67	1,000	26,88
935	15,58	744,23	12,47	99,65	1,000	26,88
940	15,67	745,02	12,53	100,64	1,000	26,88
945	15,75	745,81	12,60	101,64	0,998	26,82
950	15,83	746,60	12,67	102,64	0,998	26,82
955	15,92	747,38	12,73	103,64	0,996	26,76
960	16,00	748,15	12,80	104,65	0,996	26,76

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
965	16,08	748,93	12,87	105,66	0,993	26,70
970	16,17	749,69	12,93	106,68	0,993	26,70
975	16,25	750,46	13,00	107,70	0,991	26,64
980	16,33	751,22	13,07	108,73	0,991	26,64
985	16,42	751,98	13,13	109,76	0,989	26,58
990	16,50	752,73	13,20	110,79	0,989	26,58
995	16,58	753,48	13,27	111,83	0,987	26,53
1000	16,67	754,22	13,33	112,88	0,987	26,53
1005	16,75	754,97	13,40	113,92	0,985	26,47
1010	16,83	755,70	13,47	114,97	0,985	26,47
1015	16,92	756,44	13,53	116,03	0,982	26,41
1020	17,00	757,17	13,60	117,09	0,982	26,41
1025	17,08	757,90	13,67	118,16	0,980	26,35
1030	17,17	758,62	13,73	119,22	0,980	26,35
1035	17,25	759,34	13,80	120,30	0,978	26,29
1040	17,33	760,06	13,87	121,38	0,978	26,29
1045	17,42	760,77	13,93	122,46	0,976	26,23
1050	17,50	761,48	14,00	123,54	0,974	26,17
1055	17,58	762,19	14,07	124,63	0,974	26,17
1060	17,67	762,89	14,13	125,73	0,971	26,11
1065	17,75	763,59	14,20	126,83	0,971	26,11
1070	17,83	764,29	14,27	127,93	0,969	26,05
1075	17,92	764,98	14,33	129,04	0,969	26,05
1080	18,00	765,67	14,40	130,15	0,967	25,99
1085	18,08	766,36	14,47	131,27	0,967	25,99
1090	18,17	767,04	14,53	132,39	0,965	25,93
1095	18,25	767,72	14,60	133,51	0,963	25,87
1100	18,33	768,40	14,67	134,64	0,963	25,87
1105	18,42	769,08	14,73	135,77	0,960	25,82
1110	18,50	769,75	14,80	136,91	0,960	25,82
1115	18,58	770,42	14,87	138,05	0,958	25,76
1120	18,67	771,08	14,93	139,20	0,958	25,76
1125	18,75	771,75	15,00	140,35	0,956	25,70
1130	18,83	772,41	15,07	141,50	0,954	25,64
1135	18,92	773,06	15,13	142,66	0,954	25,64
1140	19,00	773,72	15,20	143,82	0,952	25,58
1145	19,08	774,37	15,27	144,99	0,952	25,58
1150	19,17	775,02	15,33	146,16	0,949	25,52
1155	19,25	775,66	15,40	147,34	0,949	25,52

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
<i>t</i>		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
1160	19,33	776,31	15,47	148,52	0,947	25,46
1165	19,42	776,95	15,53	149,70	0,945	25,40
1170	19,50	777,59	15,60	150,89	0,945	25,40
1175	19,58	778,22	15,67	152,09	0,943	25,34
1180	19,67	778,85	15,73	153,28	0,943	25,34
1185	19,75	779,48	15,80	154,49	0,941	25,28
1190	19,83	780,11	15,87	155,69	0,938	25,22
1195	19,92	780,73	15,93	156,90	0,938	25,22
1200	20,00	781,35	16,00	158,12	0,936	25,17
1205	20,08	781,97	16,07	159,34	0,936	25,17
1210	20,17	782,59	16,13	160,56	0,934	25,11
1215	20,25	783,20	16,20	161,79	0,932	25,05
1220	20,33	783,82	16,27	163,02	0,932	25,05
1225	20,42	784,43	16,33	164,26	0,930	24,99
1230	20,50	785,03	16,40	165,50	0,930	24,99
<b>1235</b>	20,58	785,64	16,47	<b>166,74</b>	0,927	24,93
1240	20,67	786,24	16,53	167,99	0,925	24,87
1245	20,75	786,84	16,60	169,24	0,925	24,87
1250	20,83	787,43	16,67	170,50	0,923	24,81
1255	20,92	788,03	16,73	171,77	0,921	24,75
1260	21,00	788,62	16,80	173,03	0,921	24,75
1265	21,08	789,21	16,87	174,30	0,919	24,69
1270	21,17	789,80	16,93	175,58	0,916	24,63
1275	21,25	790,38	17,00	176,86	0,916	24,63
1280	21,33	790,97	17,07	178,14	0,914	24,57
1285	21,42	791,55	17,13	179,43	0,914	24,57
1290	21,50	792,13	17,20	180,73	0,912	24,51
1295	21,58	792,70	17,27	182,03	0,910	24,46
1300	21,67	793,28	17,33	183,33	0,910	24,46
1305	21,75	793,85	17,40	184,63	0,908	24,40
1310	21,83	794,42	17,47	185,95	0,905	24,34
1315	21,92	794,99	17,53	187,26	0,905	24,34
1320	22,00	795,55	17,60	188,58	0,903	24,28
1325	22,08	796,11	17,67	189,91	0,901	24,22
1330	22,17	796,68	17,73	191,24	0,901	24,22
1335	22,25	797,23	17,80	192,57	0,899	24,16
1340	22,33	797,79	17,87	193,91	0,897	24,10
1345	22,42	798,35	17,93	195,25	0,897	24,10
1350	22,50	798,90	18,00	196,60	0,894	24,04

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
1355	22,58	799,45	18,07	197,95	0,892	23,98
1360	22,67	800,00	18,13	199,31	0,892	23,98
1365	22,75	800,55	18,20	200,67	0,890	23,92
1370	22,83	801,09	18,27	202,03	0,888	23,87
1375	22,92	801,63	18,33	203,40	0,888	23,87
1380	23,00	802,17	18,40	204,78	0,886	23,82
1385	23,08	802,71	18,47	206,16	0,883	23,74
1390	23,17	803,25	18,53	207,54	0,881	23,68
1395	23,25	803,79	18,60	208,93	0,881	23,68
1400	23,33	804,32	18,67	210,33	0,879	23,63
1405	23,42	804,85	18,73	211,72	0,877	23,57
1410	23,50	805,38	18,80	213,13	0,877	23,57
1415	23,58	805,91	18,87	214,53	0,875	23,52
1420	23,67	806,43	18,93	215,95	0,872	23,44
1425	23,75	806,96	19,00	217,36	0,872	23,44
1430	23,83	807,48	19,07	218,79	0,870	23,39
1435	23,92	808,00	19,13	220,21	0,868	23,33
1440	24,00	808,52	19,20	221,64	0,866	23,28
1445	24,08	809,03	19,27	223,08	0,866	23,28
1450	24,17	809,55	19,33	224,52	0,864	23,22
1455	24,25	810,06	19,40	225,97	0,861	23,14
1460	24,33	810,57	19,47	227,42	0,861	23,14
1465	24,42	811,08	19,53	228,87	0,859	23,09
1470	24,50	811,59	19,60	230,33	0,857	23,04
1475	24,58	812,10	19,67	231,80	0,855	22,98
1480	24,67	812,60	19,73	233,27	0,855	22,98
1485	24,75	813,10	19,80	234,74	0,853	22,93
1490	24,83	813,61	19,87	236,22	0,850	22,85
1495	24,92	814,10	19,93	237,71	0,848	22,79
1500	25,00	814,60	20,00	251,11	0,835	22,44
1505	25,08	815,10	20,10	264,55	0,820	22,04
1510	25,17	815,59	20,20	278,04	0,804	21,61
1515	25,25	816,09	20,30	291,55	0,789	21,21
1520	25,33	816,58	20,40	305,08	0,775	20,83
1525	25,42	817,07	20,50	318,61	0,757	20,35
1530	25,50	817,56	20,60	332,12	0,738	19,84
1535	25,58	818,04	20,70	345,61	0,720	19,35
1540	25,67	818,53	20,80	359,06	0,705	18,95
1545	25,75	819,01	20,90	372,44	0,686	18,44

Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhelnatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
1550	25,83	819,49	21,00	385,76	0,668	17,96
1555	25,92	819,97	21,10	398,98	0,653	17,55
1560	26,00	820,45	21,20	412,09	0,636	17,10
1565	26,08	820,93	21,30	425,08	0,621	16,69
1570	26,17	821,40	21,40	437,93	0,604	16,24
1575	26,25	821,88	21,50	450,63	0,590	15,86
1580	26,33	822,35	21,60	463,15	0,576	15,48
1585	26,42	822,82	21,70	475,49	0,561	15,08
1590	26,50	823,29	21,80	487,64	0,544	14,62
1595	26,58	823,76	21,90	499,57	0,530	14,25
1600	26,67	824,23	22,00	511,28	0,507	13,63
1605	26,75	824,69	22,10	522,76	0,479	12,88
1610	26,83	825,16	22,20	533,99	0,452	12,15
1615	26,92	825,62	22,30	544,98	0,429	11,53
1620	27,00	826,08	22,40	555,72	0,401	10,78
1625	27,08	826,54	22,50	566,19	0,378	10,16
1630	27,17	827,00	22,60	576,40	0,355	9,54
1635	27,25	827,45	22,70	586,34	0,332	8,92
1640	27,33	827,91	22,80	596,02	0,309	8,31
1645	27,42	828,36	22,90	605,43	0,293	7,88
1650	27,50	828,82	23,00	614,59	0,276	7,42
1655	27,58	829,27	23,10	623,53	0,259	6,96
1660	27,67	829,72	23,20	632,22	0,246	6,61
1665	27,75	830,17	23,30	640,66	0,232	6,24
1670	27,83	830,61	23,40	648,84	0,218	5,86
1675	27,92	831,06	23,50	656,73	0,205	5,51
1680	28,00	831,50	23,60	664,34	0,191	5,13
1685	28,08	831,95	23,70	671,65	0,178	4,78
1690	28,17	832,39	23,80	678,65	0,167	4,49
1695	28,25	832,83	23,90	685,32	0,157	4,22
1700	28,33	833,27	24,00	691,65	0,144	3,87
1705	28,42	833,71	24,10	697,62	0,133	3,58
1710	28,50	834,14	24,20	703,23	0,129	3,47
1715	28,58	834,58	24,30	708,45	0,125	3,36
1720	28,67	835,01	24,40	713,26	0,123	3,31
1725	28,75	835,45	24,50	717,64	0,119	3,20
1730	28,83	835,88	24,60	721,58	0,117	3,14
1735	28,92	836,31	24,70	725,06	0,116	3,12
1740	29,00	836,74	24,80	728,05	0,113	3,04



Čas		Teplota plynů v okolí	Hloubka zuhlňatění	Teplota v ocelové desce	Tahová únosnost ocelové desky	
					Redukční součinitel	Tahová únosnost
$t$		$\theta_g$	$d_{char}$	$\theta_{a,t}$	$k_{y,\theta}$	$N_{Rd,fi}$
(s)	(min)	(°C)	(mm)	(°C)	(-)	(kN)
1745	29,08	837,17	24,90	730,57	0,112	3,01
1750	29,17	837,59	25,00	732,61	0,111	2,98
1755	29,25	838,02	25,10	734,21	0,110	2,96
1760	29,33	838,44	25,20	735,41	0,110	2,96
1765	29,42	838,87	25,30	736,49	0,108	2,90
1770	29,50	839,29	25,40	737,80	0,107	2,88
1775	29,58	839,71	25,50	739,38	0,107	2,88
1780	29,67	840,13	25,60	741,25	0,106	2,85
1785	29,75	840,55	25,70	743,43	0,105	2,82
1790	29,83	840,96	25,80	745,93	0,102	2,74
1795	29,92	841,38	25,90	748,75	0,101	2,71
1800	30,00	841,80	26,00	751,88	0,099	2,66

## Příloha 2 – Výběr z fotodokumentace



1 – Před zkouškou, pohled dovnitř pece. Foto Lukáš Velebil



2 – Začátek požární zkoušky, pohled na vzorky. Foto Marek Pokorný



3 – 15. minuta požární zkoušky, pohled na vzorky. Foto Lukáš Velebil



4 – Pohled na vzorky a zkušební pec miniFUR po provedené 30minutové zkoušce. Foto Marek Pokorný





5 – Detail vzorku „B“ po provedené 30minutové zkoušce. Foto Lukáš Velebil