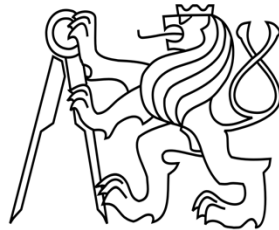


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra K134



Program: Integrovaná bezpečnost staveb

134DPM – Diplomová práce

**MODELOVÁNÍ SPOJE S OCELOVÝMI PRVKY
V DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍCH ZA POŽÁRU**

MODELLING OF JOINT WITH STEEL ELEMENTS IN TIMBER STRUCTURES
EXPOSED TO FIRE

Bc. Mykyta Radchuk

Vedoucí práce: Ing. Kamila Cáblová, Ph.D.

2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D. a informace jsem čerpal z uvedených zdrojů.

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

V Praze, dne 2. ledna 2022

.....

Bc. Mykyta Radchuk

Poděkování

Především chci poděkovat svým rodičům za to, že mi poskytli možnost studia na vysoké škole v České republice a zajištění nejlepších podmínek pro studium. Dále děkuji vedoucí mojí diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za její pomoc a osobní zájem během celé doby zpracování této práce a taky za poskytování znalostí na vysoké odborné úrovni. Rovněž velké poděkování všem ostatním lidem, kteří mi pomohli vytvořit vhodné prostředí pro studium.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Radchuk Jméno: Mykyta Osobní číslo: _____
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování spoje s ocelovými prvky v dřevěných konstrukcích za požáru

Název diplomové práce anglicky: Modelling of joint with steel elements in timber structures exposed to fire

Pokyny pro vypracování:

Shrnutí současného stavu poznání, numerický model, studie citlivosti, závěrečné doporučení

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 27.9.2021

Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29.08.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Mykyta Radchuk

Název diplomové práce: Modelování spoje s ocelovými prvky v dřevěných konstrukcích za požáru

Základní část: _____ podíl: 100 %

Formulace úkolů: _____

Popis problematiky a stav poznání řešeného tématu

Analytický model

Numerické modely konečně prvkovým softwarem

Stanovení doporučení k pokročilému modelování dřevěných spojů s vloženou ocelovou deskou

Podpis vedoucího DP: Datum: 27.9.2021

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

2. Část: - _____ podíl: - _____ %

Konzultant (jméno, katedra): - _____

Formulace úkolů: - _____

- _____

- _____

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: - _____ podíl: - _____ %

Konzultant (jméno, katedra): - _____

Formulace úkolů: - _____

- _____

- _____

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: - _____ podíl: - _____ %

Konzultant (jméno, katedra): - _____

Formulace úkolů: - _____

- _____

- _____

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

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

Obsah

Abstrakt	.....	IV
Abstract	.....	IV
Seznam použitých symbolů a zkratk	.....	V
1 Úvod	.....	1
1.1 Motivace	.....	1
1.2 Zaměření výzkumu	.....	1
1.3 Cíle práce	.....	2
2 Současný stav poznání	.....	3
2.1 ČVUT, Praha 2021	.....	3
2.1.1 Numerický model	.....	3
2.1.2 Závěr	.....	4
2.2 Clenmont Université, Francie 2011	.....	5
2.2.1 Numerický model	.....	5
2.2.2 Závěr	.....	6
2.3 VŠB, Ostrava 2015	.....	7
2.3.1 Laboratorní zkoušky	.....	7
2.3.2 Výsledky	.....	7
2.4 ETH, Švýcarsko 2003	.....	9
2.4.1 Obsah studie	.....	9
2.4.2 Závěr	.....	10
2.5 Ostatní	.....	11
3 Chování použitých materiálů při zvýšené teplotě	.....	12
3.1 Dřevo	.....	12
3.2 Ocel	.....	13
4 Modely požáru	.....	14
4.1 Nominální teplotní křivky	.....	14
4.1.1 Normová teplotní křivka	.....	14
4.1.2 Křivka vnějšího požáru	.....	14
4.1.3 Křivka pomalého zahřívání	.....	15
4.1.4 Ostatní nominální křivky	.....	15
4.2 Parametrické teplotní křivky	.....	16
4.2.1 Parametrická teplotní křivka podle přílohy A, CSN EN 1991-1-2	.....	16
4.2.2 Další parametrické teplotní křivky	.....	17
5 Numerický model	.....	18
5.1 Geometrie	.....	18
5.1.1 Model se svorníky a jeho submodely	.....	18
5.1.2 Model s kolíky	.....	20
5.2 Materiálové vlastnosti	.....	22
5.3 Tepelné zatížení	.....	24
5.4 Umístění kontrolních bodů	.....	25

5.4.1	Model s jedním ocelovým plechem.....	25
5.4.2	Model s dvěma ocelovými plechy	26
6	Citlivostní analýza.....	27
6.1	Velikost modifikované vrstvy	27
6.1.1	Výsledky numerického výpočtu	27
6.1.2	Závěr numerického výpočtu	29
6.2	Materiálové vlastnosti dřeva.....	30
6.2.1	Výsledky numerického výpočtu	30
6.2.2	Závěr numerického výpočtu	33
6.3	Vliv tloušťky ocelové desky	34
6.3.1	Výsledky numerického výpočtu	34
6.3.2	Závěr numerického výpočtu	36
6.4	Vliv pevnosti dřeva.....	37
6.4.1	Výsledky numerického výpočtu	37
6.4.2	Závěr numerického výpočtu	39
6.5	Vliv velikosti svorníků	40
6.5.1	Výsledky numerického výpočtu	40
6.5.2	Závěr numerického výpočtu	42
6.6	Vliv výšky trámu	43
6.6.1	Výsledky numerického výpočtu	43
6.6.2	Závěr numerického výpočtu	45
6.7	Vliv šířky trámu.....	46
6.7.1	Výsledky numerického výpočtu	46
6.7.2	Závěr numerického výpočtu	48
6.8	Vliv příčné spáry mezi trámy	49
6.8.1	Výsledky numerického výpočtu	49
6.8.2	Závěr numerického výpočtu	51
6.9	Vliv podélné spáry mezi trámy.....	52
6.9.1	Výsledky numerického výpočtu	52
6.9.2	Závěr numerického výpočtu	54
6.10	Vliv počtů vložených ocelových desek	55
6.10.1	Výsledky numerického výpočtu	55
6.10.2	Závěr numerického výpočtu	58
6.11	Vliv typu spojovacích prostředků	59
6.11.1	Výsledky numerického výpočtu	59
6.11.2	Závěr numerického výpočtu	61
7	Vliv typu požáru na chování spoje.....	62
7.1	Výsledky numerických výpočtů	62
7.2	Shrnutí vlivu teplotního zatížení.....	65
8	Závěr a stanovení doporučení k návrhu spoje.....	66
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	71

Literatura	72
-------------------	-------	-----------

Abstrakt

Práce je zaměřena na přestup tepla v dřevěném spoji s vloženou ocelovou deskou za požáru. Přestup tepla je analyzován pomocí pokročilého numerického modelu, který je vytvořen v softwaru ANSYS. Model je validován na základě dat z literatury. Součástí práce je rozsáhlá citlivostní analýza, která studuje vliv různých parametrů na prostup tepla ve spoji. Vybrané parametry citlivosti studie zahrnují např. výšku a šířku spoje, tloušťku ocelové desky, velikost spojových prostředků, jejich druhy a další. Výsledky analýz jsou porovnány s výsledky základního modelu a také s experimentálně získanými výsledky, které jsou také převzaty z literatury. Všechny studované modely jsou zatíženy normovou teplotní křivkou odpovídající ČSN EN 1991-1-2 po dobu 30 min.

Klíčová slova

Dřevo; Ocel; Dřevěný spoj s vloženou ocelovou deskou; Normový požár; Požární odolnost; Vlhkost; Numerický model; ANSYS Workbench; Svorníkový spoj; Přestup tepla.

Abstract

The work is focused on heat transfer in a timber joint with an inserted steel plate exposed to the fire. Heat transfer is analysed using an advanced numerical model created in the ANSYS software. The model is validated based on the data from literature. The study includes an extensive sensitivity analysis, which investigates the influence of various parameters on the heat transfer in the joint. Selected sensitivity parameters of the study include, for example, the height and width of the timber joint, the thickness of the steel plate, the size of the fasteners and its types, and more. The results of the analyses are compared to the results of the basic model and with the experimentally obtained results, which are also taken from the literature. All studied models are loaded with a standard temperature curve corresponding to ČSN EN 1991-1-2 for 30 min.

Keywords

Timber; Steel; Steel to timber joint; Standard fire; Fire resistance; Moisture; Numerical model; ANSYS Workbench; Joint with bolts; Heat transfer.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly:

b	Koeficient povrchů	$J/(m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K)$
c	Měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
t	Čas	min
t_{max}	Čas, při kterém nastává maximální teplota	min
O	Koeficient otvorů	$m^{1/2}$
q	Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení	MJ/m^2
w	Vlhkost	%
x	Součinitel závislý na čase t_{max} , t_{lim} a Γ	-

Řecké symboly:

θ_g	Teplota plynů v požárním úseku	$^{\circ}C$
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$W/(m \cdot K)$
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3

1 Úvod

1.1 Motivace

Dřevo je ekologický, recyklovatelný a obnovitelný stavební materiál, který se v současnosti hojně využívá ve stavebních konstrukcích jako nosný nebo dekorační prvek. Tento materiál je v poslední době využíván i jako požární ochrana. Významný podíl novostaveb, zejména rodinné domy, jsou realizovány ze dřeva a materiálů na jeho bázi. Tuto tendenci lze vysvětlit dostupností, nízkou energetickou náročností a jednoduchou zpracovatelností v porovnání s jinými stavebními materiály. Avšak dřevo má rovněž řadu nevýhod. Jedna z nich je jeho hořlavost, která přináší určité obavy při výběru stavební hmoty konstrukce.

Nicméně hořlavost, která je ovlivněna více faktory jako např. vlhkostí, nemusí být vždy považována za negativní vlastnost. Během hoření dochází uvnitř dřevěných prvků k transportu vypařené vody, která může ovlivňovat vlastnosti dřeva. Nejslabším prvkem v dřevěných konstrukcích je za normálních podmínek i během požáru spoj. V současnosti nejčastějším typem spoje je spoj dřevných trámů pomocí ocelové desky. V případě tohoto spoje transport vodní páry probíhá ve dvou směrech. Většina vodní páry uniká do exteriéru a část se zdržuje v těsné blízkosti ocelového prvku. Tato vrstva vodní páry plní od určitého okamžiku funkci parozábrany. Akumulovaná voda v těsné blízkosti plechu vytváří vlhkou vrstvu, která udržuje poměrně nízkou teplotu po delší dobu, než je tomu v ostatních částech průřezu spoje.

1.2 Zaměření výzkumu

Problematika dřeva za požáru je velmi rozsáhlá. Primární výzkumnou otázkou je stanovení přesných vlastností materiálu, jeho chování při vysokých teplotách a využití těchto znalostí pro výzkum chování spoje dřevěného prvku s vloženou ocelovou deskou při požáru. Důležitou část tvoří studium efektu parozábrany, vyvolané kontaktem prostupujících vodních par s nepropustnou ocelovou deskou a její vliv na rozvoj teplot ve spoji, potažmo chování oceli, dřeva a spoje jako celku. V neposlední řadě je nutné zabývat se otázkou požární odolnosti řešeného nechráněného spoje. Zda je možné dosáhnout vyšší požární odolnosti, než je uvedena v ČSN EN 1995-1-2, a případně za jakých podmínek. Neméně důležitou problematikou je otázka ověření vhodnosti způsobu modelování a doporučení pro využití modelu v praxi.

1.3 Cíle práce

Hlavními cíli práce jsou:

- ověření materiálových vlastností vlhkého dřeva za požáru, v kontextu vhodných pro numerický model, kontrola správnosti hodnoty měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti, úprava vlastností modifikační vrstvy průřezu,
- ověření a úprava velikosti modifikační vrstvy průřezu, resp. její tloušťky v zjednodušeném počítačovém modelu,
- ověření vlivu velikosti mezery ve dřevěném spoji pro vložení ocelové desky na rychlost šíření tepla ve spoji,
- ověření vlivu pevnosti dřeva a oceli na požární odolnost dřevo-ocelového spoje,
- ověření vlivu velikosti jednotlivých prvků na požární odolnost dřevo-ocelového spoje, konkrétně velikosti ocelové desky, její tloušťky, výšky a velikosti dřevěného trámu.
- ověření vlivu typu spojovacích prostředků na tepelnou odezvu jednotlivých částí spoje,
- ověření vlivu materiálu spojovacích prostředků na tepelnou odezvu jednotlivých částí spoje,
- ověření reakce prvků vystavených různým teplotním křivkám.

2 Současný stav poznání

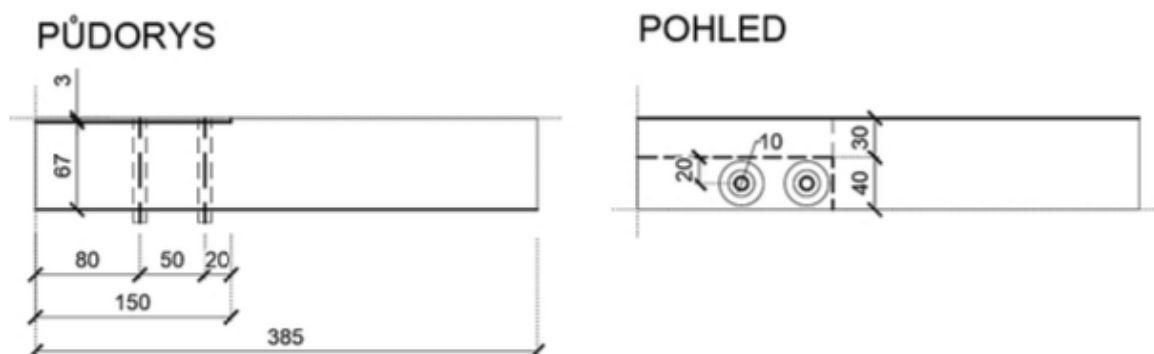
V této kapitole jsou popsány výzkumné práce zabývající se problematikou modelování dřevěného spoje s ocelovou deskou z různých univerzit, nejen z České republiky, viz [1] – [4], [6], [7], [12], [14] – [16], [18] – [28].

2.1 ČVUT, Praha 2021

V roce 2021 se danou problematikou zabýval Ing. Jaroslav Zeman, který provedl analýzu vlivu různých materiálových vlastností na přestup tepla ve dvou dřevo-ocelových spojích pomocí vlastního numerického modelu, viz [28]. Model byl validován na základě provedených experimentů. Tato diplomová práce využívá data z [28] k numerickému modelování a výzkum tohoto tématu tak rozšiřuje.

2.1.1 Numerický model

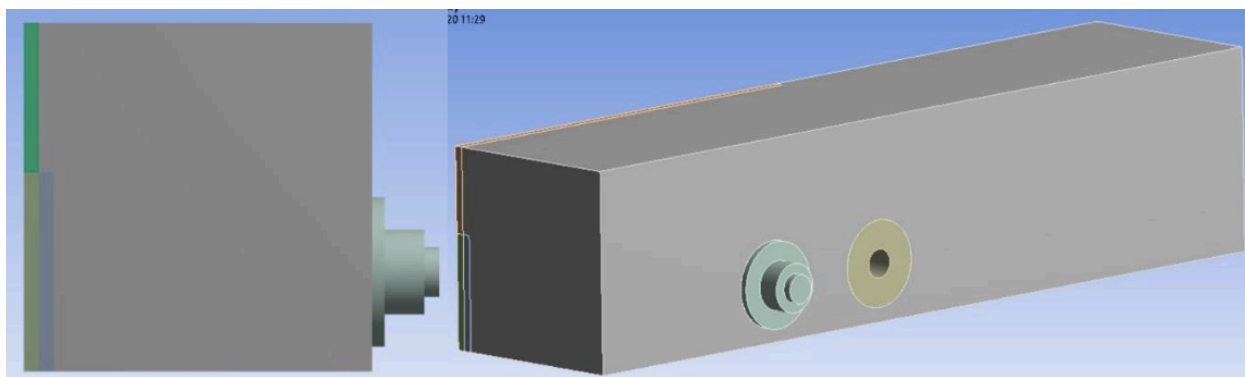
Geometrie spoje popsaného v [28] je uvedena na obr. 1. Model je tvořen několika částmi. Samostatnou komponentou modelu je ocelový plech tloušťky 6 mm. Další komponenty tvoří svorníky skládající se ze závitové tyče průměru 10 mm (v modelu zjednodušena jako hladká bez závitů), konstrukční podložky průměru 30 mm a výšky 2,5 mm. Svorník je držen maticí výšky 8 mm. Matice je v modelu zjednodušena na válec průměru 17 mm. Přesah závitové tyče je v modelu nastaven na 3 mm. Dřevěný prvek je rozdělen na několik dalších objektů. Z důvodu eliminace duplicity teplotního zatížení je dřevěný objekt rozdělen na objekt pod svorníkovou hlavou a objekt vystavený teplotnímu zatížení. U plechu se jedná o 3 mm vrstvu dřeva sloužící pro lokální úpravu materiálových vlastností dřeva za účelem započítání vlivu akumulovaných vodních par, které se nahromadí díky parozábraně tvořené ocelovým plechem. Tato vrstva je vidět na obr. 2. Pro započítání vlivu zapaštění plechu na rozvoj teplot je nad vloženou ocelovou deskou modelována vzduchová mezera se základním nastavením vlastností programu pro vzduch. Půdorys a pohled zjednodušeného modelu (obr. 1) je převzat z [28].



Obr. 1: Půdorys a pohled zkoušeného vzorku [28]

Objemová hmotnost dřeva pevnosti C24, které bylo použito během experimentu, je rovna 410 kg/m^3 . Objemová hmotnost v numerickém modelu popsáném v [28] je nastavena v závislosti na teplotě podle EC5.

V [28] byly provedeny dva výpočty se dvěma variantami materiálových vlastností dřeva v modelu, který odpovídal spoji použitým při experimentu. V prvním výpočtu je počítáno s charakteristikami podle Janssense s úpravou měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu na 100 kJ/kgK při $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro porovnání rozdílů od normových materiálových vlastností byl proveden výpočet s materiálovými vlastnostmi podle EC5. V modelu byla použita objemová hmotnost oceli 7850 kg/m^3 . Bokorys a pohled na numerický model (obr. 2) je převzat z [28].



Obr. 2: Bokorys a pohled na numerický model [28]

2.1.2 Závěr

Výsledkem této práce je zhodnocení materiálových vlastností, které nejvíce umožňují přiblížit se výstupy z numerického modelu k reálnému chování prvku při požáru, respektive k chování prvku, který je vystaven normovému požáru ve zkušební peci. Těmito vlastnostmi jsou vlastnosti dřeva dané Janssensem, viz [19], oceli dané normou ČSN EN 1993-1-2, viz [9] a vlastnosti modifikované vrstvy dřeva s úpravou měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu na 100 kJ/kgK při $100 \text{ }^\circ\text{C}$ dané Janssensem, viz [19]. Tato úprava umožnila vytvořit efekt parozábrany ve dřevě v místě styku s ocelovým plechem. Tloušťka modifikované vrstvy byla uvažována 3 mm , dle doporučení z [2].

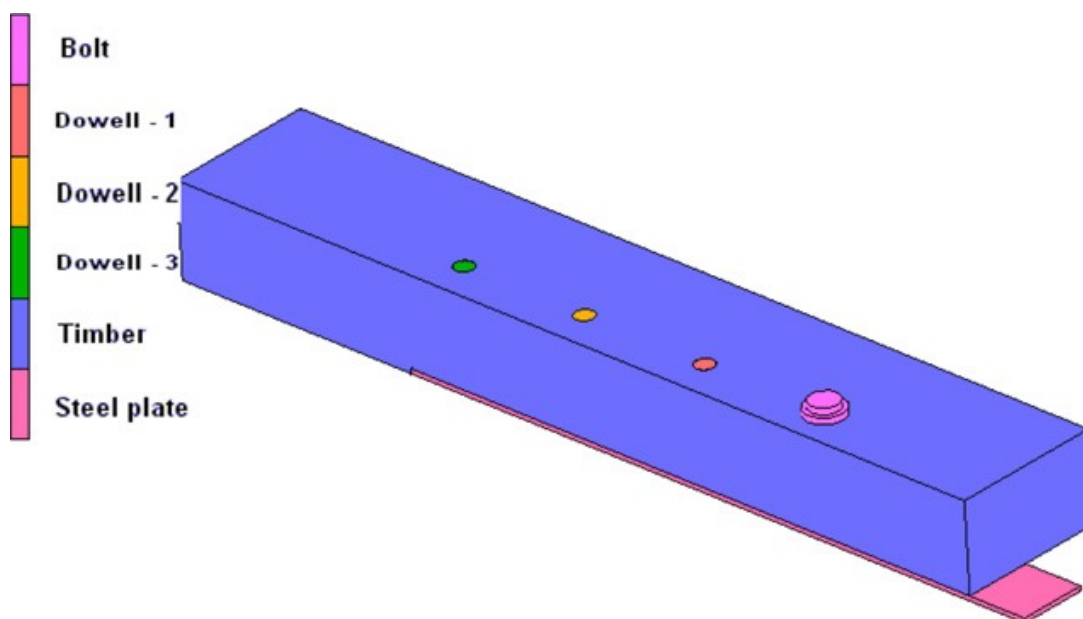
2.2 Clermont Université, Francie 2011

V roce 2011 byla provedena studie dřevo-ocelových spojů při různých materiálových a geometrických konfiguracích ve spolupráci Clermont Université, Université Blaise Pascal a CSTB, viz [2]. Cílem bylo stanovení požární odolnosti (PO) spojů a vhodných materiálových vlastností modifikované vrstvy dřeva.

2.2.1 Numerický model

Model spoje uvedený v [2] je podobně jako v práci [28] tvořen několika částmi. Model je vidět na obr. 3. Samostatnou část tvoří ocelový plech. Další komponenty tvoří ocelové kolíky o průměru 20 mm a svorník skládající se ze závitové tyče (v modelu zjednodušená), konstrukční podložky o průměru 72 mm a výšce 6 mm. Svorník je držen maticí výšky 16 mm. Matice je v modelu zjednodušená na válec o průměru 30 mm. Přesah závitové tyče je v modelu nastaven na 3 mm. Dřevěný prvek je rozdělen na několik dalších objektů. Z důvodu eliminace duplicity teplotního zatížení se jeden z nich se vyskytuje pod hlavou svorníku. U plechu se jedná o 3 mm vrstvu dřeva sloužící pro lokální úpravu materiálových vlastností dřeva za účelem započítání vlivu zadržovaných vodních par parozábranou tvořenou plechem. Pro započítání vlivu zapuštění plechu na rozvoj teplot je nad vložkou ocelovou deskou modelována vzduchová mezera s výchozím nastavením vlastností programu pro vzduch.

Objemová hmotnost je nastavena v závislosti na teplotě podle EC5, viz [10]. Shodná geometrie modelu byla provedena se čtyřmi variantami materiálových vlastností dřeva, a to za účelem porovnání vlivu materiálových vlastností na výsledky s následným vyhodnocením nejpřesnějších materiálových vlastností pro numerické modelování. V první variantě model počítá s měrnou tepelnou kapacitou a vodivostí dle EC5, ve druhé podle Janssense [19] a ve třetí dle Janssense s nárůstem měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu shodné s EC5. Ve čtvrté variantě je počítáno s charakteristikami podle Janssense s úpravou měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu na 100 kJ/kgK, viz [19].



Obr. 3: Pohled na numerický model [2]

2.2.2 Závěr

Stejně jako i v předchozí studii výsledkem této práce bylo zhodnocení materiálových vlastností, které umožňují nejvíce se výstupy z numerického modelu přiblížit k reálnému chování prvku při požáru, respektive k chování prvku vystavenému normovému požáru ve zkušební peci. Těmito vlastnostmi jsou vlastnosti Janssens viz [19], z EC3 u oceli viz [9] a vlastností Janssens s úpravou měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu na 100 kJ/kgK při 100 °C u dřeva viz [19] u modifikované vrstvy dřeva. Tato úprava umožnila vytvořit efekt parozábrany ve dřevě v místě styku s ocelovým plechem.

2.3 VŠB, Ostrava 2015

V roce 2015 se problematikou zuhelnatění dřeva zabýval Jan Střilka [27]. Hlavním cílem práce je ověření normových hodnot zuhelnatění dřeva a také rozšíření znalostí o tomto jevu. Studie zahrnuje řadu experimentů v kalorimetru a následnou analýzu výsledků.

2.3.1 Laboratorní zkoušky

Laboratorní měření probíhalo na přístroji Mass Loss Calorimetr. Je to přístroj působící na zkoumaný objekt předem definovatelným, stálým tepelným tokem. Dále měří aktuální hmotnost vzorku nebo teplotu zplodin hoření.

Měření probíhalo na čtyřech typech dřeva, které se lišily druhem, nebo řezem. Druhy dřeva byly zvoleny základní, které se používají ve stavebnictví nebo jako okrasné doplňky – a to dub, jasan a smrk, přičemž smrk byl zkoumán ve dvou typech řezu: ve směru vláken a kolmo na směr vláken. Zbytek druhů dřev byl řezán ve směru vláken. Celkem proběhlo 18 experimentů na vzorcích o velikosti 10 x 10 mm. Doba a intenzita působení tepelného toku na jednotlivé vzorky byla stanovena na 10, 15 a 20 min. při hustotě tepelných toků 25, 50 a 75 kW/m².

Laboratorní měření probíhalo pomocí přístroje Omega RD 8800.

2.3.2 Výsledky

Výsledky laboratorního měření jsou znázorněné v grafech a histogramech. Také jsou přidány fotografie vzorků během zkoušky (obr. 4 [27]). Na obrázku je uveden vzhled vzorku v 10, 15 a 20 min zkoušky.



Obr. 4: Hloubka zuhelnatění vzorků smrku při působení tepelného toku 25 kW/m². Doby expozice vzorků jsou zleva: 10, 15 a 20 minut

Ke každému druhu dřeva byl uveden graf ztráty hmotnosti v závislosti na čase. Experiment byl proveden celkem na 6 vzorcích. Tabulky s příslušnými hodnotami a histogram se srovnáním lineárních rychlostí odhořívání v mm/min určitého druhu dřeva pro různé doby expozice.

V závěru autor uvádí dobré protipožární vlastnosti dubu při nízké intenzitě tepelného toku, a naopak nízkou schopnost jasanového dřeva vzdorovat zvýšené teplotě. Rovněž je popsána vysoká rychlost zuhelnatění v prvních 10 minutách zkoušky u všech vzorků a následně její pokles.

V neposlední řadě autor upozorňuje na velký rozdíl vlastností smrkového dřeva v závislosti na směru vláken.

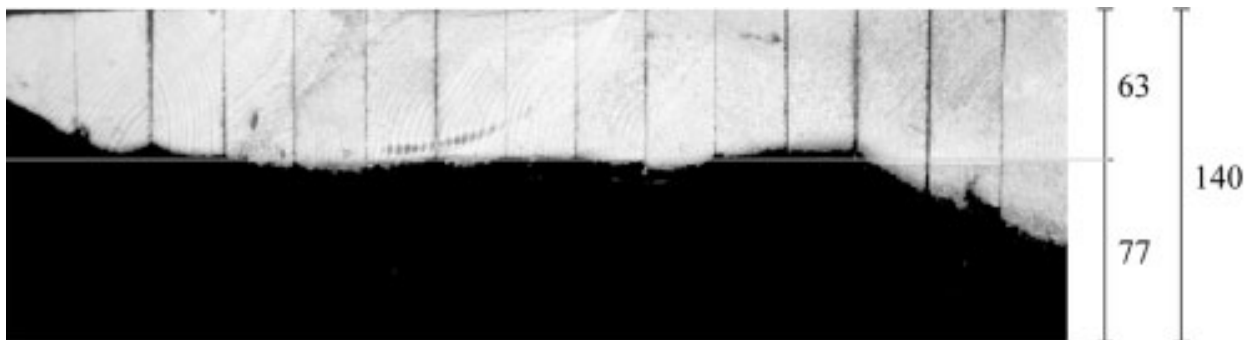
2.4 ETH, Švýcarsko 2003

Studie [14] se skládá ze dvou částí. První část se zabývá zuhelnatěním dřeva, konkrétně dřevěných trámů. Druhá část je soustředěna na modelování dřevo-betonových prvků vystavených normové teplotní křivce. Autory jsou Andrea Frangi a Mario Fontána.

2.4.1 Obsah studie

Výzkumný projekt zabývající se studiem chování dřevěných desek z dutinových prvků a dřevo-betonového kompozitu při požáru byl proveden na Švýcarském federálním technologickém institutu (ETH). Tyto desky se skládají z dřevěných prvků (trámů nebo desek vyrobených z přibíjených dřevěných prken) v tahové zóně, tenké betonové vrstvy v tlakové zóně a smykového spojení mezi dřevem a betonem. Všechny požární zkoušky byly provedeny ve Švýcarské laboratoři pro testování a výzkum materiálů v Dübendorfu. V první sérii výzkumu experimenty probíhaly ve zmenšeném měřítku. Druhá série požárních testů na deskách se zabývala globálním chováním dřevěné konstrukce.

První část práce je založená na laboratorní zkoušce, viz obr. 5, která byla provedena na 14 vzorcích o výšce 140 mm. Vzorky byly vystaveny normové teplotní křivce ze třech stran po dobu 30–110 min. Následně byly získány objemové hmotnosti, velikosti a rychlosti odhořívání ve svislém a vodorovném směru a byly porovnány se statistickými hodnotami získanými z externích zdrojů.



Obr. 5: Řez vzorky po ukončení zkoušky v 110 min [14]

2.4.2 Závěr

Závěrem práce je seznam ze 7 nejdůležitějších bodů získaných na základě experimentálních dat:

- Pro výpočet požární odolnosti dřevěných prvků se běžně používá zjednodušená metoda založená na konstantní rychlosti zuhelnatění. Přesnost této metody je potvrzena zkouškou s různými dřevěnými prvky vystavenými požární křivce ISO 834 po dobu 30–110 min.
- Naměřené průměrné hodnoty rychlosti zuhelnatění pro zkoušené vzorky se lišily mezi 0,67 a 0,70 mm/min. Výsledky jsou v dobré shodě se základními hodnotami uvedenými v [10].
- U průřezu s hranou profilu menší než 40-60 mm se rychlost zuhelnatění výrazně zvětšuje. Proto autoři doporučují nepoužívat hodnoty z [10] pro menší dřevěné prvky, než jsou tyto rozměry.
- Dřevěné desky vyrobené ze sbíjených lamelových prken musí být vzduchotěsně utěsněny na neexponované straně, aby se zabránilo pronikání horkých plynů a plamenů mezi dřevěná prkna. Pro takové vzduchotěsně utěsněné desky lze uvažovat stejnou konstantní rychlost zuhelnatění jako pro masivní dřevěné desky.
- Vzhledem k dobrému izolačnímu chování zuhelnatělé vrstvy a dřeva, vykazují teplotní profily skrz dřevěné prvky vystavené ohni strmý teplotní gradient.
- Hloubka tepelného průniku se zvyšuje se zvyšující se dobou trvání požáru. Teplotní profily dřevěných prvků vystavených požáru závisí na době trvání vystavení požáru.
- Naměřené teplotní odezvy byly větší, než na základě vypočtené rovnice uvedené v Holz Brandschutz Handbuch a ENV-1995-1-2. Nově byl vyvinut výpočtový model poskytující lepší předpověď naměřené teploty profilu. Tento teplotní model tvoří základ pro vylepšenou metodu výpočtu pro požární odolnost nosných dřevěných prvků vystavených požáru.

2.5 Ostatní

V rámci seznámení s řešenou problematikou byly rovněž prostudovány další studie zabývající se prostupem tepla ve dřevěném spoji s ocelovou deskou, viz [1], [3], [4], [6] – [12], [15], [16], [18], [19] a [21] – [26]. Tyto studie se liší materiálovými vlastnostmi dřeva, umístěním ocelové desky (vložená/umístěná na povrchu), spojovacími prostředky (svorníky, kolíky a jejich kombinace), mechanickým zatížením a použitým softwarem. Některé studie mají proveden vlastní validační experiment, viz [1], [3], [12], [25], [28] a další. Jejich výsledkem je vždy stanovení chování dřeva ve spoji za normového požáru a určitá doporučení pro modelování.

Dále byly prostudovány práce zabývající se zuhelnatěním samotného dřeva, šířením tepla, plynů a vlhkosti v dřevěných prvcích bez dodatečných úprav. To jsou studie [14], [16], [21], [26] a další.

Zvláštní prací je studie [18], která se zabývá tepelnou odezvou a rychlostí zuhelnatění dřevěného tramu vystaveného různým druhům parametrických křivek. Dvě parametrické křivky z této studie byly použité v jedné z numerických analýz.

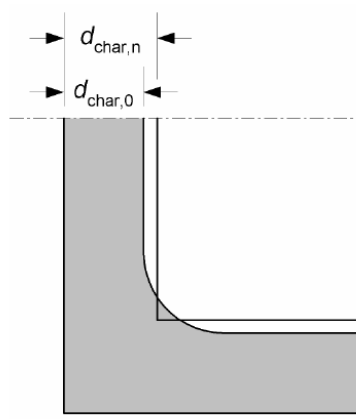
3 Chování použitých materiálů při zvýšené teplotě

3.1 Dřevo

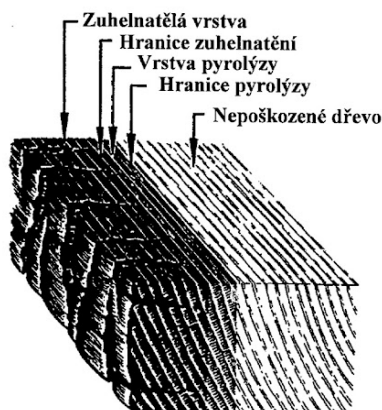
Dřevo je heterogenní anizotropní materiál. Vlastnosti dřeva jsou ovlivňovány obsahem vody ve dřevě, zvyšující se teplotou, povrchovou úpravou, věkem, směrem vláken, jeho druhem a původem. Během hoření ve dřevě probíhají následující procesy [13]:

80–100 °C	Vysoušení dřeva – ztráta volné vlhkosti
100–150 °C	Celková ztráta volné vlhkosti
150–200 °C	Ztráta vázané vlhkosti. Začínají se tvořit produkty pyrolýzy.
200–280 °C	Pomalá pyrolýza: intenzivní vývoj páry, uvolnění prchavých produktů
280–400 °C	Nárůst teploty, tvorba lehce spalných plynů
400–500 °C	Maximální tvorba hořlavých plynů
nad 500 °C	Snižování množství plynných zplodin

Tyto procesy postupně pokračují hlouběji do dřevěného průřezu, až do konce požáru nebo do úplného zuhelnatění prvku, viz obr. 6 a obr. 7. Vlhkost z průřezu uniká trhlinami, rohy a otvory. S nárůstem teploty se mění vlastnosti dřeva, jako jsou tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, objemová hmotnost a další, viz kapitola 5.2.



Obr. 6: Jednorozměrná a nominální hloubka zuhelnatění [8]



Obr. 7: Proces hoření dřeva

Při teplotě dřeva do 300 °C se předpokládá, že pevnost a tuhost dřeva je stejná jako při 20 °C. Poloha izotermy 300 °C stanovuje hloubku zuhelnatění. V praxi je tato teplota závislá na mnoha faktorech. Hloubka zuhelnatění je definována rychlostí odhořívání a časem vystaveným normovému požáru. Rozlišuje se jednorozměrná hloubka zuhelnatění a nominální hloubka zuhelnatění, která zohledňuje rychlejší odhořívání rohů, viz obr. 6.

3.2 Ocel

Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších legujících prvků, která obsahuje méně než 2,14 % uhlíku. Je běžně používaná u téměř všech druhů staveb, jako např. na samostatné nosné či spojovací prvky. Tento materiál má velkou tažnost, relativně malou hmotnost, je recyklovatelný a jeho použitý výrazně zrychluje výstavbu. Nevýhodou je rychlé šíření tepla po celém objemu ocelového prvku. Stejně jako i u dřeva vlastnosti oceli jsou závislé na teplotě, podrobněji viz kapitola 5.2 [9].

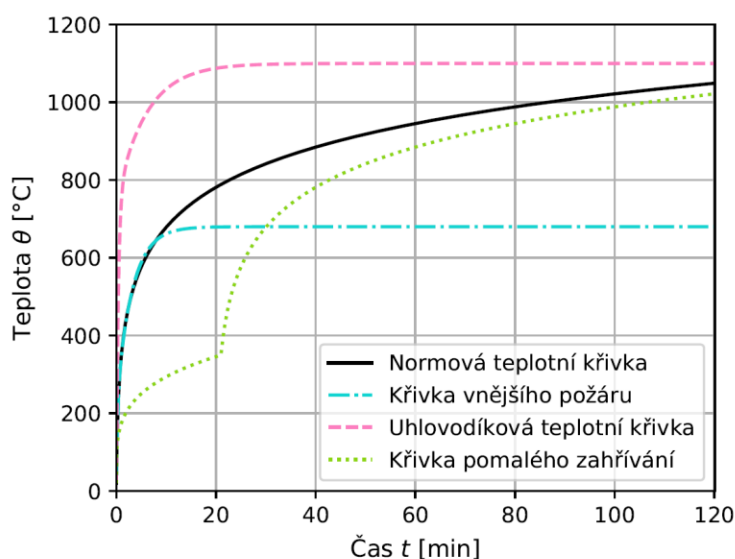
Obsah uhlíku (chemická značka "C") má největší vliv na pevnost oceli. Čím je větší obsah C, tím, ocel vykazuje větší pevnost. Se stoupajícím obsahem uhlíku se zlepšuje tvrdost a kalitelnost, tažnost, pevnost v ohybu a svařitelnost klesá, viz [17].

Při teplotách do 350 °C dochází k rekrystalizaci mikrostruktury, přičemž mechanické vlastnosti oceli se nemění natolik, aby ohrozily bezpečnost objektu [17]. Teplota zhruba kolem 500 °C se považuje za kritickou teplotu oceli. Po překročení této kritické hranice může dojít k přetvoření ocelové konstrukce a následně k ztrátě její únosnosti. Následně dochází ke smršťování struktury oceli v důsledku změny její mikrostruktury. Pokud ocel není zdeformovaná, lze ji po požáru obvykle opět použít.

4 Modely požáru

4.1 Nominální teplotní křivky

Nedílnou součástí vyhodnocení odezvy konstrukce na teplotní účinek je definice teplotního zatížení. Jedná se o abstraktní modely tzv. nominální teplotní křivky, které popisují průběh nárůstu teploty po flashoveru v konstrukcích. V této podkapitole jsou popsány modely, které mohou vzniknout v dřevěných konstrukcích. Na obr. 8 jsou znázorněny 3 druhy vybraných nominálních křivek [8], [20].



Obr. 8: Nominální křivky [20]

4.1.1 Normová teplotní křivka

Tato křivka se také označuje jako ISO 834. Je univerzální křivkou pro všechny typy objektů. Na jejím základě jsou stanoveny tabulkové hodnoty požární odolnosti, součinitele odhořívání apod. [22].

Nominální normová teplotní křivka je popsána rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

4.1.2 Křivka vnějšího požáru

Tato křivka je určena pro venkovní konstrukce. Do teploty 660 °C je křivka totožná s normovou teplotní křivkou, poté je teplota konstantní.

Křivka vnějšího požáru je popsána rovnicí:

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

4.1.3 Křivka pomalého zahřívání

Tato křivka se vztahuje k požárům vzniklým v izolovaných malých prostorech, např. podhledy. Teplota u těchto požárů pomalu stoupá. Její matematické vyjádření je popsáno níže.

$$\text{Pokud } 0 < t \leq 21, \text{ to} \quad \theta_g = 154 \cdot \sqrt[4]{t} + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\text{Pokud } t > 21, \text{ to} \quad \theta_g = 345 \cdot \log(8 \cdot (t - 20) + 1) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

4.1.4 Ostatní nominální křivky

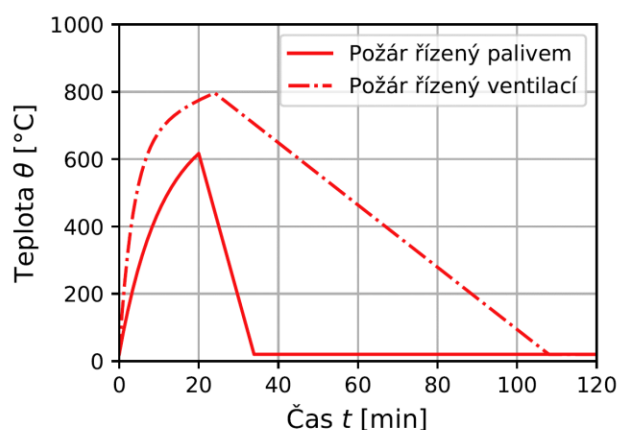
Následně existují nominální teplotní křivky pro různé zkušební metody, např. tunelové teplotní křivky (HCM, RABT a RWS) a úhlovodíková teplotní křivka. Tyto křivky dosahují oproti již zmíněným křivkám vyšších teplot s rychlým nárůstem a používají se v provozech, kde nemohou být navrženy dřevěné konstrukce. Proto tyto křivky v numerických modelech nebudou použity.

4.2 Parametrické teplotní křivky

Parametrické teplotní křivky patří do skupiny zjednodušených modelů požáru. Popisují požár ve fázi po flashoveru. Na rozdíl od nominálních teplotních křivek je zde potřeba mít pro výpočet vstupní parametry, které popisují požární úsek. To jsou plocha požárního úseku, požární zatížení, počet a rozměry otvorů, a vlastnosti ohraničujících konstrukcí (ρ , c a λ).

4.2.1 Parametrická teplotní křivka podle přílohy A, CSN EN 1991-1-2

V závislosti na přístupu kyslíku, se rozlišují 2 typy křivek: požár řízený palivem v případě nedostatku kyslíku a požár řízený ventilací v opačném případě, viz obr. 9. Přístup kyslíku je zajištěn otvory v požárním úseku.



Obr. 9: Parametrické křivky [6]

Níže jsou uvedeny základní rovnice křivky. Podrobný postup výpočtu je uveden v normě [24].

Teplotní křivka ve fázi ohřevu je dána rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Teplotní křivka ve fázi chladnutí je dána rovnicí:

$$\text{Pokud } t^*_{max} \leq 0,5, \text{ to } \theta_g = \theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\text{Pokud } 0,5 < t^*_{max} < 2, \text{ to } \theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t^*_{max}) \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

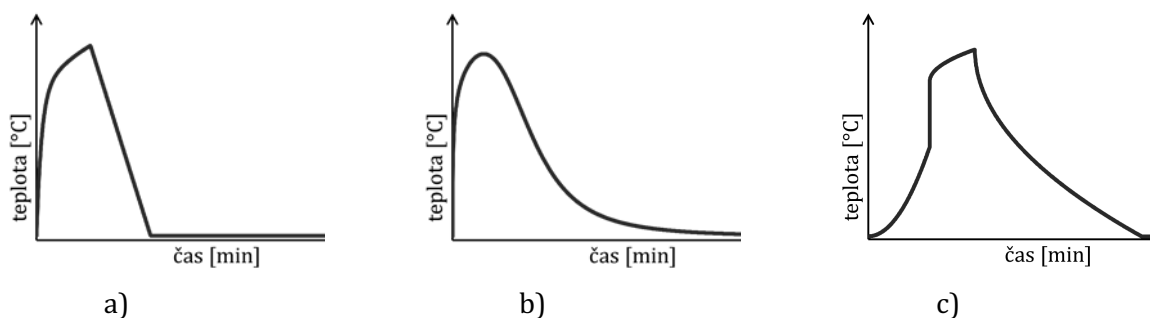
$$\text{Pokud } t^*_{max} \geq 2, \text{ to } \theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

4.2.2 Další parametrické teplotní křivky

Příloha A normy ČSN EN 1991-1-2:2004 byla v některých zemích CEN nahrazena národními křivkami [5].

V dánské národní příloze k EN 1991-1-2:2004 lze najít úpravu pro výpočet parametrické teplotní křivky (DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014), kde je teplota v požárním úseku popsána jednou rovnicí pro celý průběh požáru. Omezení, kdy lze křivku použít, zůstává obdobné jako v současné příloze A.

Další alternativou ke křivce v příloze A je parametrická požární křivka iBMB (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz TU Braunschweig). Tuto křivku předložili v roce 2003 němečtí výzkumní pracovníci a postup výpočtu je obsažen v německé národní příloze (DIN EN 1991-1-2/NA:2010). Křivka je přímo odvozena z rychlosti uvolňování tepla a je charakterizována třemi body, ve kterých se mění její sklon. Zohledňuje účinek prostorového vzplanutí, kdy v růstové fázi dojde v požárním úseku k prudkému nárůstu teploty. Na obr. 10 je zobrazen schematický tvar parametrických křivek [5].



Obr. 10: Schematické tvary parametrických křivek:

a) křivka podle přílohy A; b) DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014; c) DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12

Tyto parametrické teplotní křivky jsou uvedeny informativně. V numerickém modelu této práce nejsou použity.

5 Numerický model

Použitý model dřevo ocelového spoje se svorníky zcela kopíruje geometrii, materiálové vlastnosti a velikost tetrahedrální sítě ze studie [28]. Výjimkami jsou tzv. submodely, které byly vytvořeny na základě tohoto modelu. Tyto submodely se liší geometrií, vlastnostmi materiálu, a dalšími parametry, jak je uvedeno dále.

5.1 Geometrie

5.1.1 Model se svorníky a jeho submodely

Hlavní model je vytvořen v souladu s [8] – [11] a [20] a je již popsán v kapitole 2.1.1. Při vytváření submodelů však dochází ke změnám geometrie. Numerické modely jsou vždy v Ansys Workbench zredukovány podle os symetrie.

Submodely použité při analýze vlivu tloušťky modifikované vrstvy jsou vytvořené s tloušťkou této vrstvy 4, 5 a 6 mm. Platí, že z jedné strany se nachází v kontaktu s ocelovou deskou a ze strany druhé s nemodifikovaným dřevem. Se zvětšující se tloušťkou modifikované vrstvy se redukuje tloušťka nemodifikovaného dřeva. Ostatní parametry modelů zůstávají nezměněné.

Submodely použité při analýze vlivu ocelového plechu jsou vytvořeny s ocelovým plechem tloušťky 4 a 8 mm. Výška a šířka této desky zůstává nezměněna 80 x 300 mm. Poloha plechu je zvolena tak, aby jeho těžiště bylo umístěno v místě křížení os symetrie. Ve všech případech modifikovaná vrstva dřeva nemění svoji tloušťku (3 mm), ale polohu. Platí, že tato vrstva je v těsném kontaktu s ocelovým plechem. Výsledkem změny polohy modifikované vrstvy dřeva je změna geometrie nemodifikované dřevěné části. Platí, že nemodifikovaná část dřeva je v těsném kontaktu s modifikovanou vrstvou dřeva. Ostatní parametry modelů zůstávají nezměněny.

Submodely použité při analýze vlivu výšky trámu jsou vytvořeny s výškou trámu 150, 160 a 170 mm. Se zvýšením modelu se také zvyšuje i vzduchová mezera tak, aby horní hrana této části modelu odpovídala horní hraně trámu. Ostatní parametry modelů zůstávají nezměněny.

Submodely použité při analýze vlivu šířky trámu jsou vytvořeny s šířkou trámu 150, 160 a 170 mm. Ostatní parametry modelů zůstávají nezměněny.

Submodely použité při analýze vlivu svorníků jsou vytvořené s velikostí spojovacích prostředků 12 a 16 mm. U submodelu s použitím svorníku M12 jsou závitové tyče o průměru 12 mm (v modelu zjednodušena jako hladká bez závitů), konstrukční podložky o průměru 30 mm, výšky 2,5 mm. Svorník je držen maticí výšky 10 mm. Matice je v modelu zjednodušena na válec o průměru 20 mm. Přesah závitové tyče je v modelu nastaven na 3 mm. U submodelu s použitím svorníku M16 jsou závitové tyče o průměru 16 mm (v modelu zjednodušena jako hladká bez závitů), konstrukční podložky o průměru 30 mm, výšky 2,5 mm. Svorník je držen maticí výšky 14 mm. Matice je v modelu zjednodušena na válec o průměru 25 mm. Přesah závitové tyče je v modelu nastaven na 3 mm. U všech modelů platí, že pod konstrukční podložkou se nachází válcový objekt o průměru odpovídajícímu příslušné podložce s otvorem o průměru odpovídajícímu velikosti závitové tyče. Rovněž jsou zredukované otvory v plechu a modifikované vrstvě dřeva, dle odpovídající závitové tyče. Vzduchová mezera zůstává nezměněna.

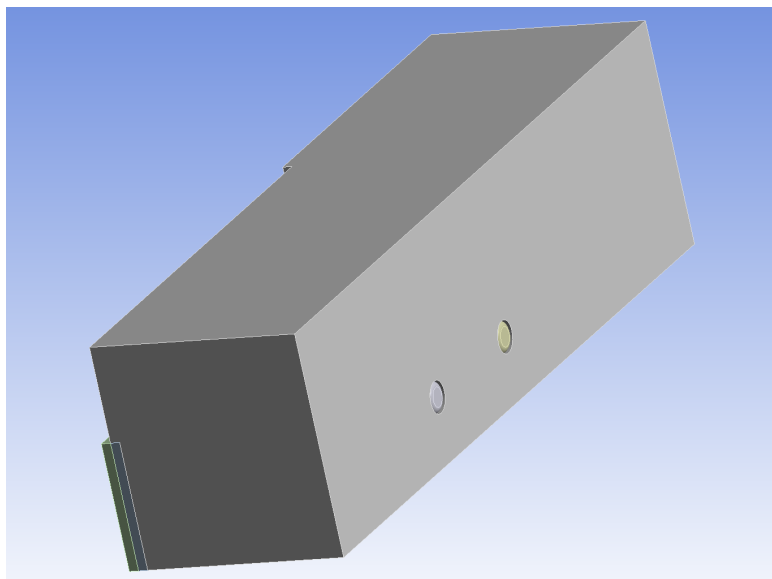
Submodely použité při analýze vlivu mezery mezi trámy jsou vytvořené o velikosti této mezery 2, 4 a 6 mm. Tato mezera se nachází ve svislé ose symetrie a redukuje velikost trámu, modifikované vrstvy dřeva a vzduchové mezery nad ocelovým plechem. Ostatní parametry modelů zůstávají nezměněny.

Submodely použité při analýze vlivu pevnosti dřeva a analýze vhodnosti materiálových vlastností zcela odpovídají původnímu modelu.

V poslední citlivostní analýze se využívá numerický model spoje s 2 vloženými ocelovými deskami. Geometrie a poloha spojovacích prostředků zůstává totožná s originálním modelem. Nově se vyskytuje ocelový plech, který je zaveden do modelu jako obdélník 40 x 150 mm o tl. 6 mm. Tento plech je umístěn ve vzdálenosti 43 mm od kraje spoje a 21 mm od osy. V těsném kontaktu k plechu je modelována vrstva dřeva s redukovanými vlastnostmi. Tato vrstva kopíruje výšku a šířku plechu a má tloušťku 3 mm. Mezera pro vložení ocelové desky má velikost 30 x 150 x 6 mm a je umístěna nad ocelovým plechem. Dřevěný trám je modelován jako průběžný obdélník 70x70 mm. V místě vzduchové mezery, spojovacích prostředků, ocelového plechu a modifikované vrstvy je přerušen.

5.1.2 Model s kolíky

Dalšími zkoumanými spoji jsou dřevěné spoje s vloženou ocelovou deskou s dřevěnými a ocelovými kolíky. Dřevěný trám a ocelová deska zcela kopírují polohu a geometrii předchozího modelu. Jedná se tedy o trám 140 x 140 mm a ocelový plech 80 x 300 mm, tl. 6 mm. Oboje jsou zredukované podle os symetrie spoje. Rozdílem jsou pouze spojovací prostředky. Výsledný vzhled numerického modelu je vidět na obr. 11.



Obr. 11: Numerický model dřevěného spoje s vloženou ocelovou deskou a ocelovými kolíky

Dřevěné kolíky jsou modelovány jako jednoduché válce o průměru 10 mm a délky 70 mm těsně vložené do otvoru v trámu a plechu. Netěsnosti způsobené vroubkovaným povrchem kolíku nejsou v modelu zahrnuté, jelikož jejich vliv při působení požáru je minimální. Ukončení kolíků je zarovnáno s hranou trámu. Kolíky nejsou nijak požárně chráněné. Příklad použitého typu kolíků je vidět na obr. 12.

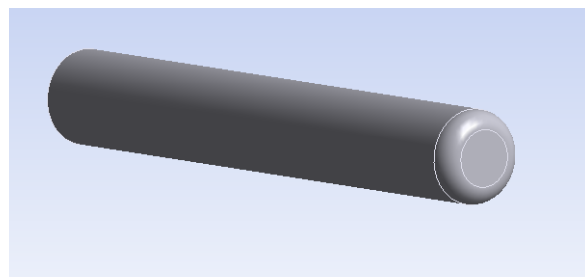


Obr. 12: Dřevěný kolík s vroubkovaným povrchem

Ocelové kolíky jsou modelovány jako válce o průměru 10 mm a délky 70 mm těsně vložené do otvoru v trámu a plechu. Ze strany osy spoje je kolík ukončen jako jednoduchý válec. Z vnější strany spoje model kolíku kopíruje jeho skutečnou geometrii (obr. 13), tzn. okraje kolíků jsou zaoblené (obr. 14). Kolíky nepřechňívají přes vnější hranu trámu a následně nejsou chráněné žádnými protipožárními prostředky. Příklad použitého typu spojovacích prostředků je vidět na obr. 13 a jejich geometrie v numerickém modelu na obr. 14. Z důvodů eliminaci duplikace tepelného zatížení na dřevěný trám je prostor mezi hranami kolíků a hranou trámu modelován jako vzduchová mezera o max. tloušťce 2 mm a max. průměru 10 mm.



Obr. 13: Ocelový válcovaný kolík



Obr. 14: Model válcovaného kolíku

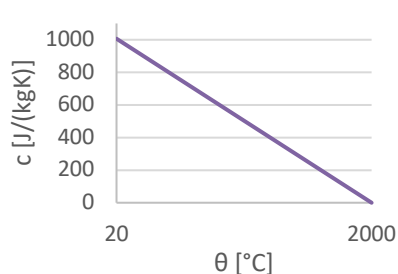
5.2 Materiálové vlastnosti

Ve všech submodelech jsou použity materiálové vlastnosti oceli dle EC5, viz [9]. Tyto vlastnosti jsou uvedeny na obr. 18 - obr. 20. Výchozí nastavení vzduchu převzaté z knihovny materiálů Ansys, který je použit v mezerách modelu, je uvedeno na obr. 15 - obr. 17. Materiálové vlastnosti dřevěného trámu odpovídají vlastnostem z [9]-[11], [20], viz obr. 21 - obr. 24. Materiálové vlastnosti dřeva dle [19] s úpravou měrné tepelné kapacity na 100 kJ/kgK ve vrstvě dřeva těsně přiléhající k plechu jsou uvedeny na obr. 23 (v grafu označeno jako J').

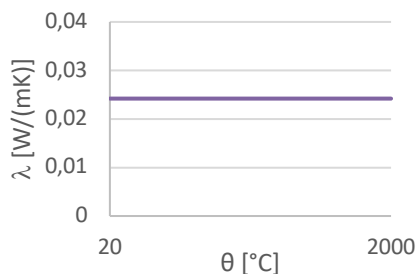
Submodely použité při analýze vlivu pevnosti dřeva jsou založené na změně objemových hmotností dřeva pro pevnosti dřeva C20, C22, C24 a C27, viz obr. 21. Měrná tepelná kapacita, viz obr. 21, a tepelná vodivost, viz obr. 20, jsou u všech těchto modelů totožné.

Při analýze materiálových vlastností se, kromě již uvedených vlastností z Eurokódu (v grafu na obr. 22 označeno jako EC5), také zavádějí materiálové vlastnosti dřeva dle Janssense [19] (v grafech na obr. 22 a 23 označeno písmenem J) a dle Menis [22] (na obr. 22 - obr. 23 označeno jako M).

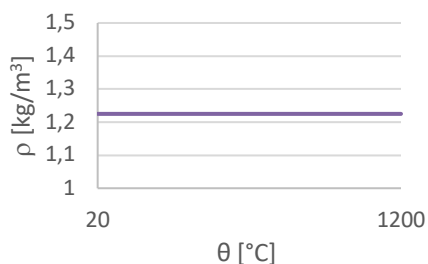
U modelu s dřevěnými kolíky jsou použité materiálové vlastnosti dle [9] s úpravou objemové hmotnosti a zabudované vlhkosti dle [7]. Měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost jsou použity dle obr. 22 a obr. 23. Objemová hmotnost uvedená na obr. 24 je použita pro dřevěné kolíky. Jedná se o předpoklad materiálových vlastností bukového dřeva na základě stejné rychlosti odhořívání pro jehličnaté dřevo a buk [10].



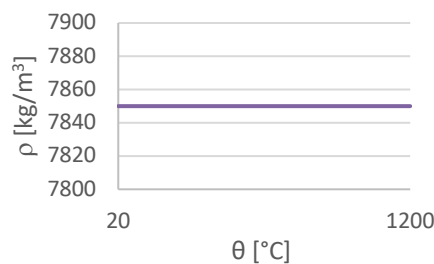
Obr. 15: Měrná tepelná kapacita vzduchu



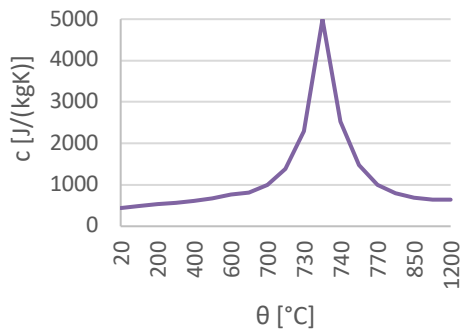
Obr. 16: Tepelná vodivost vzduchu



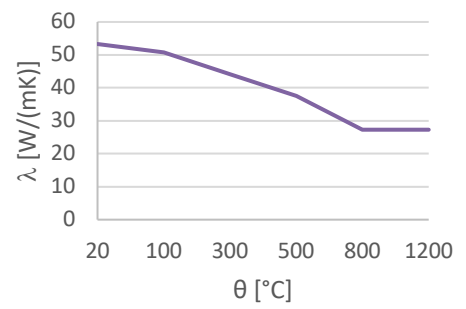
Obr. 17: Objemová hmotnost vzduchu



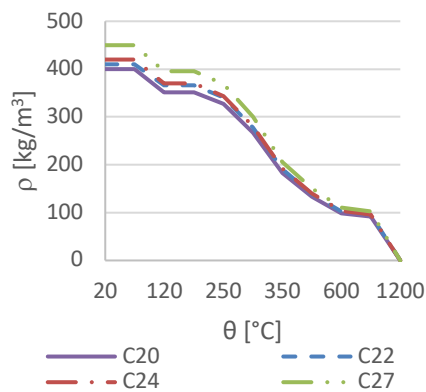
Obr. 18: Objemová hmotnost oceli



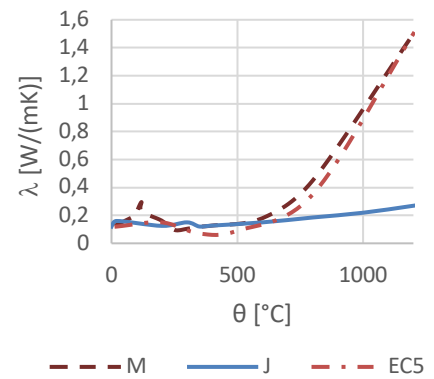
Obr. 19: Měrná tepelná kapacita oceli



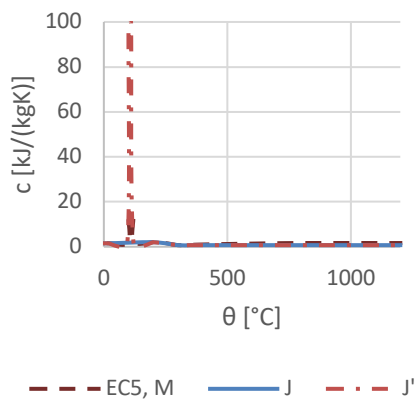
Obr. 20: Tepelná vodivost oceli



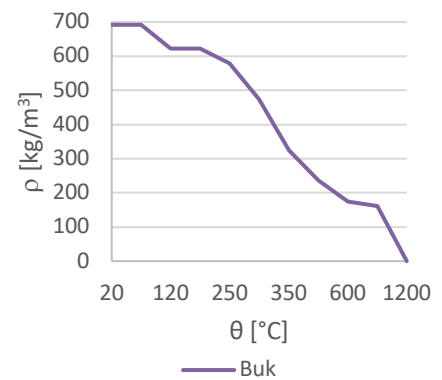
Obr. 21: Objemová hmotnost jehličnatého dřeva



Obr. 22: Tepelná vodivost dřeva



Obr. 23: Měrná tepelná kapacita dřeva



Obr. 24: Objemová hmotnost bukového dřeva

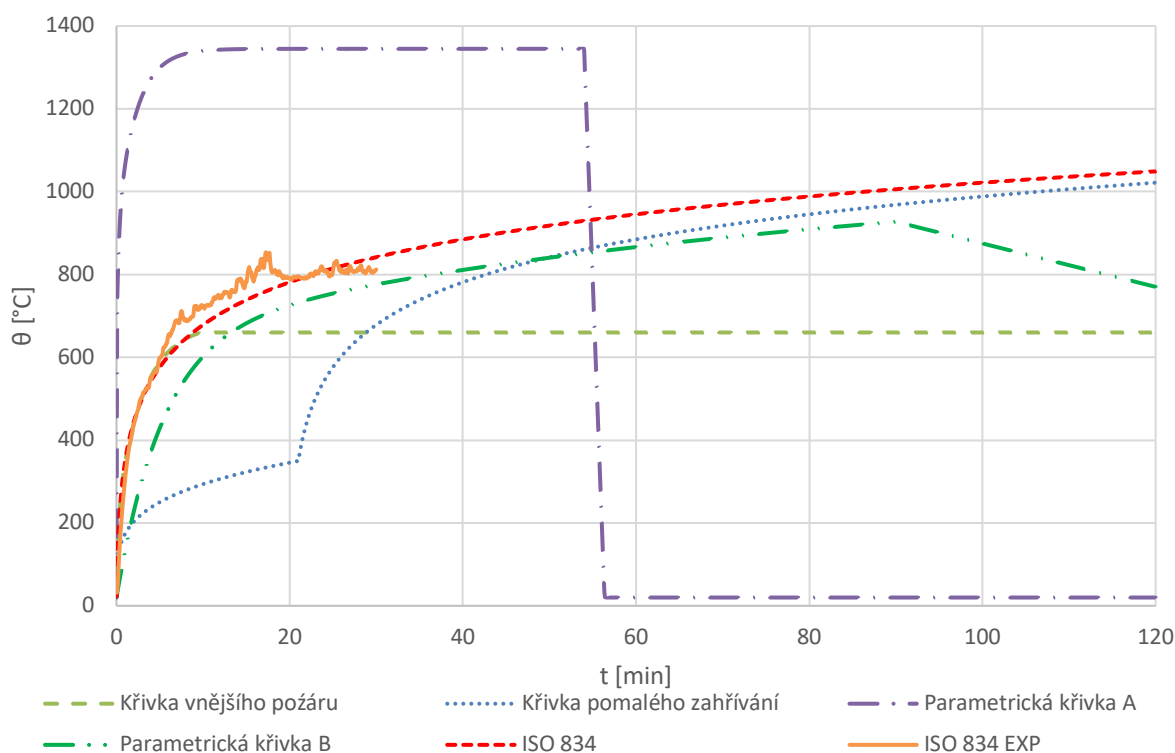
5.3 Tepelné zatížení

Ve všech citlivostních analýzách kapitoly 5 jsou spoje vystavené normové teplotní křivce. V následující kapitole jsou modely kromě ISO 834 vystavené také křivce vnějšího požáru, křivce pomalého rozhořívání a parametrickým křivkám. Parametrické křivky jsou převzaty ze studie [18]. Konkrétně se jedná o křivku požáru řízeném ventilací a požáru řízeném palivem. Jejich vstupní parametry jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Vstupní údaje parametrických křivek

Křivka	O	b	q
	[m ^{1/2}]	[J/(m ² •s ^{1/2} •K)]	[MJ/m ²]
A	0,2	500	900
B	0,04	1500	300

Na obr. 25 jsou zobrazeny všechny použité křivky. Celkem jsou pro různé modely použity 3 nominální křivky a 2 křivky přirozeného požáru, tzn. křivky, které zahrnují i fázi chladnutí. Parametrická křivka A je zvolená tak, aby nárůst teploty byl výrazně vyšší než ISO 834. Zavedením takového požáru lze zjistit tepelnou odezvu spoje na náhlé zvýšení teploty. Také je zvolená parametrická křivka B s menším nárůstem teploty než u ISO 834. Z důvodu získání vzájemně porovnatelných výsledků byly všechny numerické modely, kromě určitých modelů v kap. 6, zatíženy křivkou ISO 834 získané z experimentu.

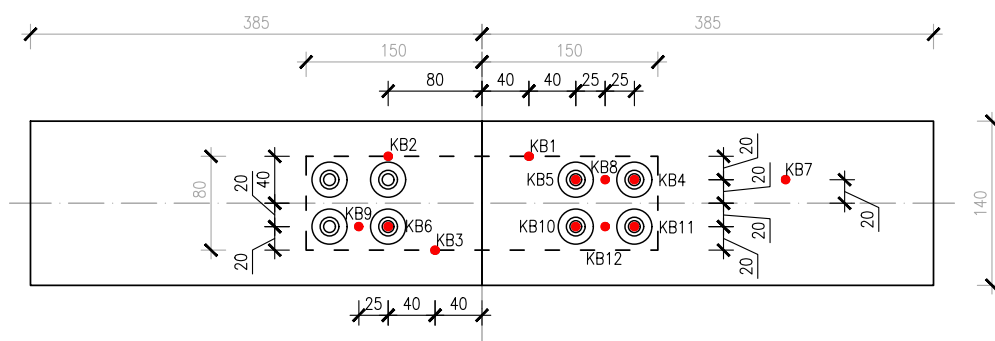


Obr. 25: Tepelné křivky zavedené do numerických modelů

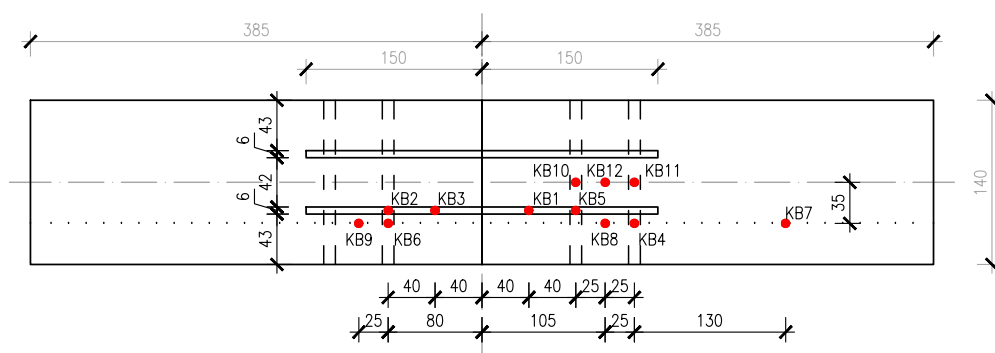
5.4.2 Model s dvěma ocelovými plechy

V předchozích modelech byly kontrolní body pojmenovány jako TCx, z angličtiny thermocouples. Protože se jedná o jeden numerický model, jehož geometrie se výrazně liší od ostatních numerických modelů, jsou nově tyto body pojmenovány jako KBx. Nelze je efektivně porovnávat s experimentálně získanými hodnotami z [28]. Nicméně poloha některých kontrolních bodů v maximální možné míře kopíruje polohu TCx, konkrétně se jedná o body KC1, KC2, KC3 v ocelové desce, KC4, KC5 ve svornících a KC8 a KC9 v trámu. Jejich umístění se však může mírně lišit, kvůli nerovnoměrnosti tetrahedrálních výpočetních sítí. Charakteristiky všech sítí zůstávají nezměněné.

Z důvodu zlepšení názornosti výsledků tepelné odezvy spoje byly nově přidány kontrolní body KB 10, KB11 a KB12. Kontrolní body KB10 a KB11 se nachází na křížení osy svorníků a osy spoje. Poslední body KB12 se nachází v trámu mezi svorníky. Schéma umístění bodů znázorňující jejich polohu je na obr. 28 a obr. 29.



Obr. 28: Schéma umístění bodů – pohled



Obr. 29: Schéma umístění bodů – půdorys

6 Citlivostní analýza

Tato kapitola uvádí ověření vlivu vybraných vlastností na přestup tepla ve všech kontrolních bodech dřevo-ocelového spoje. Nejprve byla provedena analýza vlivu materiálových vlastností dřeva a analýza vlivu velikosti modifikační vrstvy, díky níž je v modelu simulována akumulace vlhkosti u ocelového plechu vloženého ve dřevě. Na základě stanovených nevhodnějších parametrů byla provedena optimalizace spoje pomocí řady dalších citlivostních analýz, založených na změně geometrických parametrů a vlastnostech dřeva. K uváděným analýzám byl použit výpočetní nástroj – Ansys Workbench.

6.1 Velikost modifikované vrstvy

Za účelem zpřesnění numerického modelu byla provedena analýza vlivu velikosti modifikované vrstvy dřeva na přestup tepla ve spoji za vysokých teplot. Konkrétně se jedná o vrstvu, která se nachází v blízké těsnosti ocelové desky, jejíž materiálové vlastnosti odpovídají vlastnostem daným Janssenem [19] s úpravou měrné tepelné kapacity, viz. 3.2.

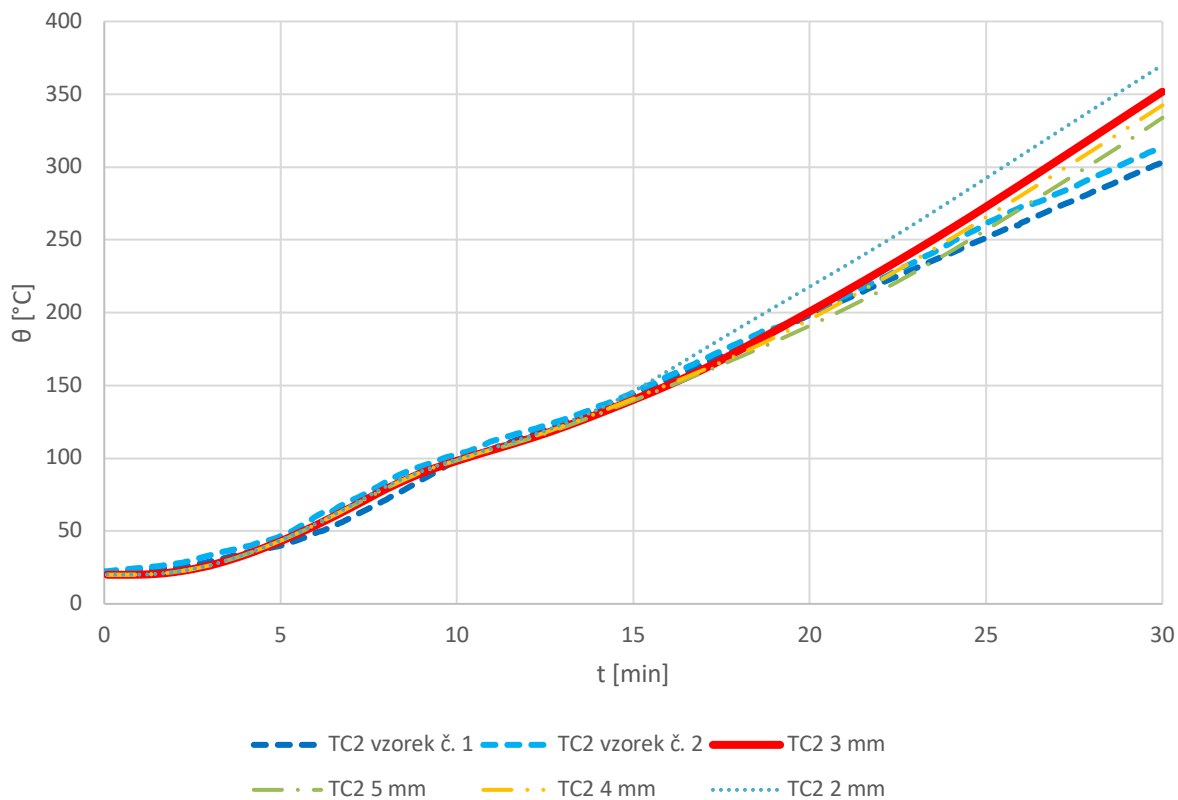
Pro zjednodušení výpočtu byla modifikovaná vrstva uvažována jako hranol, kopírující výšku a šířku přilehající ocelové desky. Dalšími zjednodušeními jsou předpoklad rovnoměrné tloušťky této vrstvy po celé její ploše a neměnnost v čase. Zkoumané tloušťky jsou 5, 4, 3 a 2 mm. Doporučená tloušťka této vrstvy dle [2] a [28] je 3 mm.

6.1.1 Výsledky numerického výpočtu

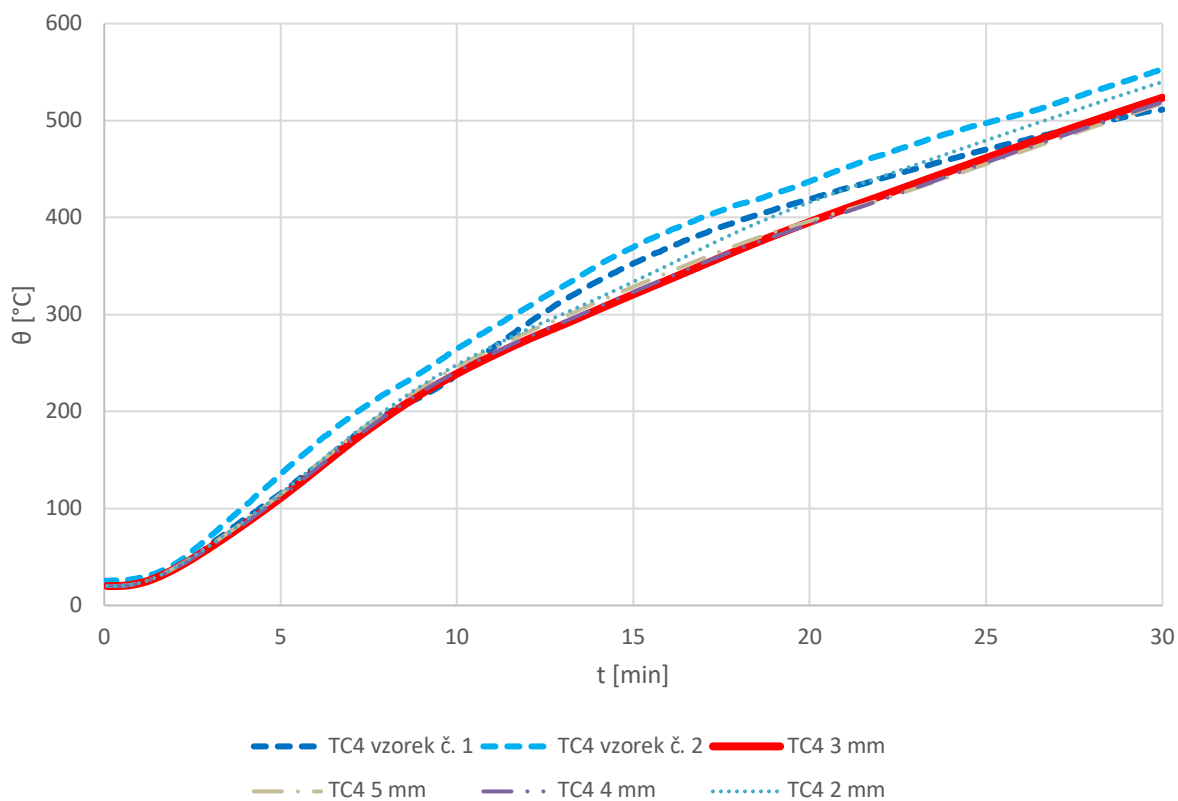
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v plechu (TC2), viz obr. 30, ve svorníku (TC4), viz obr. 31 a v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 32. Nárůst teploty do 10 min je shodný téměř u všech tloušťek modifikované vrstvy a odpovídá naměřeným hodnotám z experimentu. Po 10. minutě se teploty začínají lišit. Zavedením modifikační vrstvy ve dřevěné části modelu lze, s relativně s velkou přesností, odhadnout chování spoje za požáru v čtvrtině rozpětí krajního svorníku, viz obr. 31. Nicméně zavedení modifikační vrstvy prakticky nemá význam při odhadu teploty ve dřevěném trámu, viz obr. 32.

Vysvětlivky ke grafům:

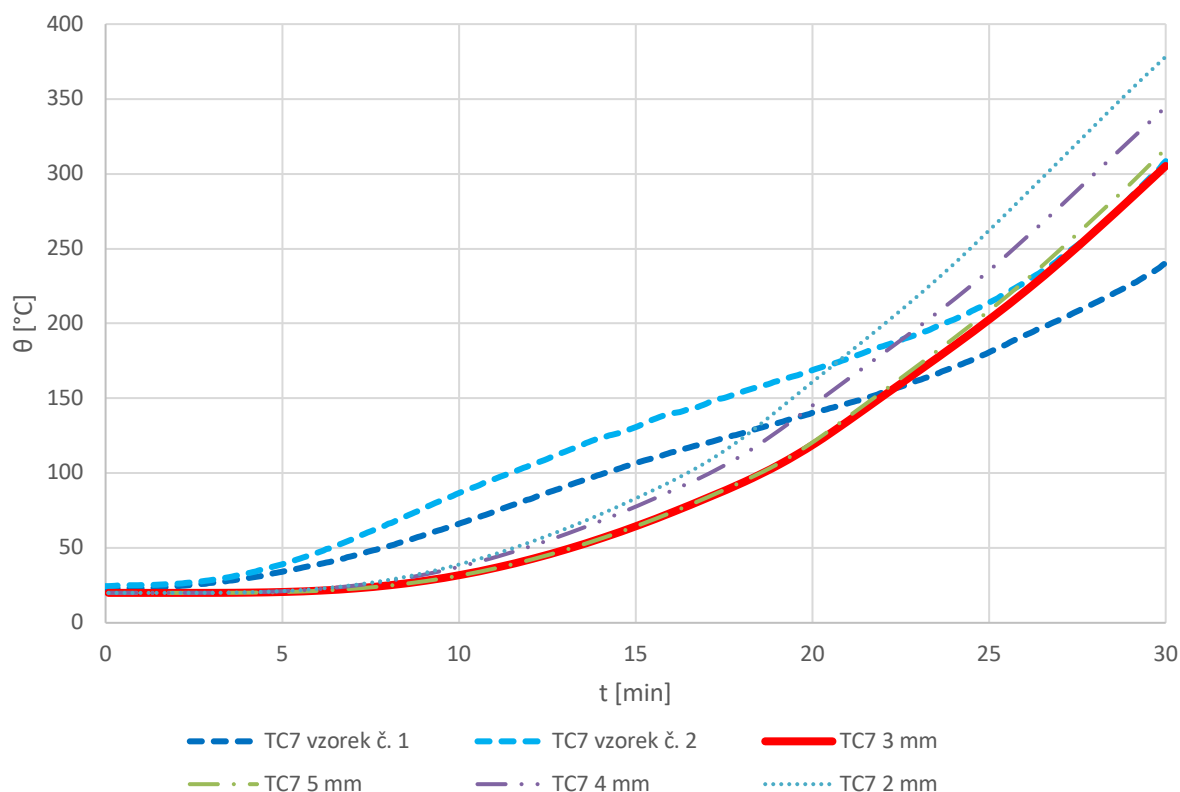
- TCx vzorek č.1 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č.1, viz [28]
- TCx vzorek č.2 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č.2, viz [28]
- TCx - teploty z numerické analýzy



Obr. 30: Rozložení teploty v bodě TC2 při různých tloušťkách modifikované vrstvy



Obr. 31: Rozložení teploty v bodě TC4 při různých tloušťkách modifikované vrstvy



Obr. 32: Rozložení teploty v bodě TC7 při různých tloušťkách modifikované vrstvy

6.1.2 Závěr numerického výpočtu

Na základě provedených experimentů lze předpokládat, že zavedení modifikační vrstvy umožňuje relativně přesný odhad nárůstu teploty ve spojovacích prostředcích a ocelovém plechu. V tab. 2 jsou vypsány teploty, jejichž hodnoty se v čase 30. min nachází mezi výsledky získanými z experimentu z [28]. Za účelem posouzení výsledných dat této analýzy, se toto rozmezí experimentálních hodnot považuje za správné.

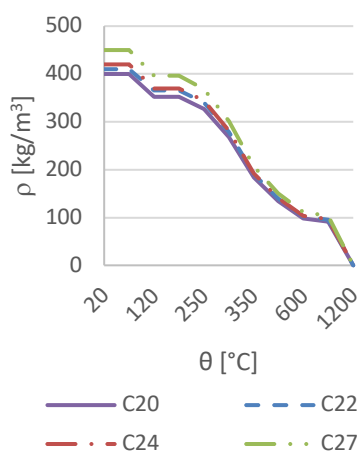
Tab. 2: Výsledky numerické analýzy tloušťky modifikované vrstvy

Tloušťka mod. vrstvy	Číslo kontrolního bodu									Počet vhodných bodů
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	
2 mm	X			X					X	3
3 mm	X		X	X	X		X	X	X	7
4 mm				X	X			X	X	4
5 mm				X				X	X	3

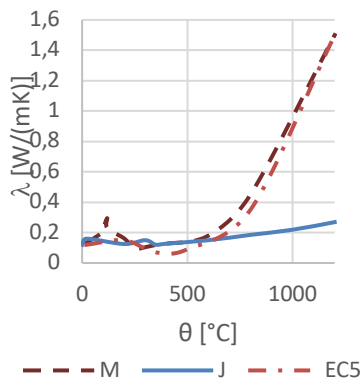
Podle získaných výsledků lze považovat tloušťku modifikované vrstvy 3 mm za hodnotu, která nejvíce kopíruje reálné chování dřeva. Při detailnějším posouzení této vrstvy by se mělo uvažovat s její tvarovou proměnlivostí závislou na čase a podmínkách požáru.

6.2 Materiálové vlastnosti dřeva

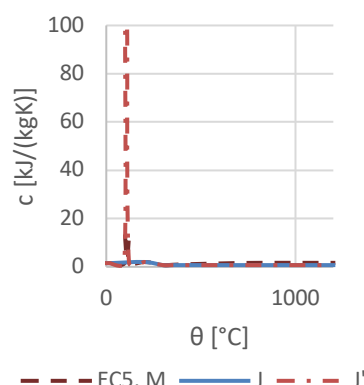
V práci [1] byly analyzovány materiálové vlastnosti dřeva od řady autorů. Citlivostní analýza ukázala, že největší shody výsledků modelu s experimentem je dosaženo při použití vlastností dle Janssense [19]. Pro rozšíření tohoto tématu jsou v této podkapitole prověřovány rovněž vlastnosti převzaté od Menise [22]. Tyto vlastnosti jsou uvedeny níže.



Obr. 21: Objemová hmotnost jehličnatého dřeva



Obr. 22: Tepelná vodivost dřeva



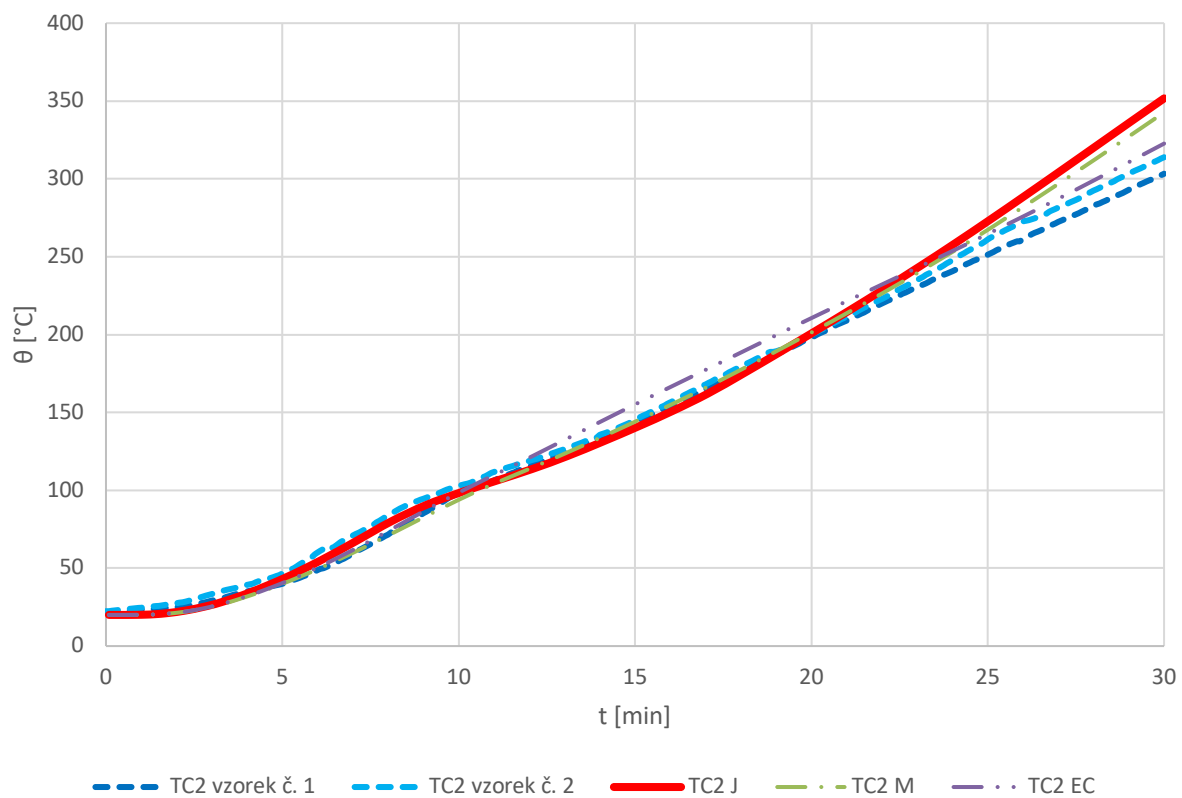
Obr. 23: Měrná tepelná kapacita dřeva

6.2.1 Výsledky numerického výpočtu

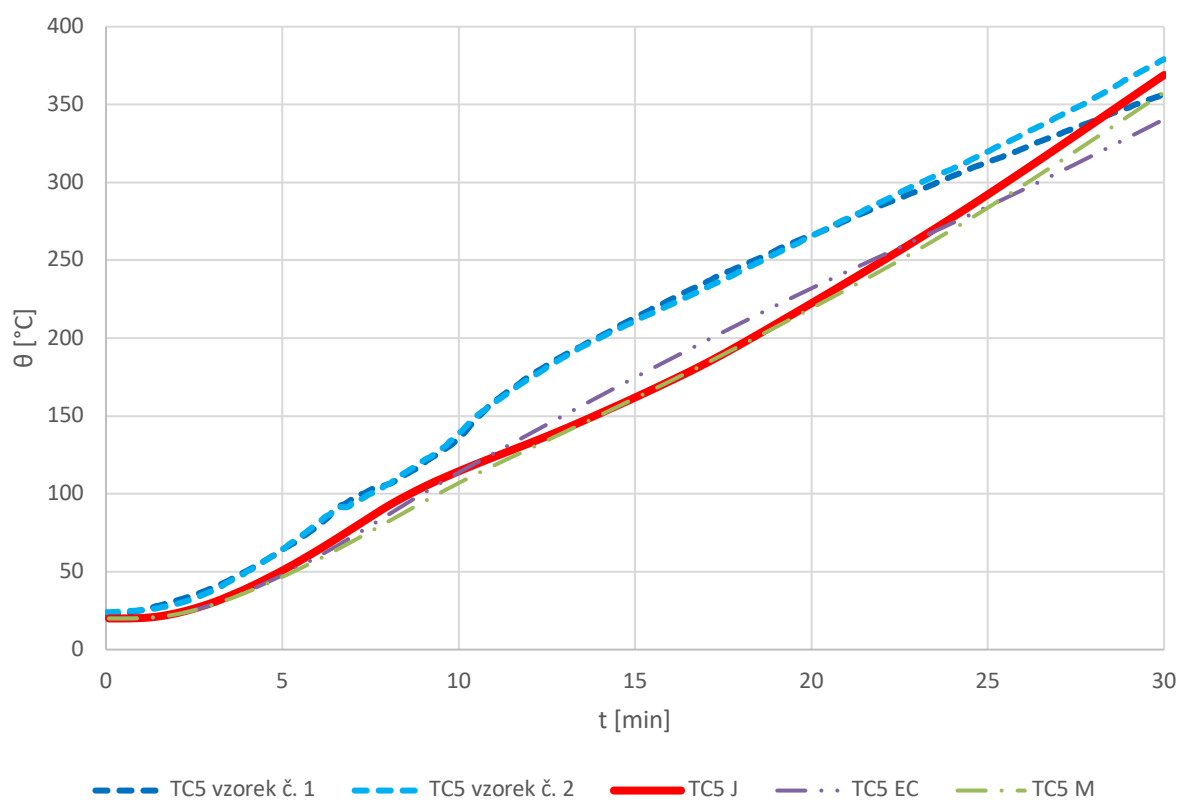
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v plechu (TC2), viz obr. 33, ve svorníku (TC5), viz obr. 34, dřevěném trámu (TC7), viz obr. 35 a v dřevěném trámu mezi svorníky (TC8), viz obr. 36. Ze získaných hodnot je patrné, že všechny zkoumané materiálové vlastnosti dřeva téměř přesně kopírují chování dřevo-ocelového spoje v oblasti plechu a svorníků, ale nejsou vhodné pro oblast mimo ocelové spojovací prostředky.

Vysvětlivky ke grafům:

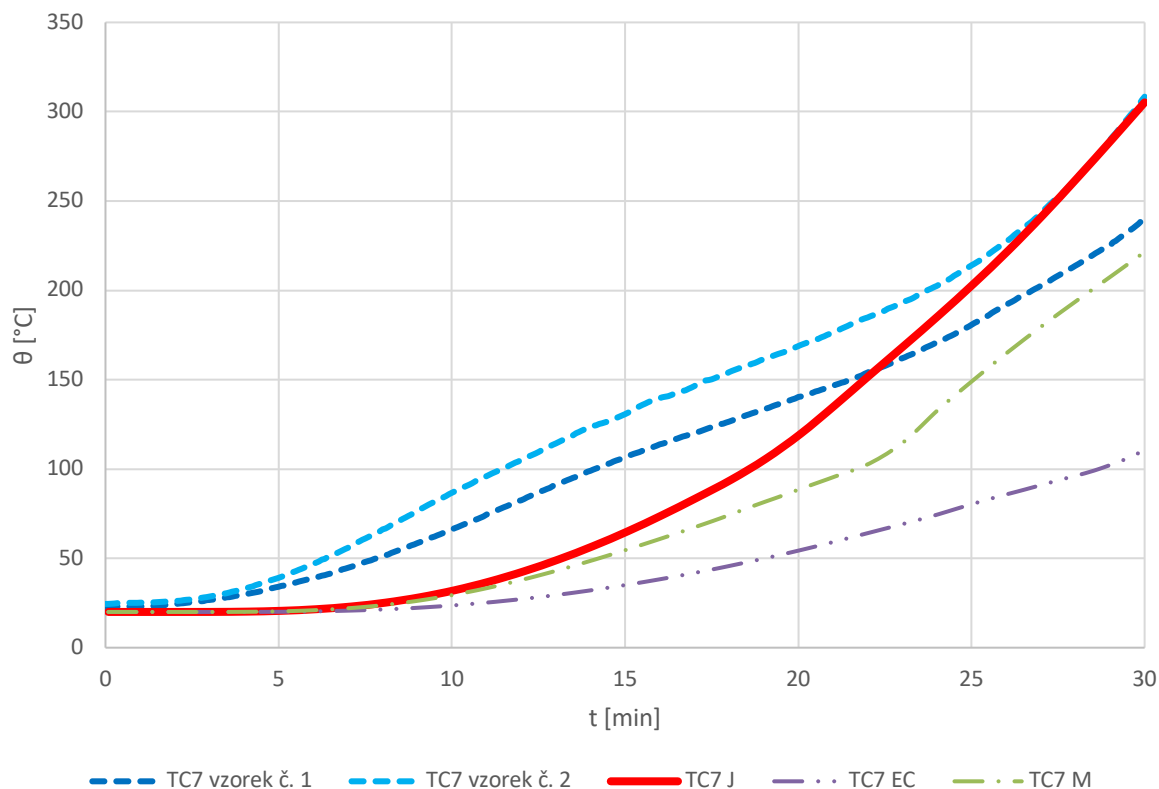
- TCx vzorek č.1 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č.1, viz [28]
- TCx vzorek č.2 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č.2, viz [28]
- TCx J - materiálové vlastnosti dřeva podle Janssense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu
- TCx M - materiálové vlastnosti dřeva podle Menise;
- TCx EC - materiálové vlastnosti dřeva podle EC5;



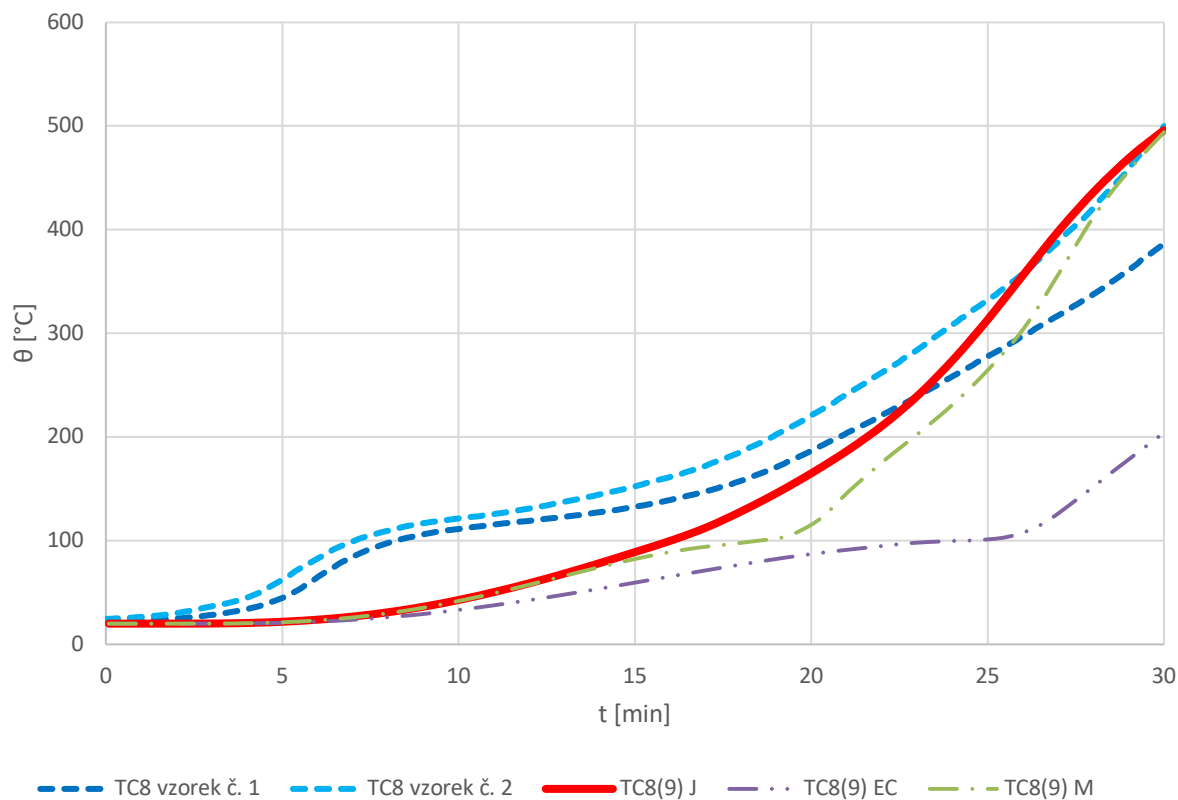
Obr. 33: Rozložení teploty v bodě TC2 při různých vlastnostech dřeva



Obr. 34: Rozložení teploty v bodě TC5 při různých vlastnostech dřeva



Obr. 35: Rozložení teploty v bodě TC7 při různých vlastnostech dřeva



Obr. 36: Rozložení teploty v bodě TC8 při různých vlastnostech dřeva

6.2.2 Závěr numerického výpočtu

V tab. 3 jsou vypsané teploty, jejichž hodnoty se v čase 30 min nacházejí mezi výsledky získanými z experimentu z [28]. Za účelem posouzení výsledných dat této analýzy se toto rozmezí experimentálních hodnot považuje za správné.

Tab. 3: Výsledky numerické analýzy založené na materiálových vlastnostech dřeva

Vlastnosti	Číslo kontrolního bodu									Počet vhodných bodů
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	
Janssens	X		X	X	X		X	X	X	7
EC5										0
Menis				X	X			X	X	4

Podle získaných výsledků lze považovat vlastnosti podle Janssense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu jako nejvíc odpovídající reálnému chování dřeva během experimentů. Při detailnější citlivostní analýze materiálových vlastností je potřeba zabývat se především oblastí dřevěného trámu, jelikož v této oblasti se, dle provedené analýzy, vyskytují největší nepřesnosti.

6.3 Vliv tloušťky ocelové desky

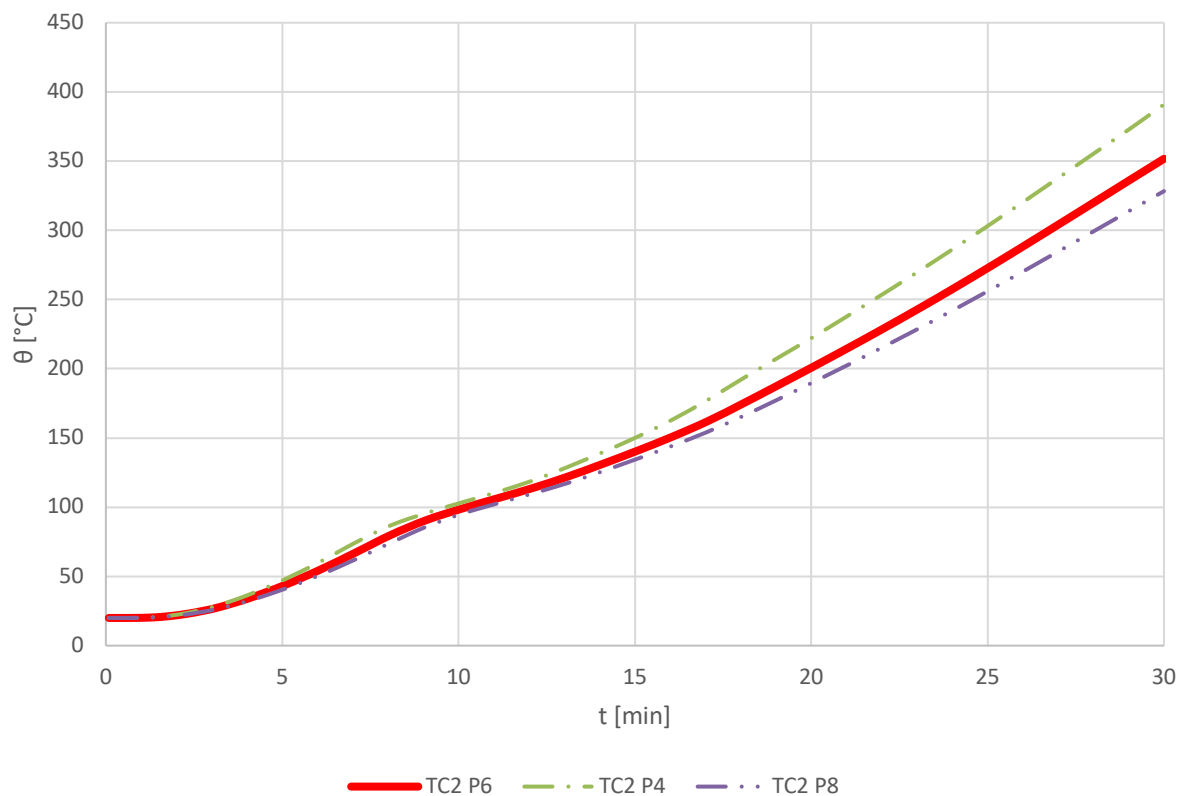
Dále je v rámci citlivostní studie provedena analýza vlivu velikosti ocelové desky na přestup tepla ve spoji za vysokých teplot. Konkrétně se jedná o ocelové plechy, které se mohou vyskytnout v praxi u daného spoje, a to plechy P4, P6 a P8 jednotlivých tloušťek 4 mm, 6 mm a 8 mm. Pevnostní třída ocele je v modelech zachována shodná.

6.3.1 Výsledky numerického výpočtu

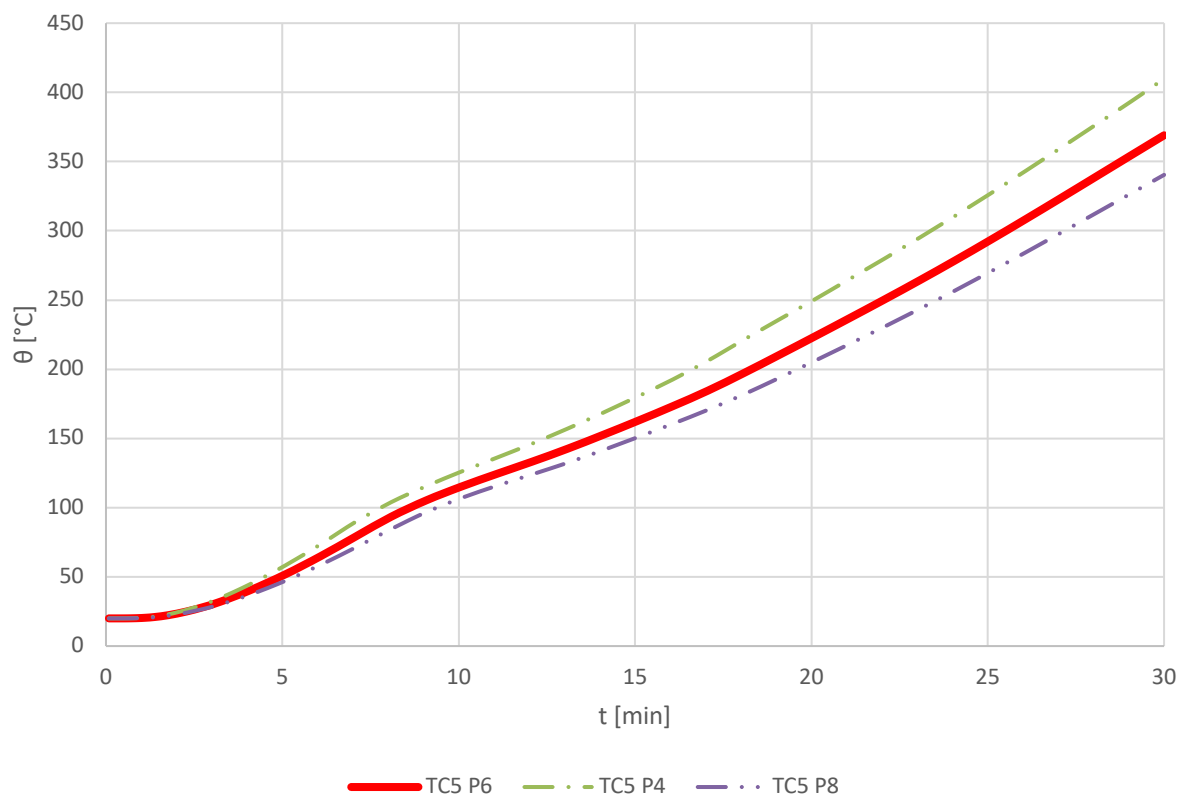
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v plechu (TC2), viz obr. 37, ve svorníku (TC5), viz obr. 38, dřevěném trámu (TC7), viz obr. 39 a v dřevěném trámu mezi svorníky (TC8/TC9), viz obr. 40. Z výsledků numerické analýzy lze tvrdit, že nárůst teplot v plechu a svornících probíhá rychleji u tenčích plechů než u tlustších plechů. Teplota dřevěného trámu je téměř nezávislá na tloušťce ocelové desky. Rozdíl výsledků na obr. 39 a obr. 40 je pravděpodobně způsoben ručním zadáváním bodů a změnou výpočetní sítě v důsledku změny geometrie modelu.

Vysvětlivky ke grafům:

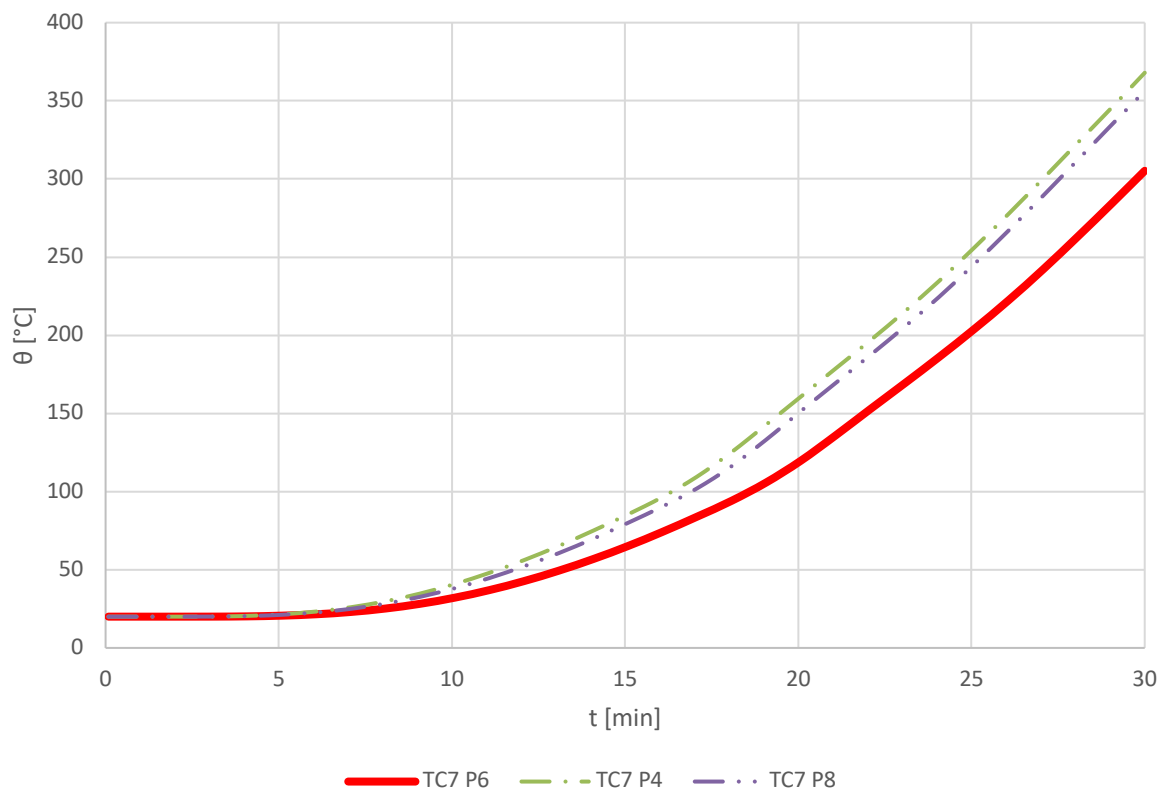
- | | |
|--------|--|
| TCx P4 | - teploty z numerické analýzy modelu s plechem tloušťky 4 mm |
| TCx P6 | - teploty z numerické analýzy modelu s plechem tloušťky 6 mm |
| TCx P8 | - teploty z numerické analýzy modelu s plechem tloušťky 8 mm |



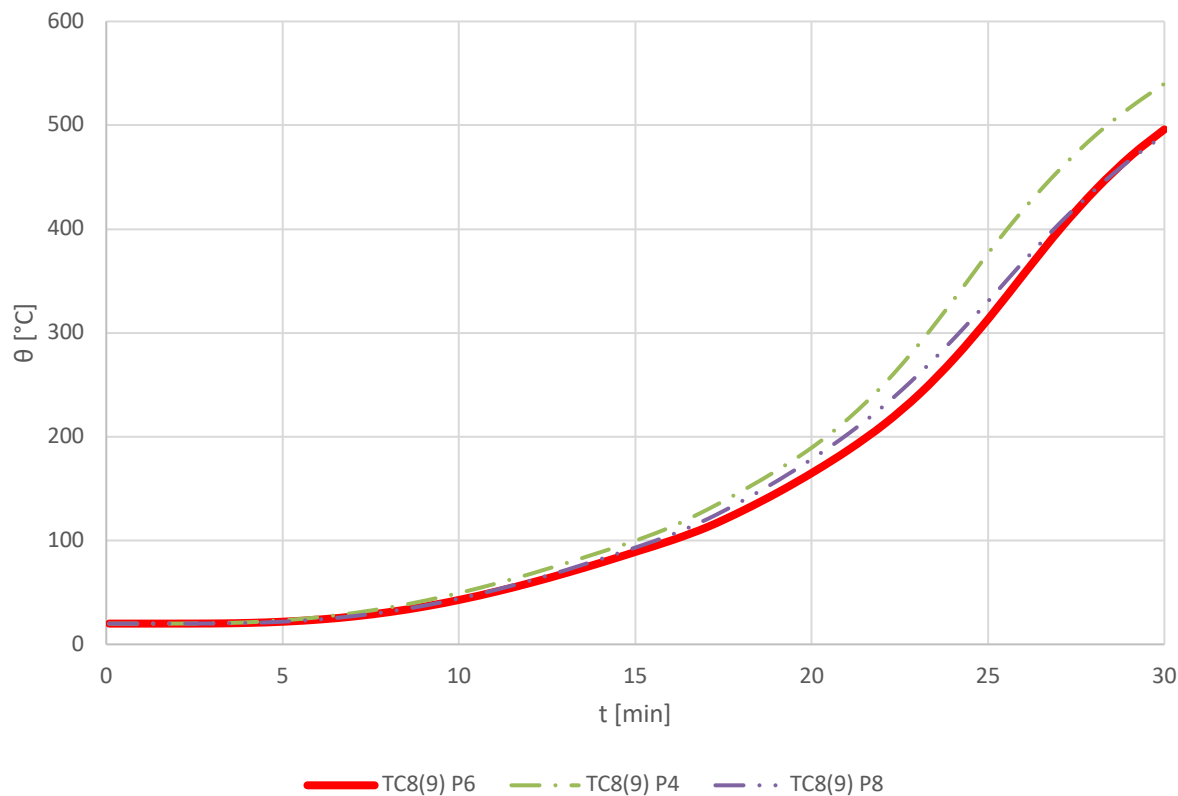
Obr. 37: Rozložení teploty v bodě TC2 při různých tloušťkách ocelové desky



Obr. 38: Rozložení teploty v bodě TC5 při různých tloušťkách ocelové desky



Obr. 39: Rozložení teploty v bodě TC7 při různých tloušťkách ocelové desky



Obr. 40: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při různých tloušťkách ocelové desky

6.3.2 Závěr numerického výpočtu

Výběrem vhodné tloušťky plechu lze příznivě ovlivnit teplotu v dřevo-ocelovém spoji. Teploty v plechu a ve svornících jsou vyšší při použití tenčí ocelové desky a nižší u desek s větší tloušťkou. Nicméně teplota v plechu se téměř neliší při použití P4 a P6. Rozdíl je patrně vidět u plechu P8. Rozdíl teplot mimo oblast ocelových částí spoje je zanedbatelný.

6.4 Vliv pevnosti dřeva

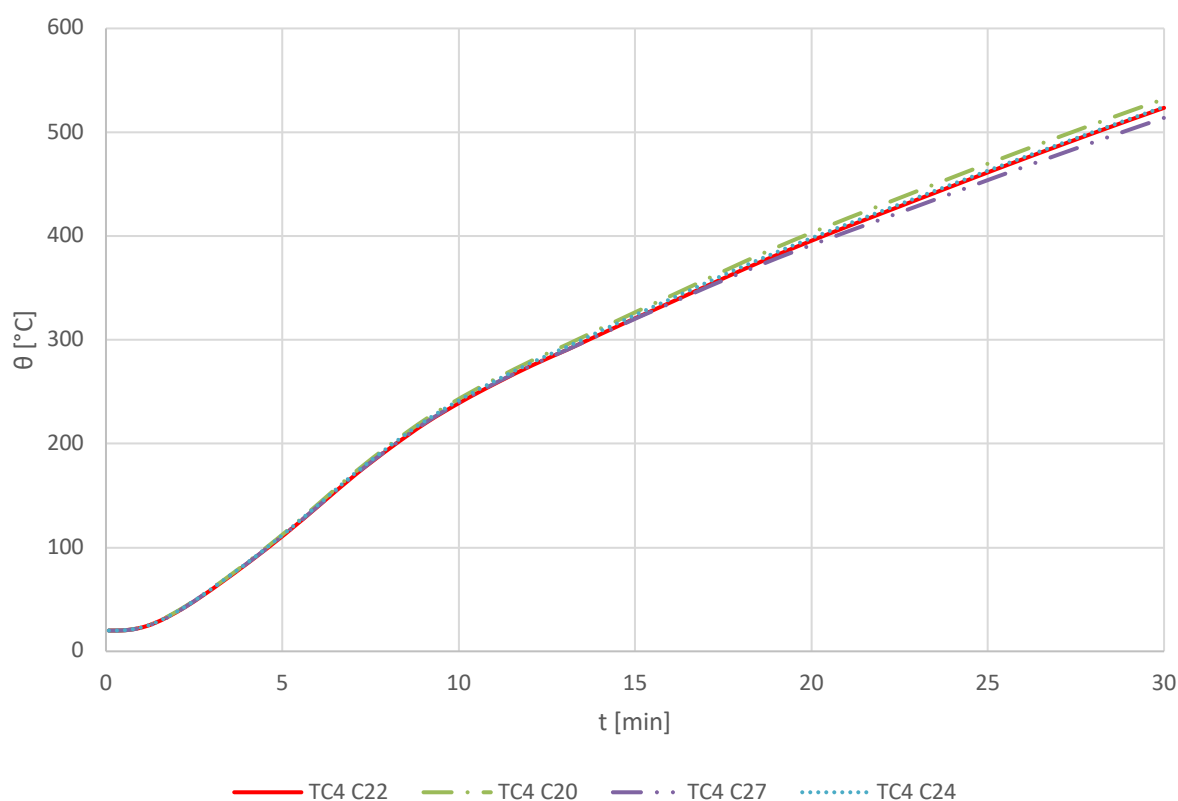
Další provedená analýza byla založena na vlivu pevnosti dřeva na přestup tepla ve spoji za vysokých teplot. Konkrétně byly ve studii použity pevnosti dřeva C20, C22, C24 a C27. Materiálové vlastnosti jednotlivých typů dřeva jsou uvedeny v 3.2.

6.4.1 Výsledky numerického výpočtu

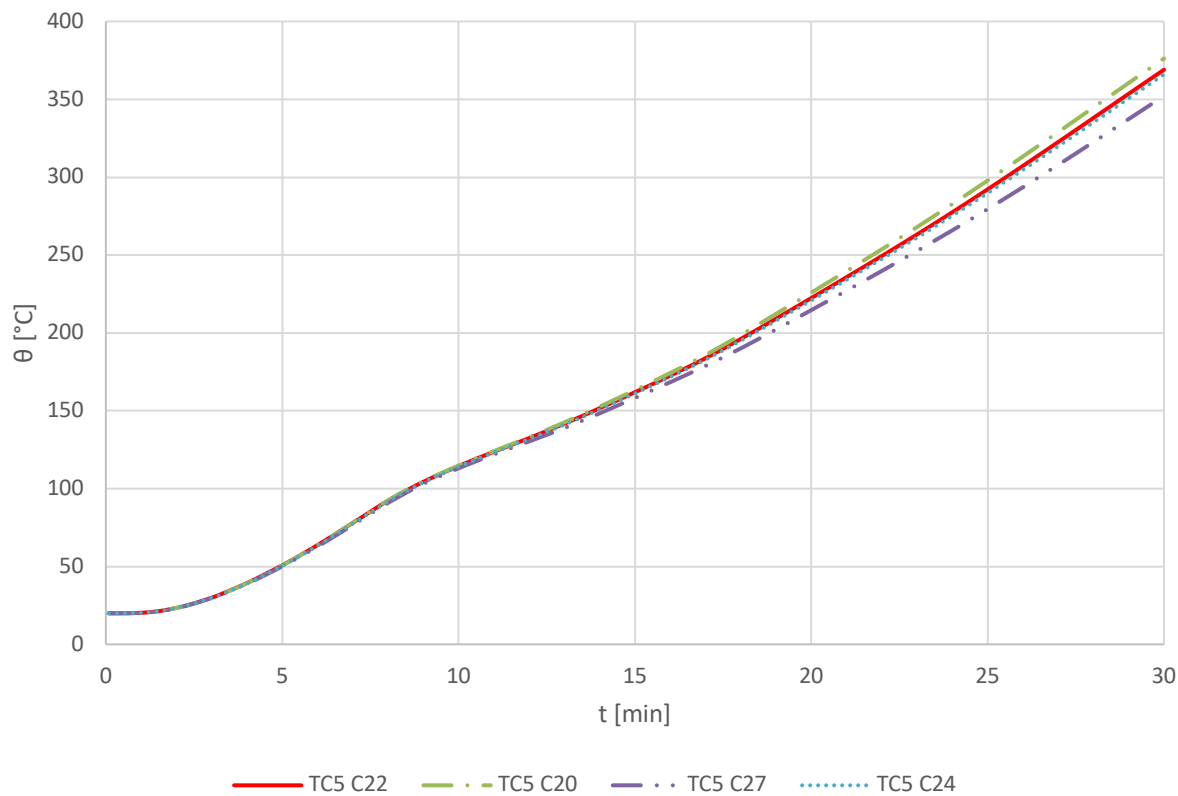
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot ve svorníku (TC4), viz obr. 41, uprostřed svorníku (TC5), viz obr. 42, v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 43 a v dřevěném trámu mezi svorníky (TC8/TC9), viz obr. 44. Z výsledků numerické analýzy lze tvrdit, že nárůst teplot v plechu a trámu probíhá rychleji u dřeva s menší pevností než u dřeva s vyšší pevností. Rozdíl teploty ve svornících je zanedbatelný. U pevnosti C22 a C24 jsou výsledky teplot ve dřevě téměř totožné.

Vysvětlivky ke grafům:

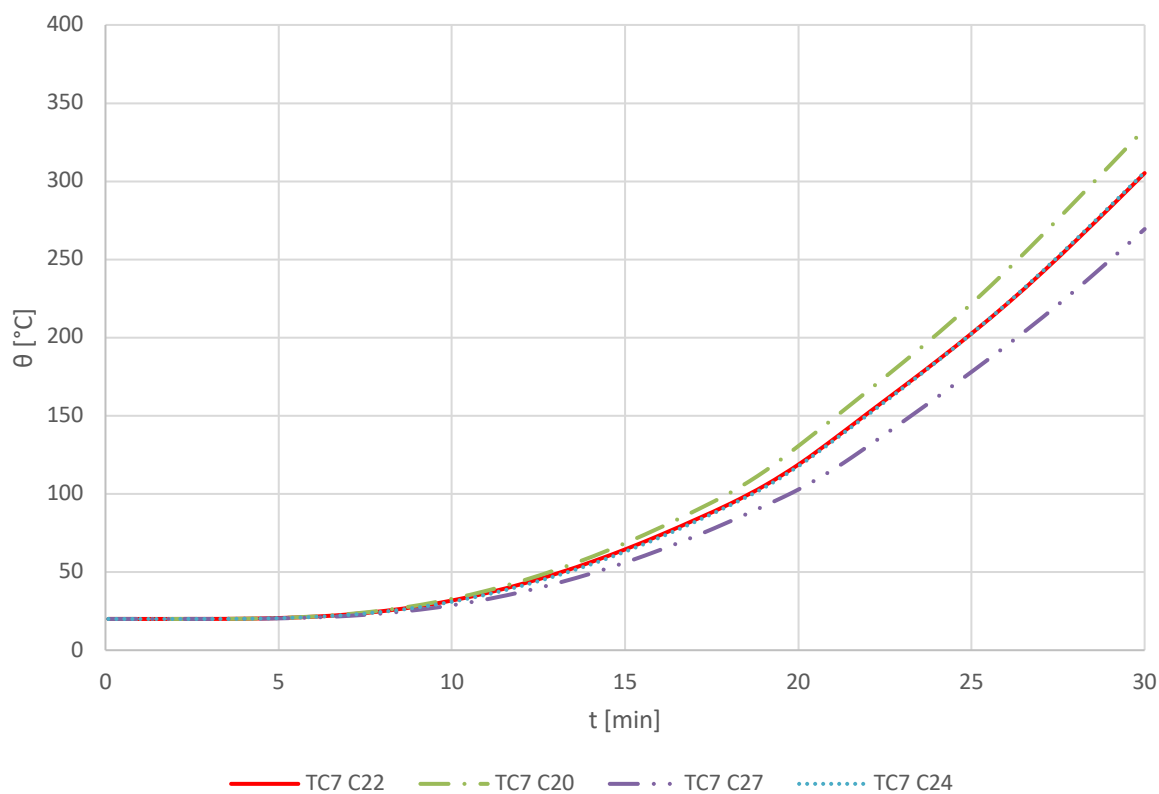
TCx C20	- teploty z numerické analýzy modelu se dřevem C20
TCx C22	- teploty z numerické analýzy modelu se dřevem C22
TCx C24	- teploty z numerické analýzy modelu se dřevem C24
TCx C27	- teploty z numerické analýzy modelu se dřevem C27



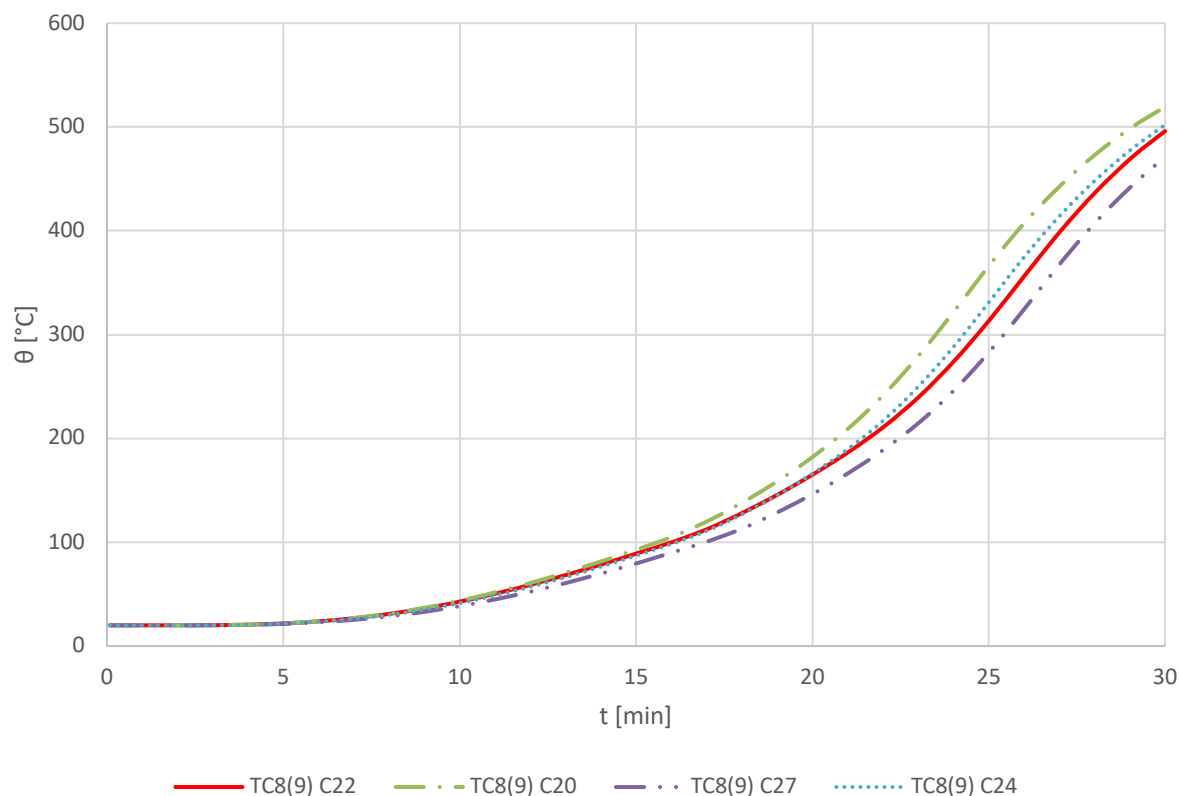
Obr. 41: Rozložení teploty v bodě TC4 při použití různé pevnosti dřeva



Obr. 42: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různé pevnosti dřeva



Obr. 43: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různé pevnosti dřeva



Obr. 44: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různé pevnosti dřeva

6.4.2 Závěr numerického výpočtu

Ve všech bodech platí, že při zvětšení pevnosti dřeva se spoj zahřívá pomaleji. Největší rozdíl teplot je patrný uvnitř trámy, a proto lze předpokládat, že zvětšení pevnosti dřeva výrazně neovlivňuje pevnost konstrukcí v oblastí spoje, ale může přispět ke zvětšení požární odolnosti mimo řešenou oblast nebo ve spoji s použitím pouze dřevěných prvků.

6.5 Vliv velikosti svorníků

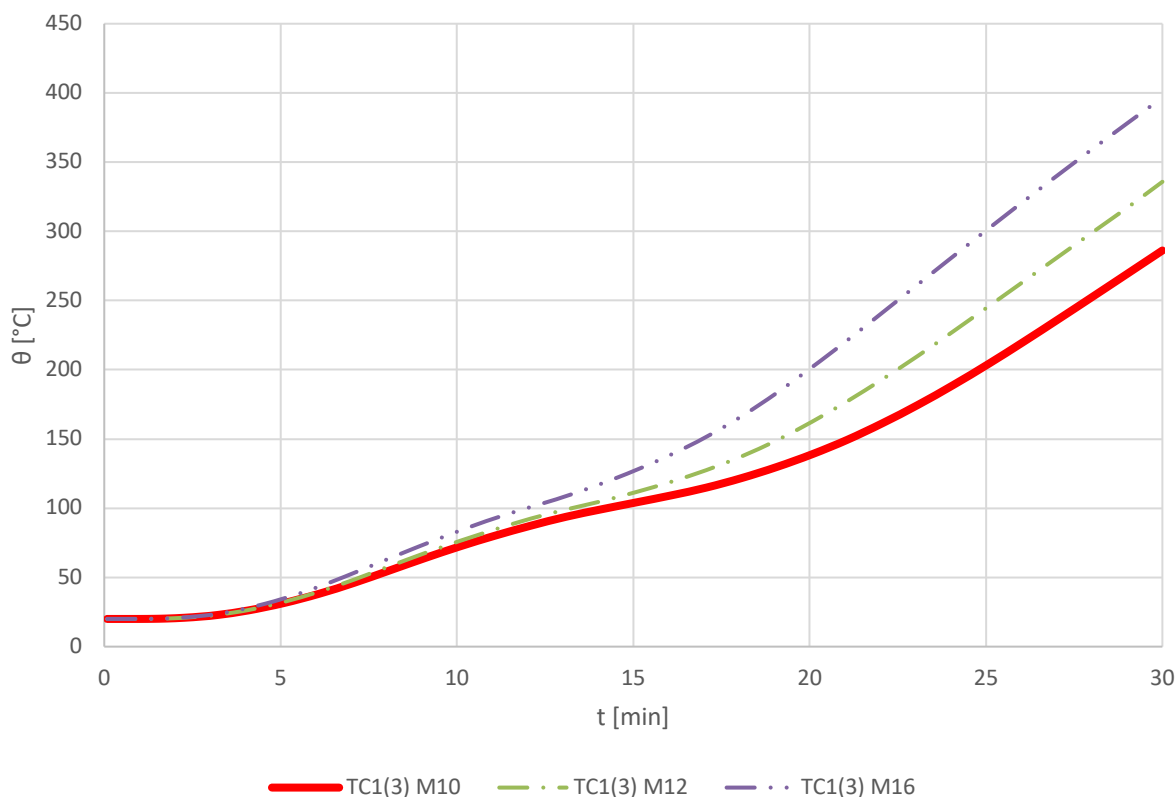
Další analýzou je analýza vlivu velikosti ocelových spojovacích prostředků na přestup tepla ve spoji za vysokých teplot. Konkrétně se jedná o svorníky, které se v praxi mohou vyskytnout v daném typu spoje, a to svorníky M10, M12 a M16. Vzhledem k tomu, že velikost spoje neumožňuje umístění M16, dle konstrukčních zásad uvedených v [8], budou tyto svorníky umístěny beze změny ostatních částí spoje. Aby bylo možné co nejefektivněji porovnat výsledky analýz submodelu se svorníky M12 nebude měněna ani geometrie dřevěného trámu a ocelového plechu.

6.5.1 Výsledky numerického výpočtu

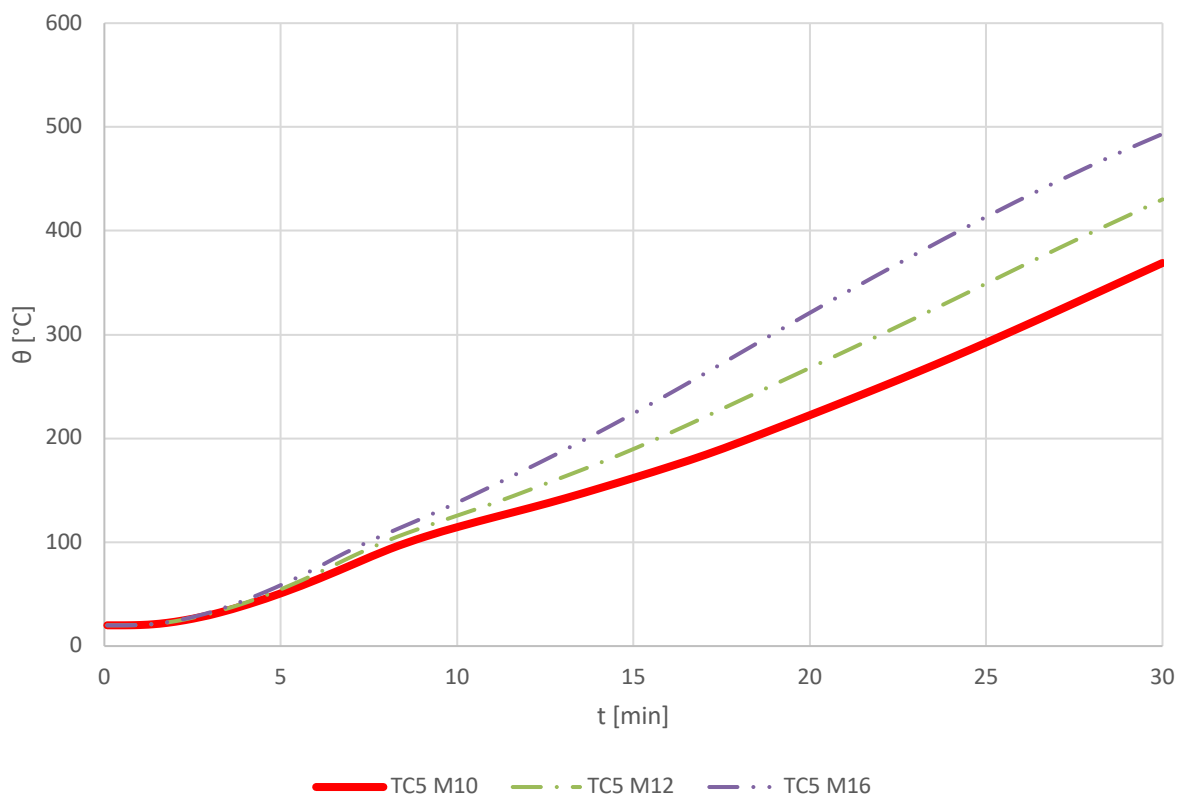
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v plechu (TC1), viz obr. 45, ve svorníku (TC5), viz obr. 46, v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 47 a v dřevěném trámu mezi svorníky (TC8/TC9), viz obr. 48. Rozdíl výsledků na obr. 47 je pravděpodobně způsoben ručním zadáváním bodů a změnou výpočetní sítě v důsledku změny geometrie modelu.

Vysvětlivky ke grafům:

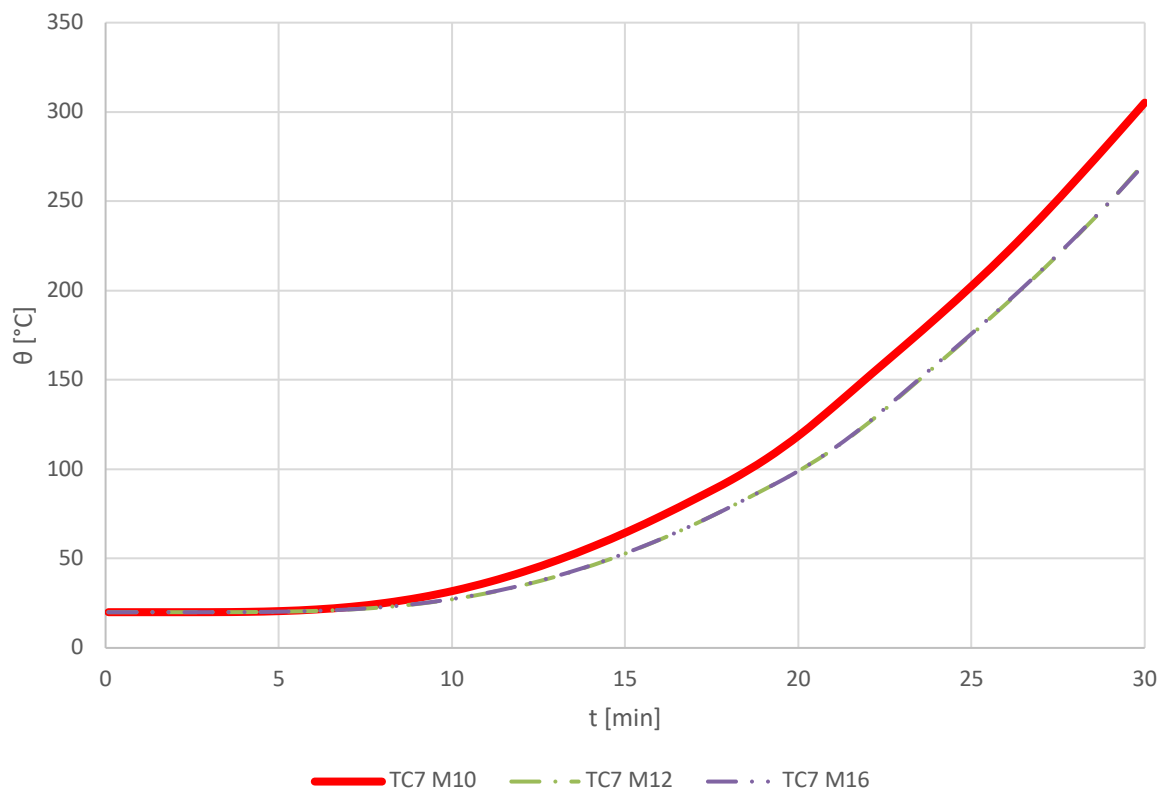
- | | |
|---------|--|
| TCx M10 | - teploty z numerické analýzy modelu se svorníky M10 |
| TCx M12 | - teploty z numerické analýzy modelu se svorníky M12 |
| TCx M16 | - teploty z numerické analýzy modelu se svorníky M16 |



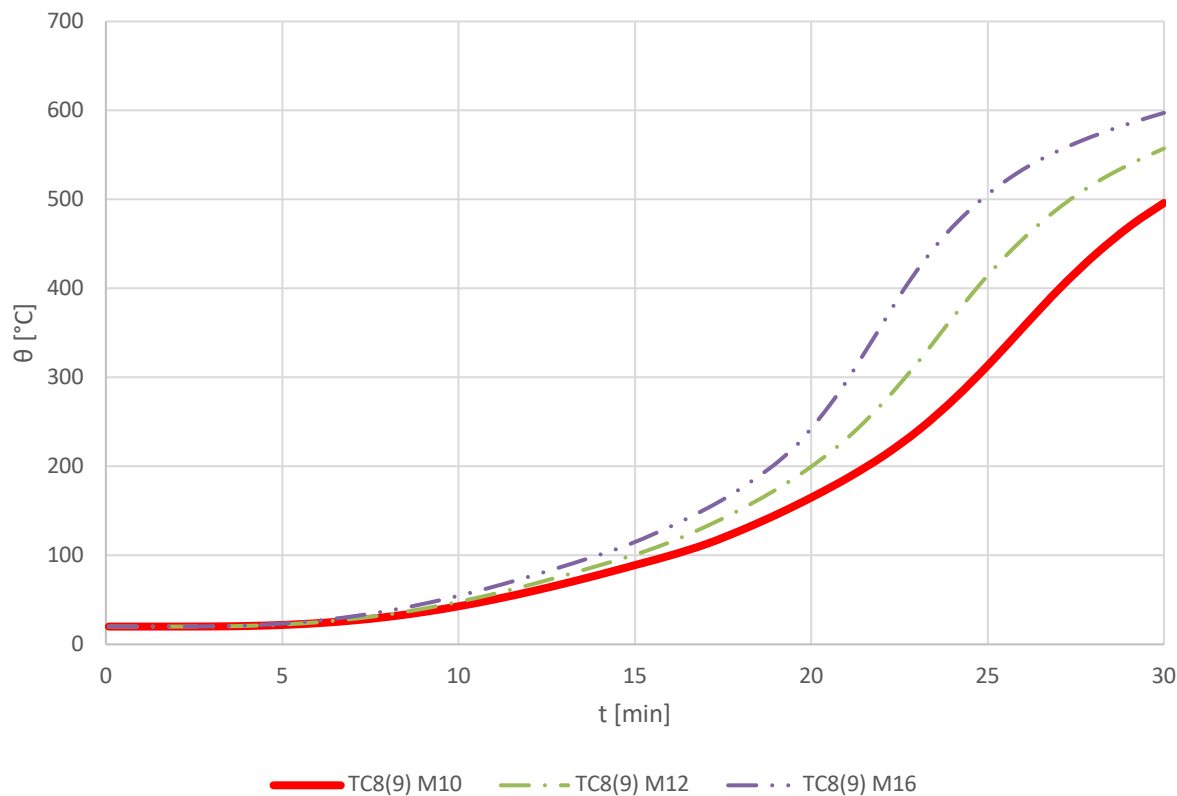
Obr. 45: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých velikostí svorníků



Obr. 46: Rozložení teploty v bodě TC5 při použití různých velikostí svorníků



Obr. 47: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých velikostí svorníků



Obr. 48: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých velikostí svorníků

6.5.2 Závěr numerického výpočtu

Při zvětšení velikostí svorníků se nárůst teploty intenzivně zvětšuje v bodech svorníků a plechu. Tento jev lze vysvětlit vrůstající ohřívanou plochou svorníků s jejich rostoucí velikostí a vysokou tepelnou vodivostí ocele. Rovněž lze předpokládat, že velikost svorníků neovlivňuje teplotu dřevěného trámu.

6.6 Vliv výšky trámu

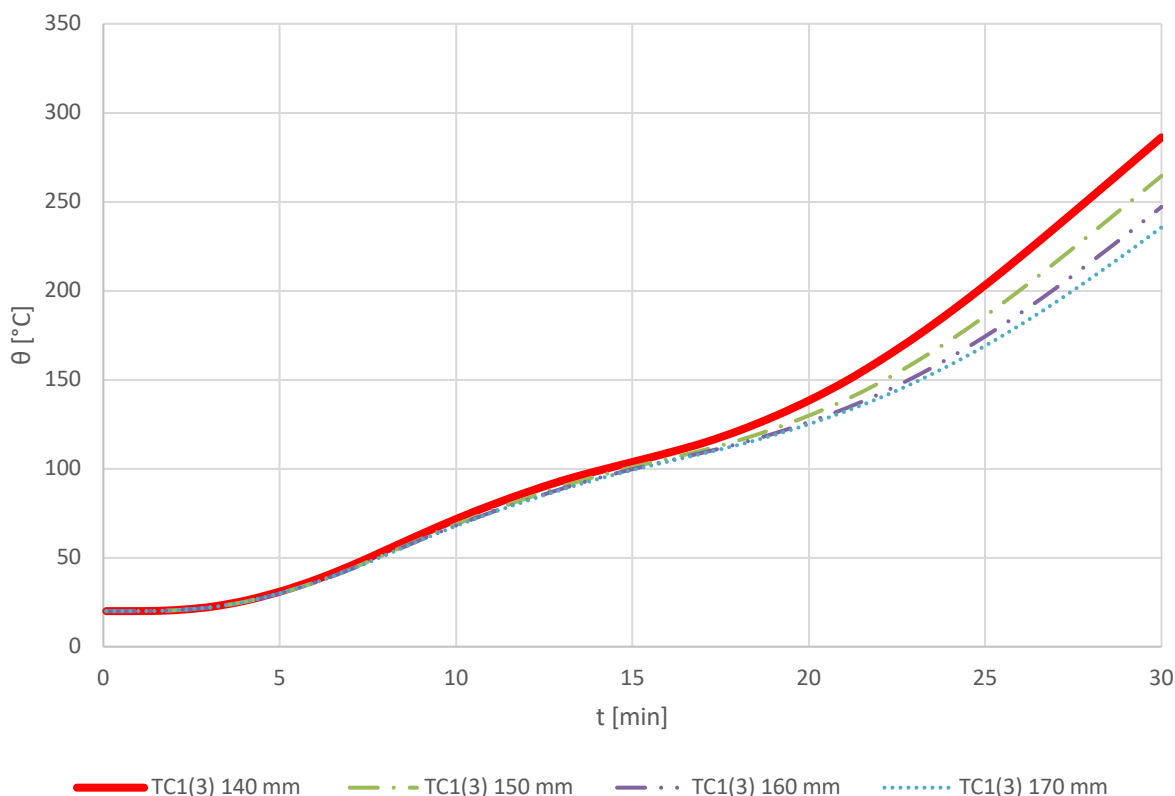
Další je analýza vlivu výšky dřevěného trámu za vysokých teplot na přestup tepla ve spoji. Konkrétně se jedná o výšky 140, 150, 160 a 170 mm.

6.6.1 Výsledky numerického výpočtu

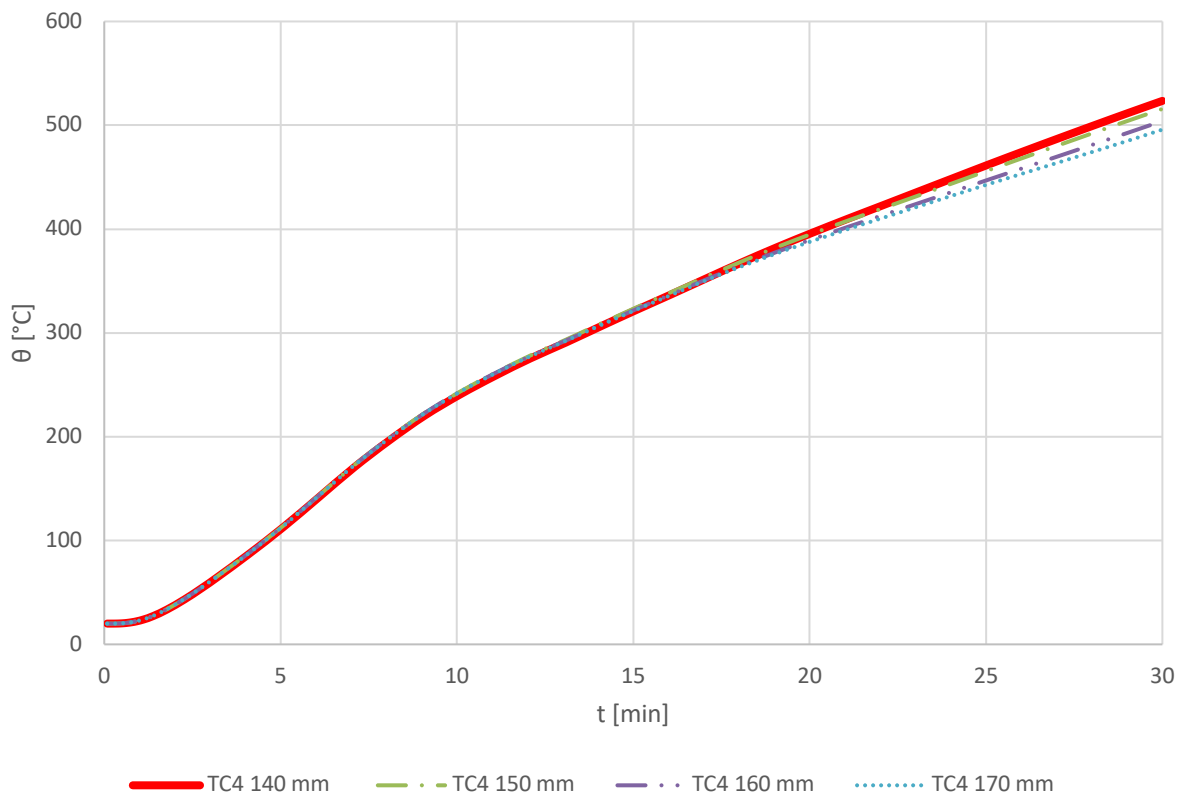
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v plechu (TC1/TC3) viz obr. 49, ve svorníku (TC4), viz obr. 50, v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 51 a dřevěném trámu mezi svorníky (TC8/TC9), viz obr. 52. Z výsledků numerické analýzy lze tvrdit, že nárůst teploty ve spoji probíhá intenzivněji při použití nižších trámů, a naopak méně intenzivní u vyšších trámů. Nicméně výška trámu prakticky neovlivňuje teplotu ve svornících.

Vysvětlivky ke grafům:

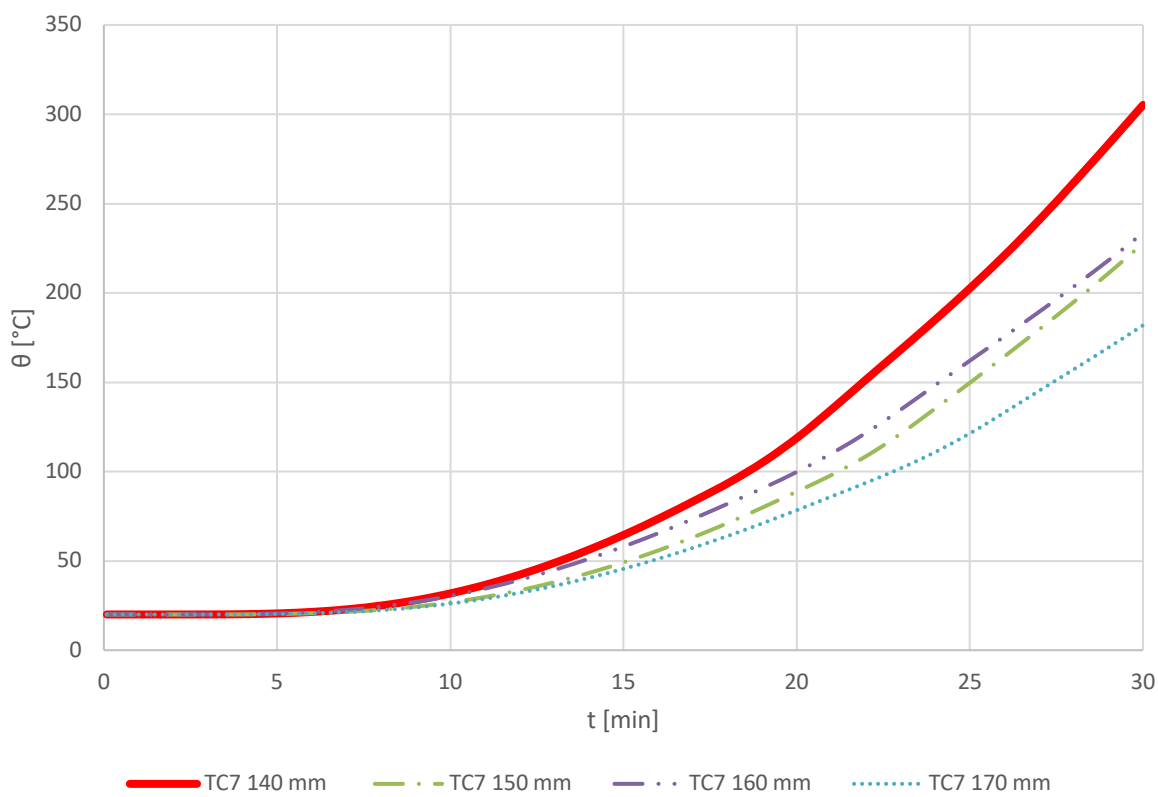
- TCx 140 mm - teploty z numerické analýzy modelu s výškou trámu 140 mm
- TCx 150 mm - teploty z numerické analýzy modelu s výškou trámu 150 mm
- TCx 160 mm - teploty z numerické analýzy modelu s výškou trámu 160 mm
- TCx 170 mm - teploty z numerické analýzy modelu s výškou trámu 170 mm



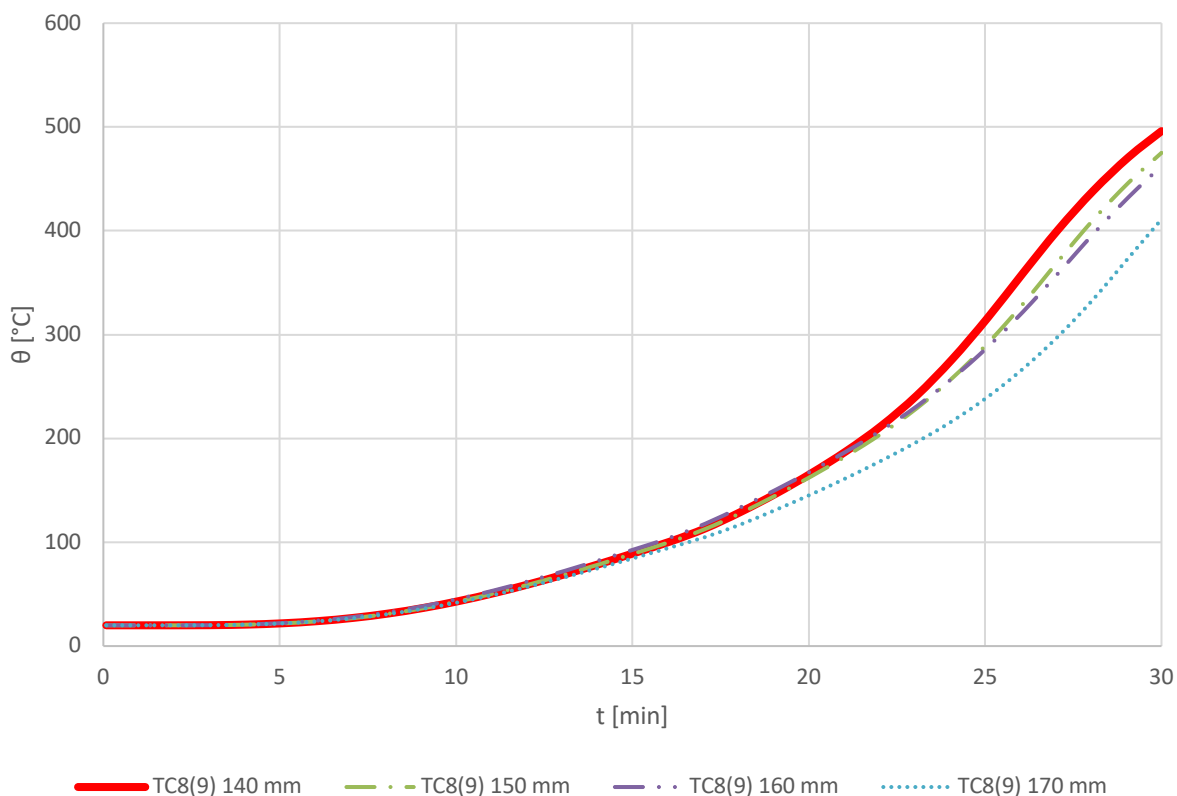
Obr. 49: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC 3 při použití různých výšek trámu



Obr. 50: Rozložení teploty v bodě TC4 při použití různých výšek trámu



Obr. 51: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých výšek trámu



Obr. 52: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých výšek trámu

6.6.2 Závěr numerického výpočtu

Zvětšení výšky dřevěného trámu výrazně snižuje nárůst teploty uvnitř trámu a rovněž příznivě ovlivňuje teplotu plechu. Nižší teplotu ocelové desky lze vysvětlit zvětšením vzduchové mezery nad plechem. Z výsledku numerického výpočtu lze rovněž předpokládat, že zvětšení výšky spoje nemá velký vliv na nárůst teploty u svorníků, což potvrzuje to, že teplota svorníků záleží hlavně na jejich přímo ohřívané ploše.

6.7 Vliv šířky trámu

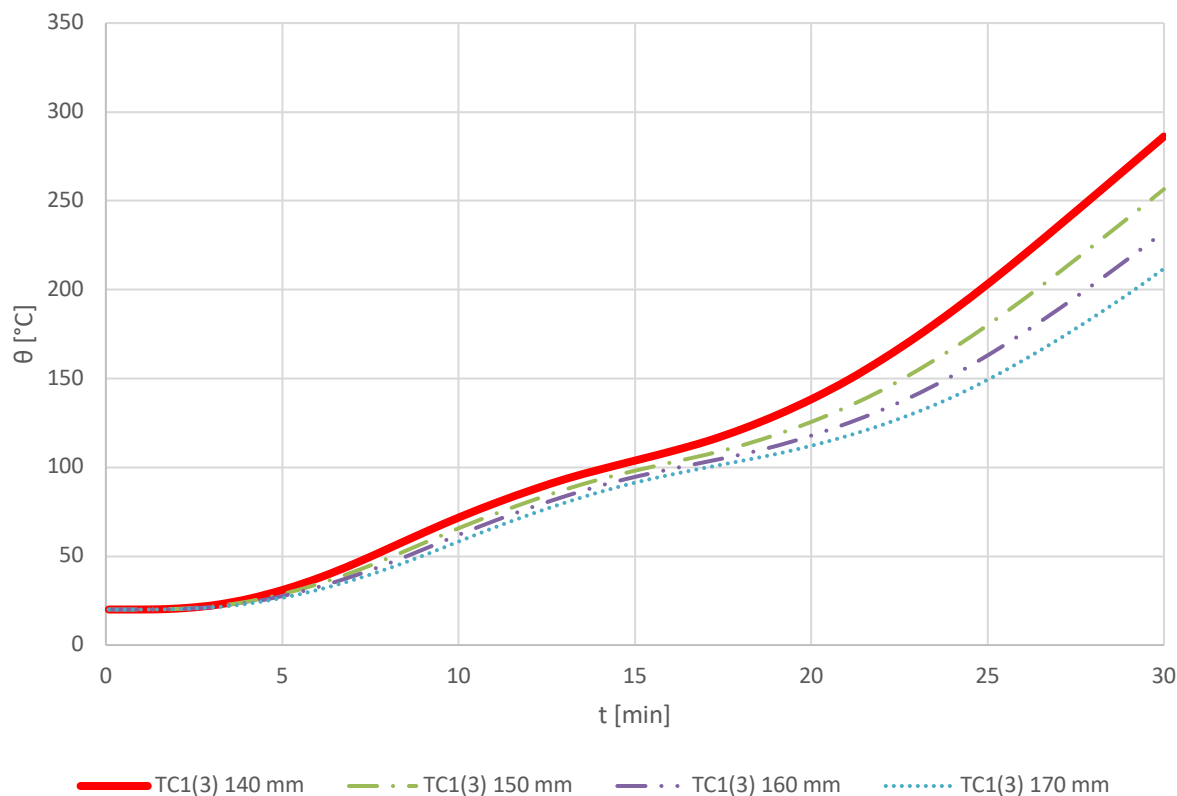
Další je analýza vlivu šířky dřevěného trámu na přestup tepla ve spoji za vysokých teplot. Konkrétně se jedná o šířky 140, 150, 160 a 170 mm.

6.7.1 Výsledky numerického výpočtu

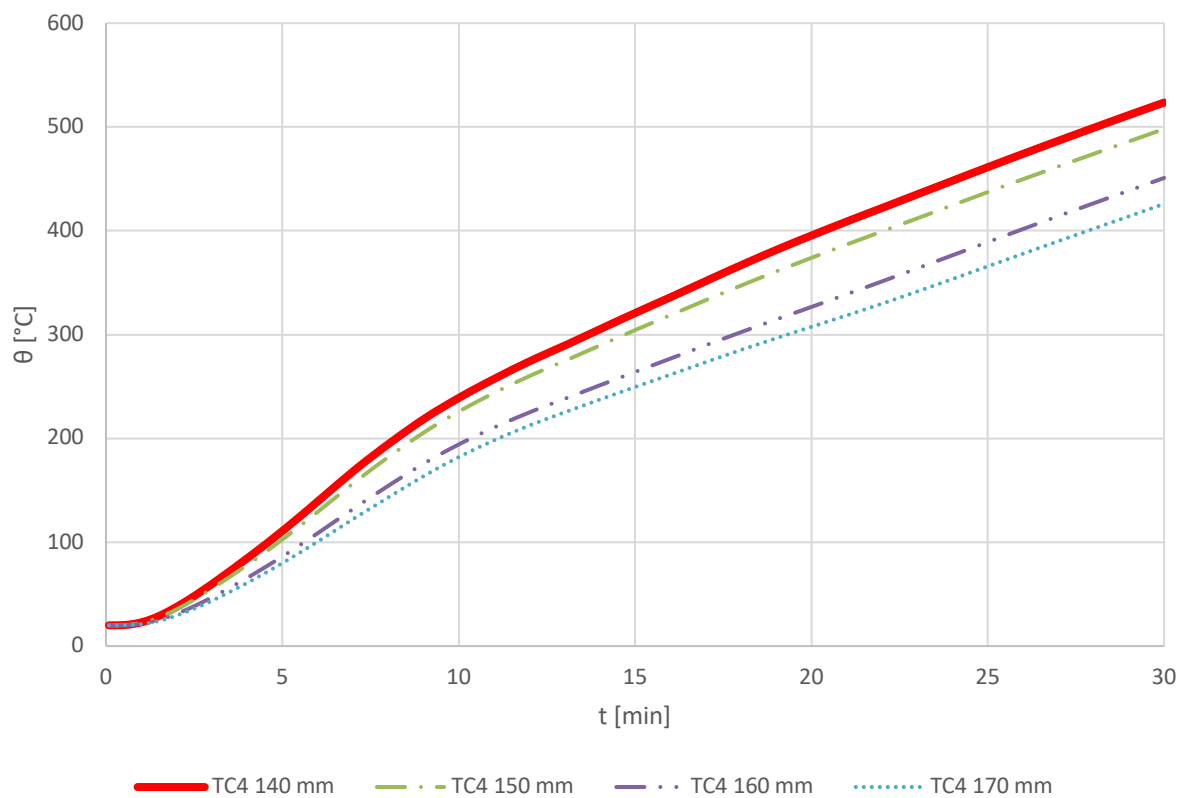
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v ocelové desce (TC1/TC3), viz obr. 52, ve svorníku (TC4), viz obr. 53, v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 54 a v dřevěném trámu mezi svorníky (TC8/TC9), viz obr. 55.

Vysvětlivky ke grafům:

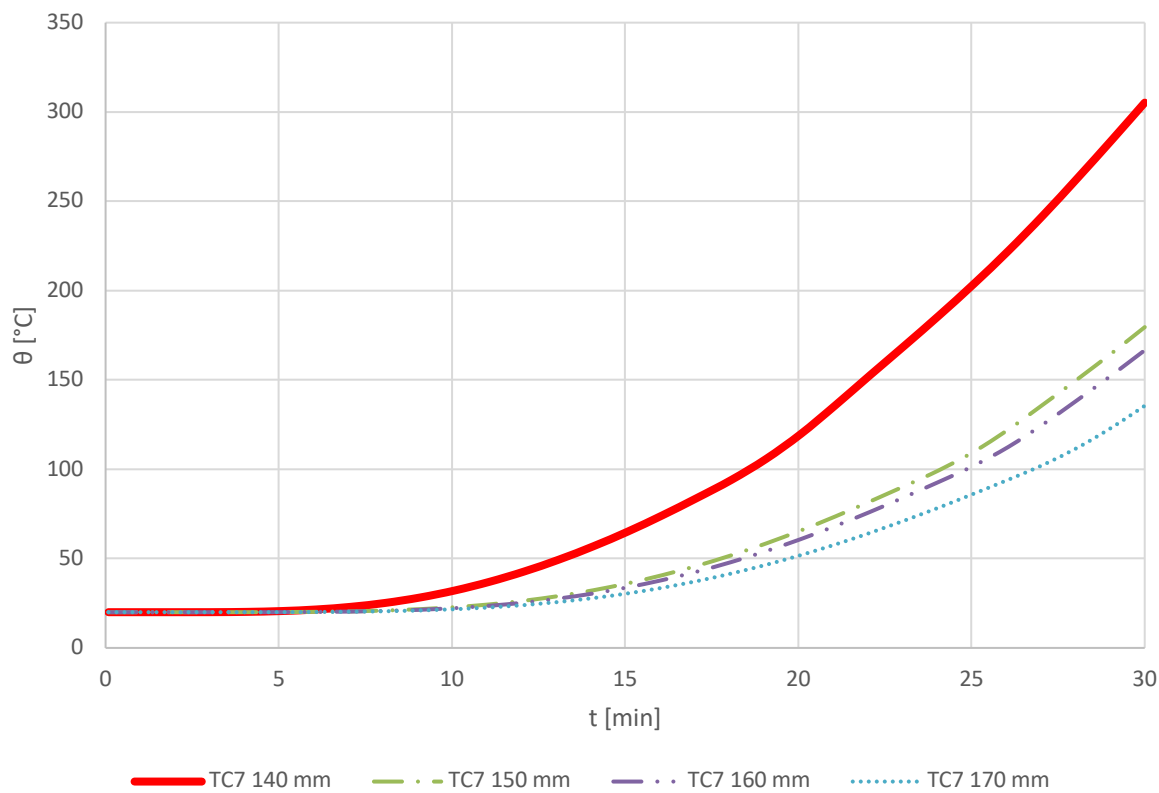
- TCx 140 mm - teploty z numerické analýzy modelu s šířkou trámu 140 mm
- TCx 150 mm - teploty z numerické analýzy modelu s šířkou trámu 150 mm
- TCx 160 mm - teploty z numerické analýzy modelu s šířkou trámu 160 mm
- TCx 170 mm - teploty z numerické analýzy modelu s šířkou trámu 170 mm



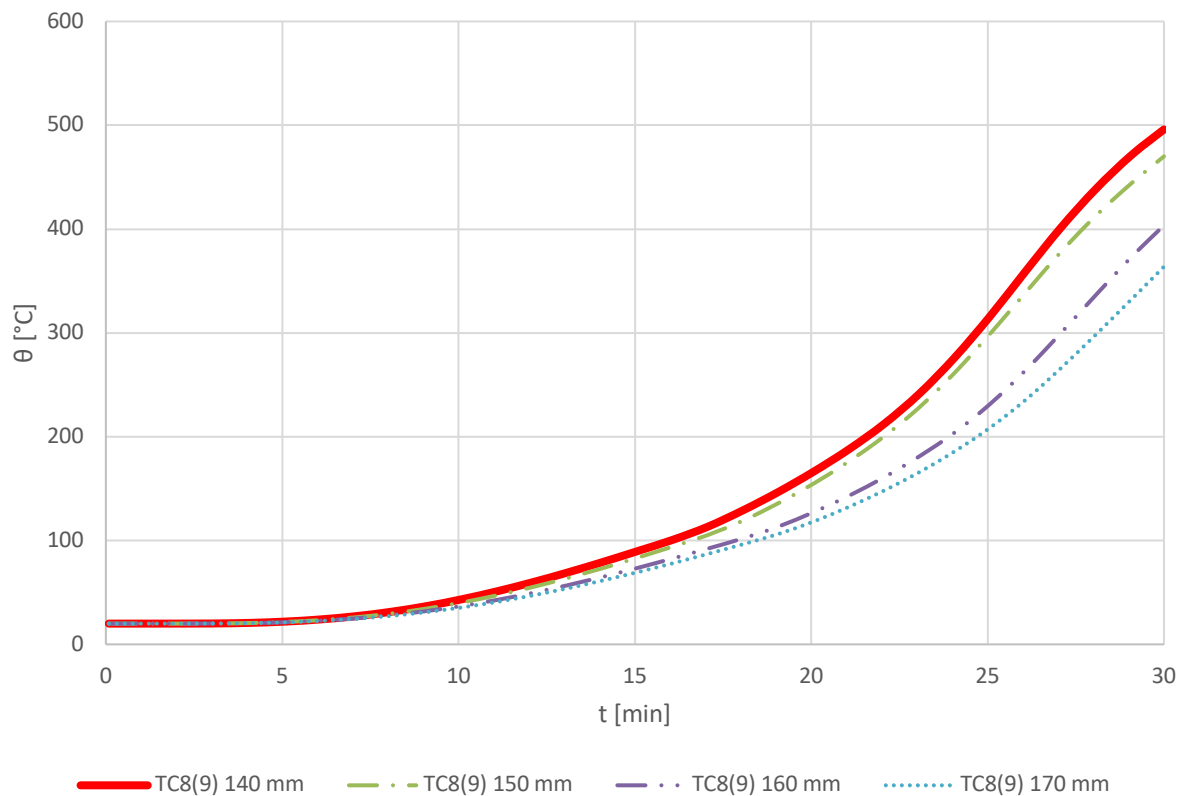
Obr. 53: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých šířek trámu



Obr. 54: Rozložení teploty v bodě TC4 při použití různých šířek trámu



Obr. 55: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých šířek trámu



Obr. 56: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých šířek trámů

6.7.2 Závěr numerického výpočtu

Zvětšení šířky dřevěného trámů výrazně snižuje nárůst teploty uvnitř trámů, viz obr. 55 a také příznivě ovlivňuje teplotu plechu a svorníků (obr. 53 a obr. 54). Zmenšení intenzity nárůstu teploty ve spojovacích prostředcích s nárůstem tloušťky spoje je způsobeno zvětšením délky svorníků, tzn. zvětšením ohřívané hmoty při stejné ohřívané ploše. Jelikož dominantním zdrojem tepla ocelové desky jsou spojovací prostředky, nárůst intenzity teploty také klesne.

6.8 Vliv příčné spáry mezi trámy

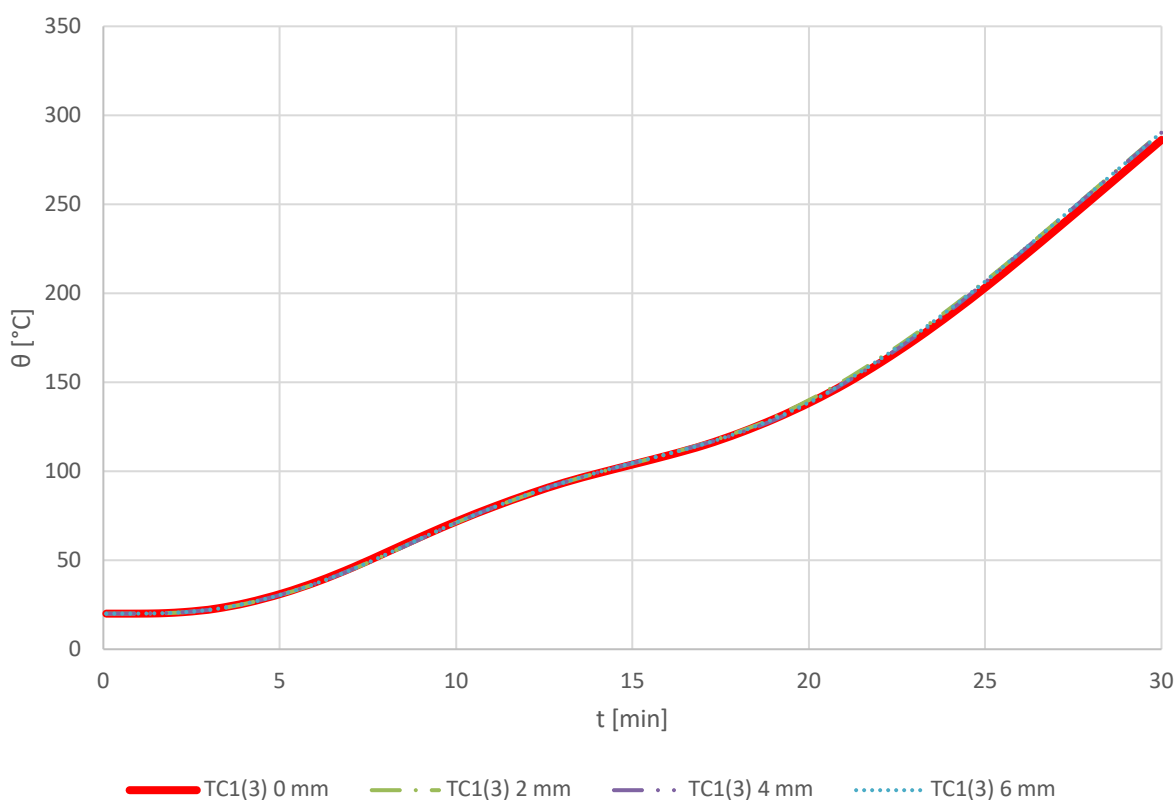
Další zkoumaná charakteristika vychází z nepřesností realizace geometrie spoje v praxi. Je založena na analýze vlivu přítomnosti pracovní spáry mezi dřevěnými trámy na přestup tepla ve spoji za vysokých teplot. Konkrétně se jedná o šířky 0, 2, 4 a 6 mm.

6.8.1 Výsledky numerického výpočtu

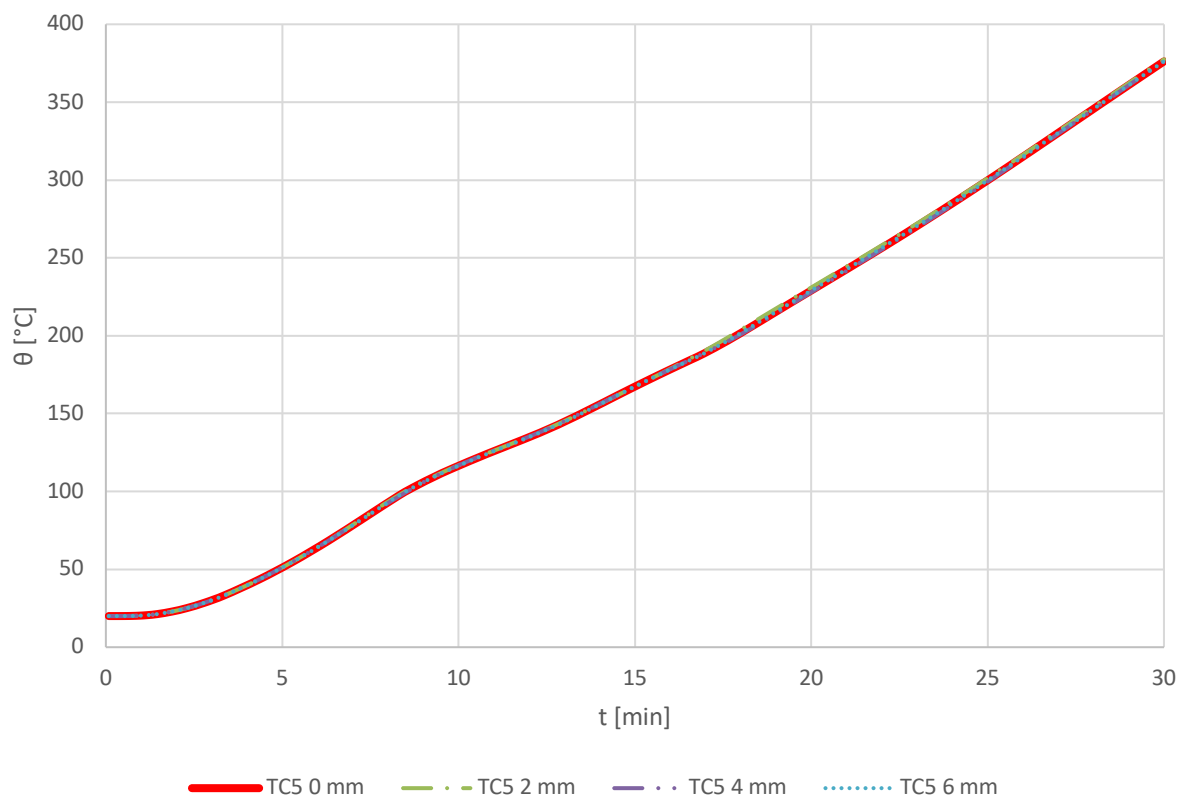
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v ocelovém plechu (TC1/TC3), viz obr. 57, uprostřed svorníku (TC5), viz obr. 58 a v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 59. Z výsledků numerické analýzy lze tvrdit, že pracovní spára do 6 mm prakticky neovlivňuje nárůst teploty ve všech bodech spoje. Teplotní rozdíl u numerického modelu bez spáry na obr. 59 a teplotní rozdíl u numerického modelu se spárou 2 mm na obr. 60 je pravděpodobně způsoben ručním zadáváním bodů a změnou výpočetní sítě v důsledku změny geometrie modelu.

Vysvětlivky ke grafům:

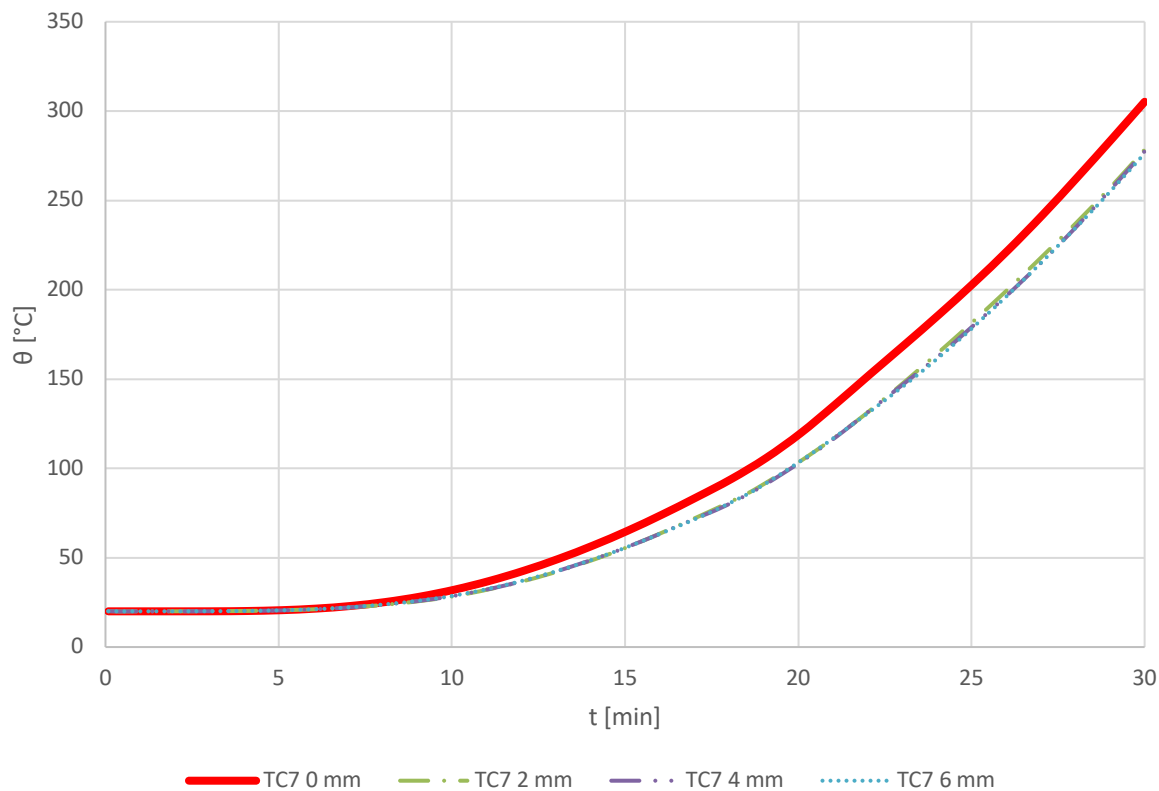
- TCx 0 mm - teploty z numerické analýzy modelu bez příčné spáry
- TCx 2 mm - teploty z numerické analýzy modelu se spárou tloušťky 2 mm
- TCx 4 mm - teploty z numerické analýzy modelu se spárou tloušťky 4 mm
- TCx 6 mm - teploty z numerické analýzy modelu se spárou tloušťky 6 mm



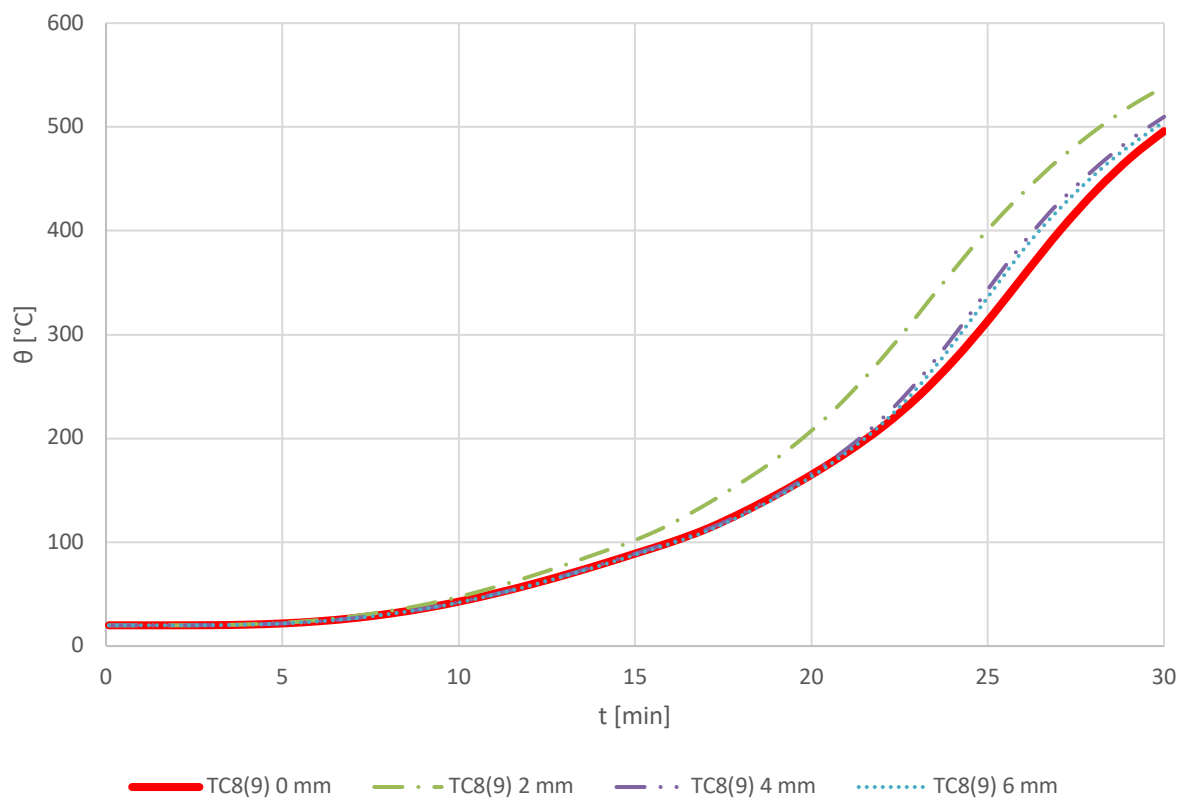
Obr. 57: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých velikostí mezery



Obr. 58: Rozložení teploty v bodě TC5 při použití různých velikostí mezery



Obr. 59: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých velikostí mezery



Obr. 60: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých velikostí mezery

6.8.2 Závěr numerického výpočtu

Ze získaných dat lze předpokládat, že mezera do tloušťky 6 mm téměř neovlivňuje nárůst teploty ve spoji. Teplota ve svornících a trámu zůstává prakticky nezměněná v čase 30 min v porovnání s teplotami modelu bez mezery. Teplotní rozdíl v bodě v TC8/TC9, viz obr. 60, je zanedbatelný.

6.9 Vliv podélné spáry mezi trámy

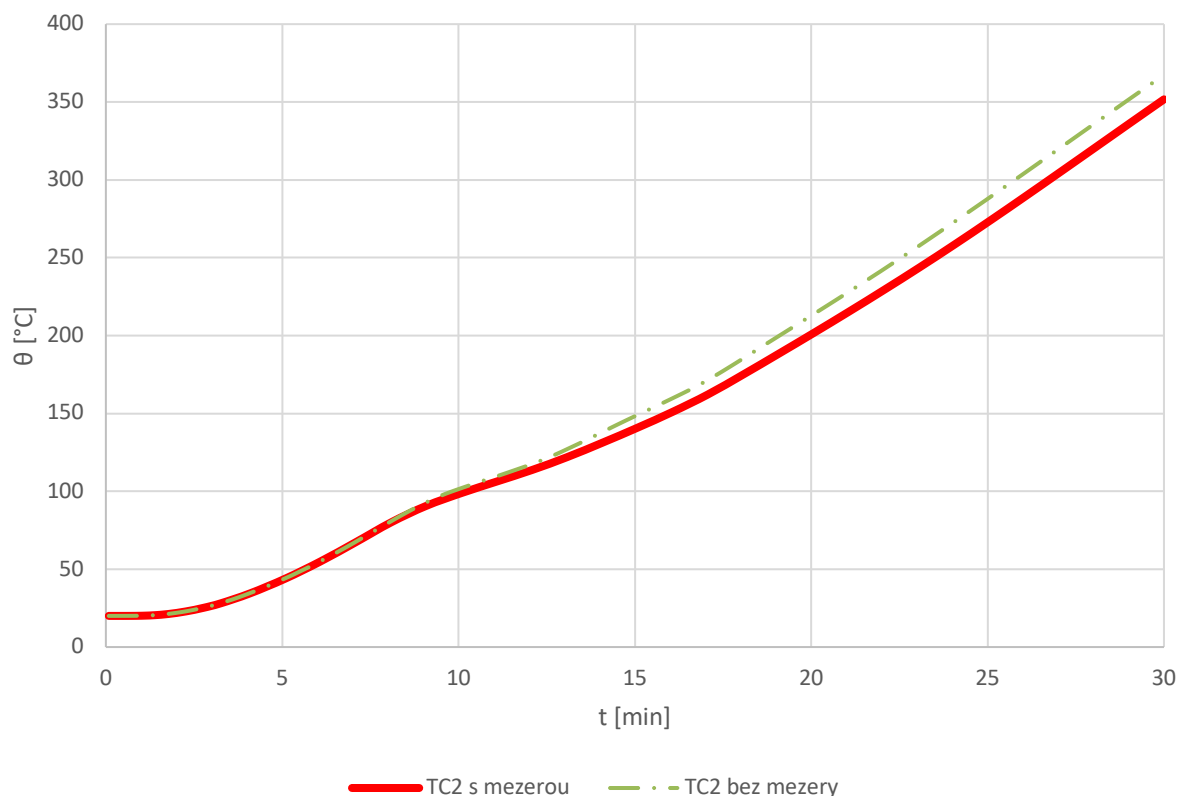
Ve zkoumaném modelu byla vytvořena spára pro vložení ocelové desky podél celé výšky dřevěného trámu. Toto řešení šetří čas při realizaci spoje, ale zhoršuje jeho požární odolnost. V takovém případě je ocelový plech chráněn pouze vzduchovou mezerou ze dvou stran. Citlivostní analýza je zaměřena na změnu tvaru výřezu pro ocelový plech. V tomto případě kapsa ve dřevném trámu kopíruje tvar ocelové desky, tzn. že plech je chráněn dřevem ze všech stran.

6.9.1 Výsledky numerického výpočtu

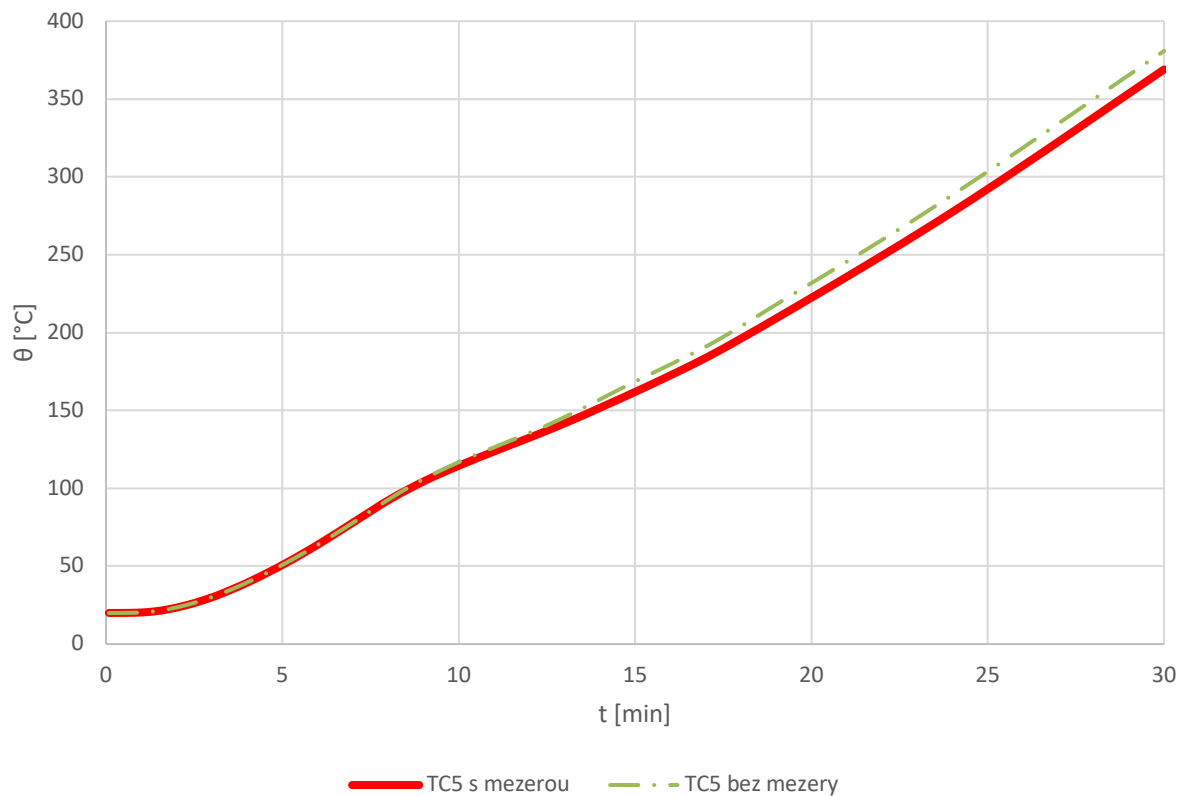
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v ocelovém plechu (TC2), viz obr. 61, uprostřed svorníku (TC5), viz obr. 62, ve čtvrtině svorníku (TC6) viz obr. 63 a v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 64.

Vysvětlivky ke grafům:

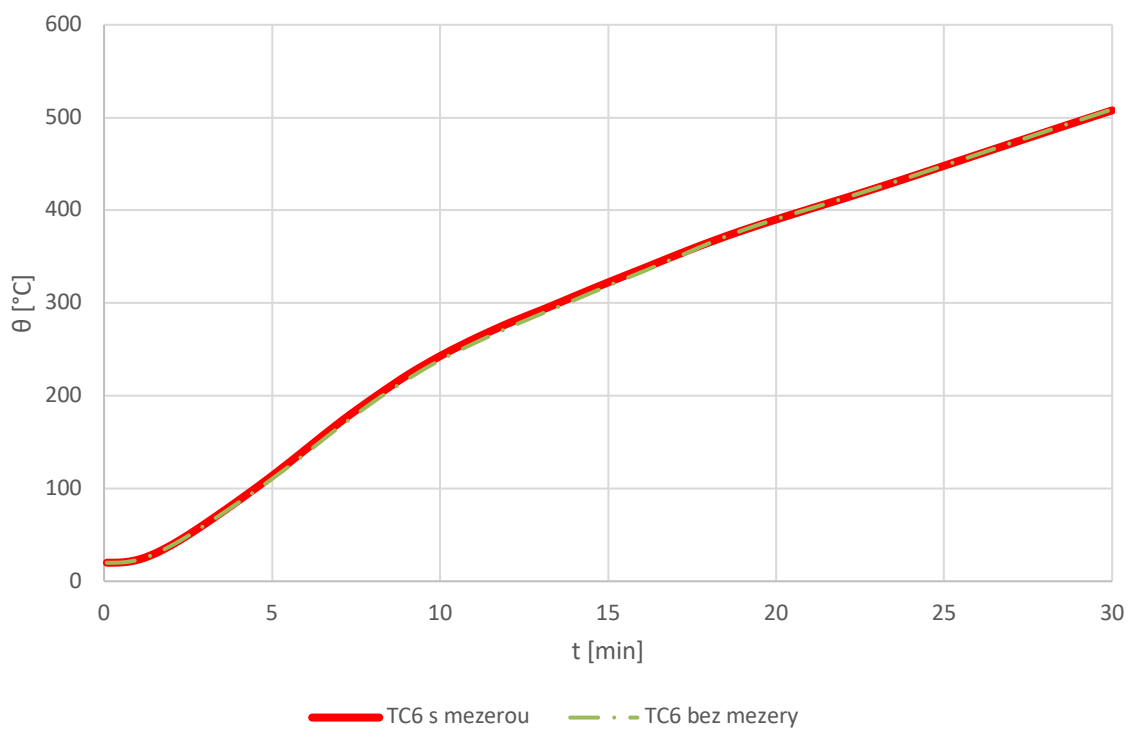
- TCx s mezerou - teploty z numerické analýzy modelu s mezerou
- TCx bez mezery - teploty z numerické analýzy modelu bez mezery



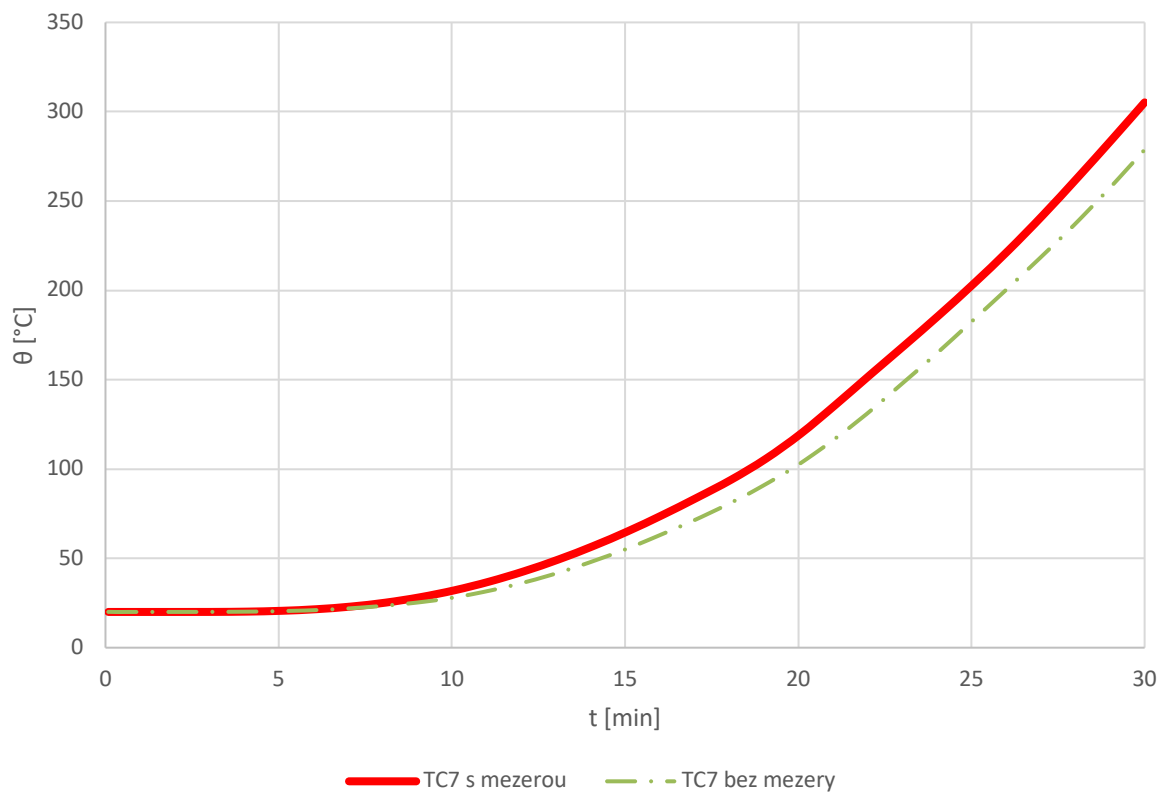
Obr. 61: Rozložení teploty v bodě TC2 v modelu se spárou a v modelu bez spáry



Obr. 62: Rozložení teploty v bodě TC5 v modelu se spárrou a v modelu bez spáry



Obr. 63: Rozložení teploty v bodě TC6 v modelu se spárrou a v modelu bez spáry



Obr. 64: Rozložení teploty v bodě TC7 v modelu se spárou a v modelu bez spáry

6.9.2 Závěr numerického výpočtu

Ze získaných dat lze soudit, že řešení dřevěného spoje bez vzduchových mezer pouze minimálně ovlivňuje průběh nárůstu teploty v jeho jednotlivých částech. Teploty v plechu a svornících jsou téměř shodné. Jejich minimální rozdíly mohou být způsobené změnou výpočetní sítě a ručním zadáváním kontrolních bodů. Největší rozdíl teplot je zpozorován v dřevěném trámu. Jedná se o rozdíl 26,5 °C v čase 30 min.

6.10 Vliv počtu vložených ocelových desek

Zkoumaná charakteristika vychází z potřeby zvětšení únosnosti dřevěného spoje s vloženou deskou za běžné teploty. Jednou z typických možností, jak zesílit spoj je vložení většího počtu ocelových plechů. Takové řešení zachovává vzhled spoje a velikost spoje. V numerické analýze je zkoumán spoj s dvěma vloženými ocelovými deskami.

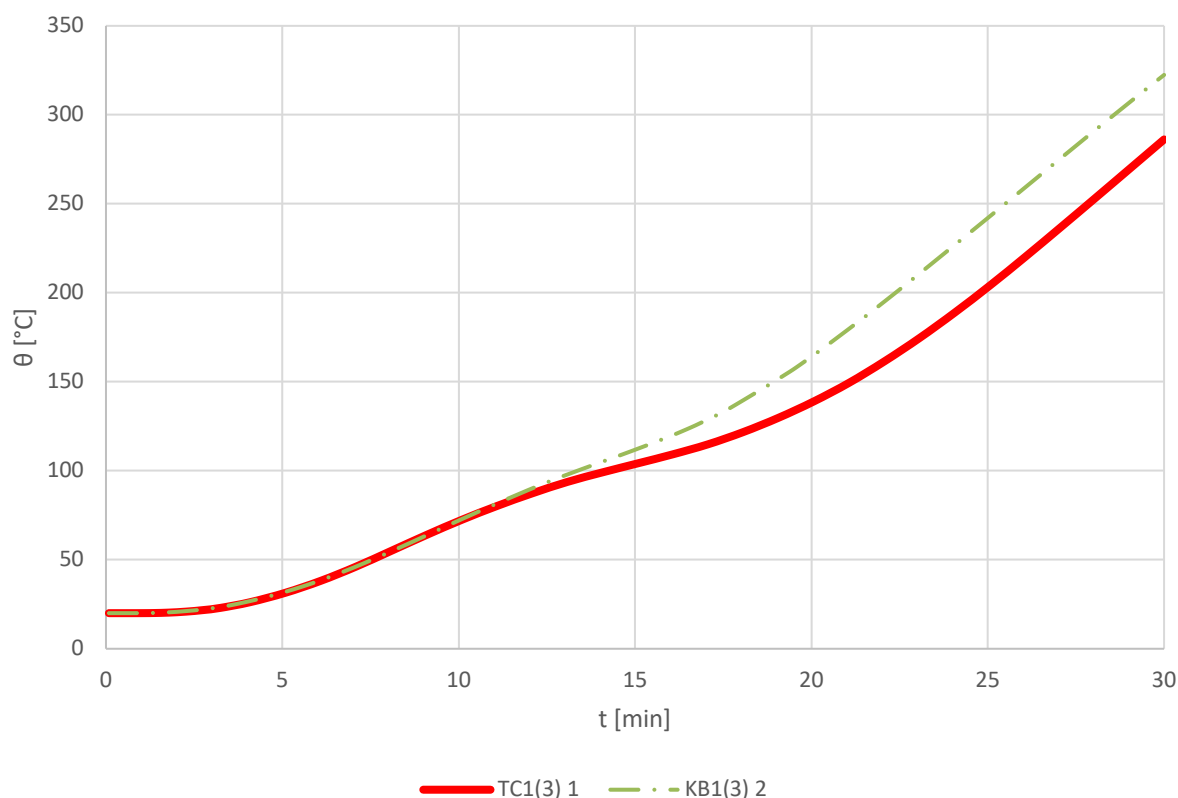
Vzhledem k změně geometrie spoje jsou zde zavedené kontrolní body KBx. Podrobněji o jejich umístění viz 5.4.2., obr. 28 a obr. 29.

6.10.1 Výsledky numerického výpočtu

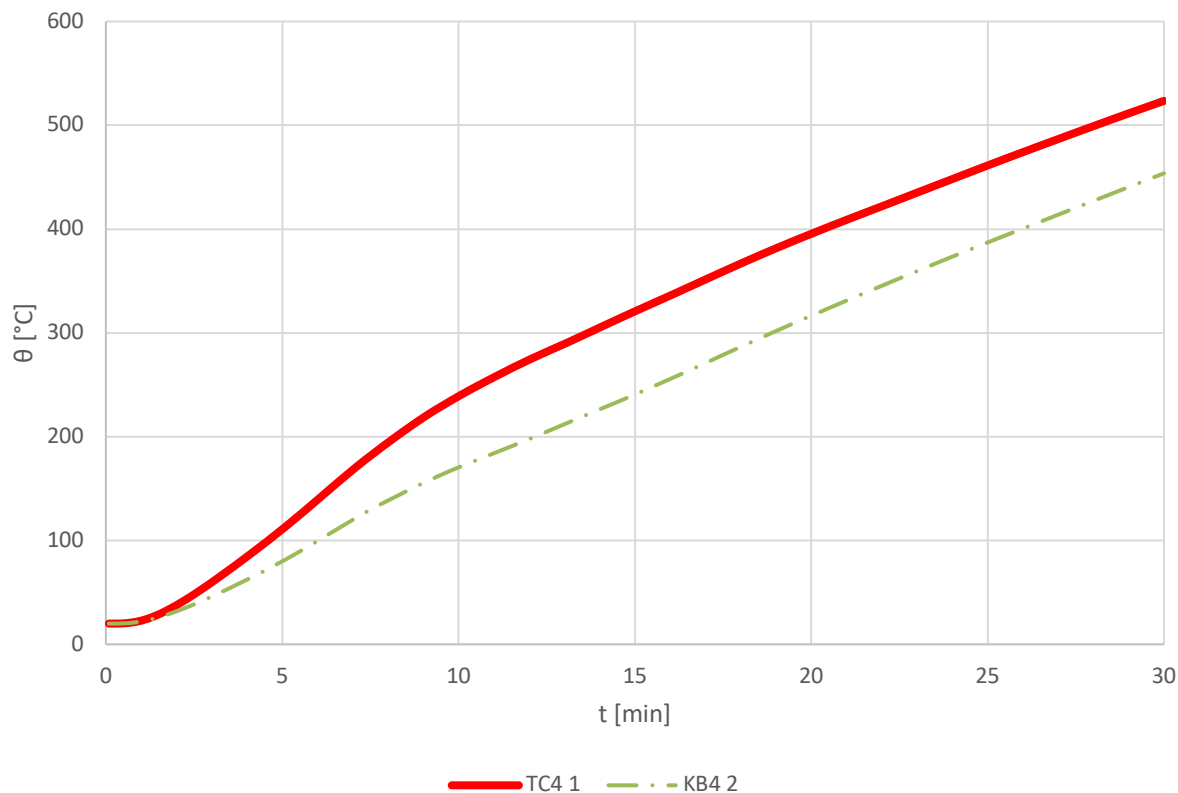
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v ocelovém plechu (KB1/KB3), viz obr. 65, uprostřed svorníku (KB5), viz obr. 66, v dřevěném trámu (KB7), viz obr. 67 a v trámu mezi svorníky (KB8/KB9), viz obr. 68.

Vysvětlivky ke grafům:

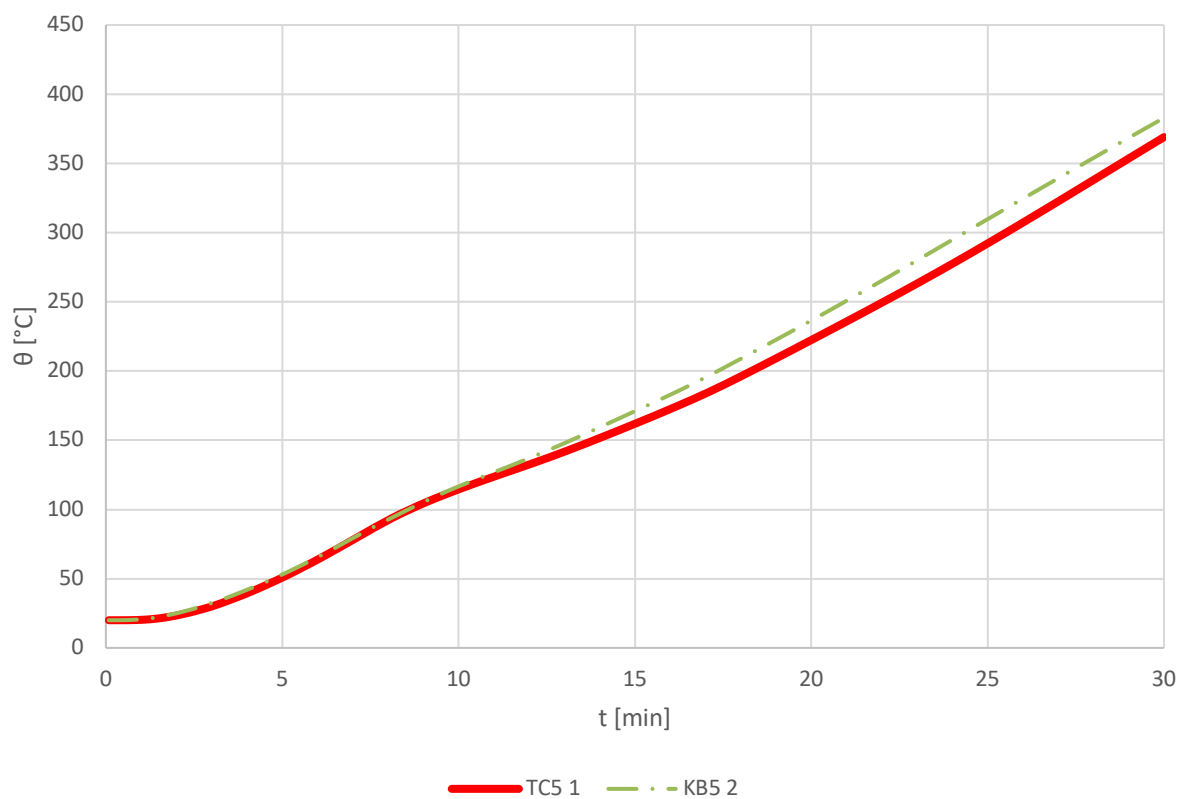
- TCx 1 - teploty z numerické analýzy spoje s 1 plechem
- KBx 2 - teploty z numerické analýzy spoje s 2 plechy



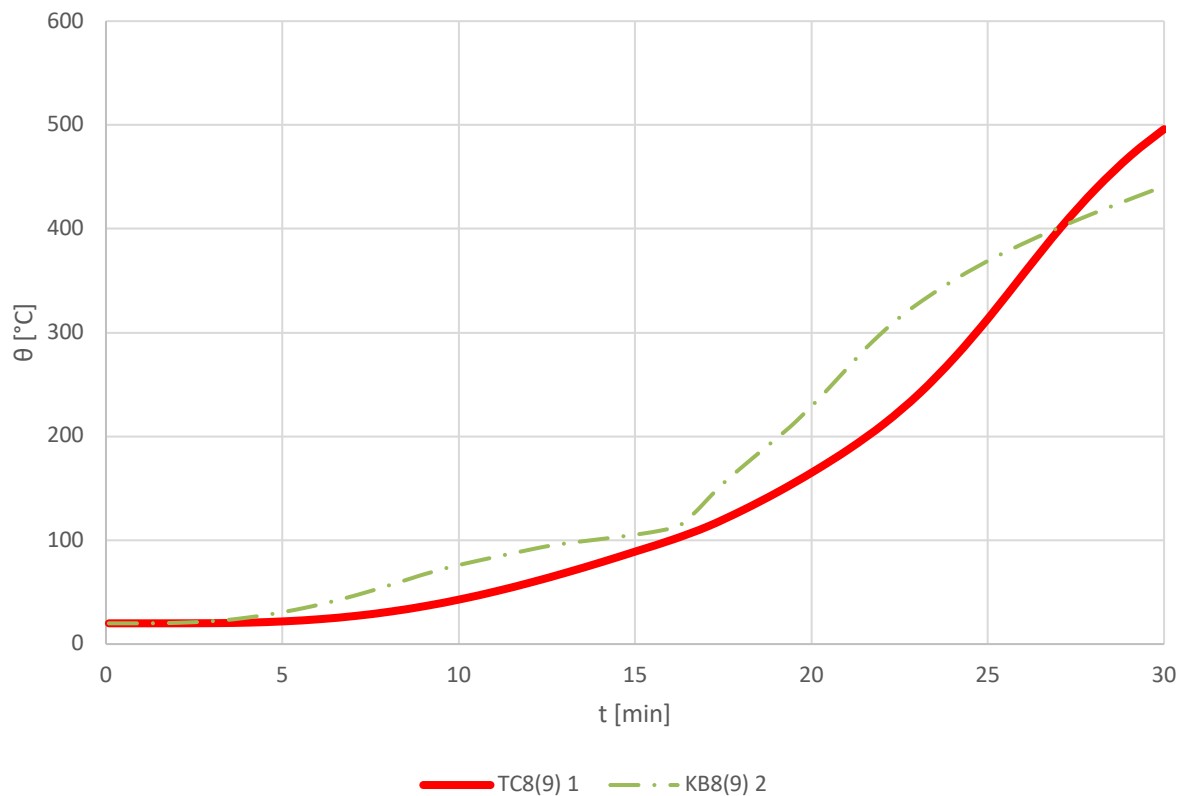
Obr. 65: Rozložení teploty v bodě KB1 (TC1) a KB3 (TC3) při použití jednoho a dvou plechů



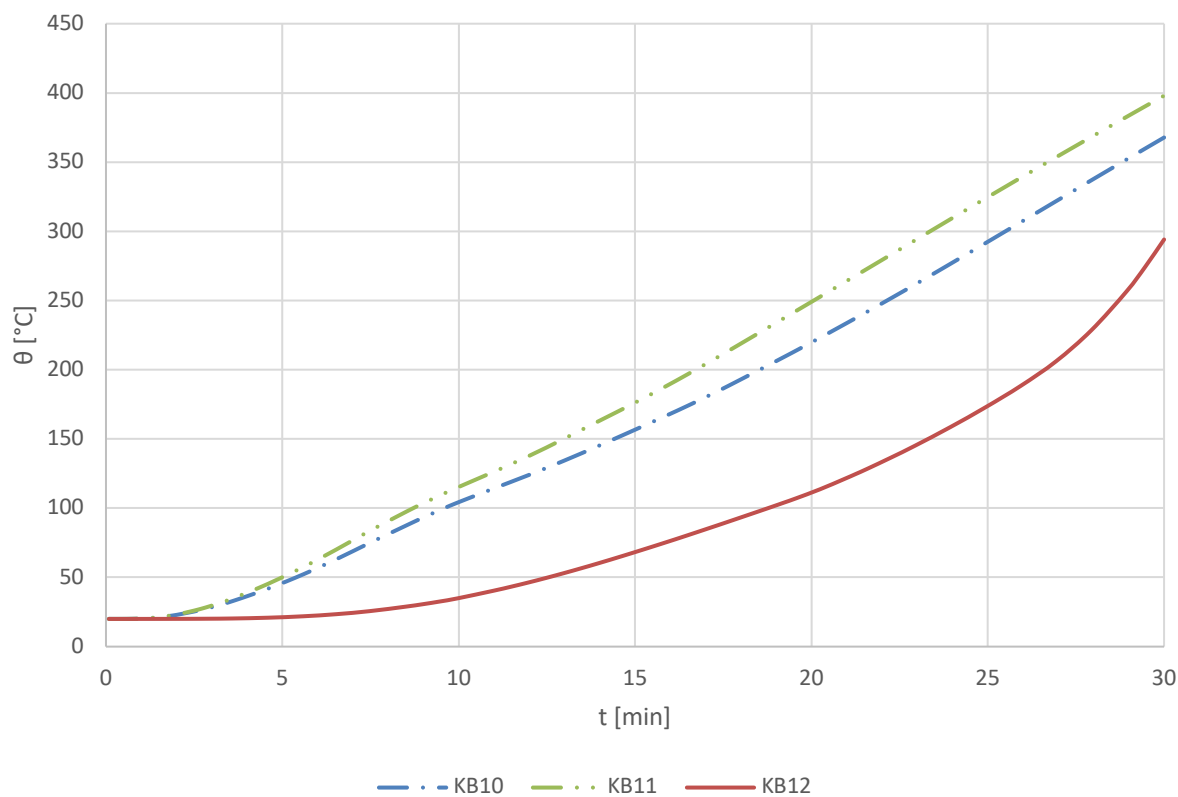
Obr. 66: Rozložení teploty v bodě KB4 (TC4) při použití jednoho a dvou plechů



Obr. 67: Rozložení teploty v bodě KB5 (TC5) při použití jednoho a dvou plechů



Obr. 68: Rozložení teploty v bodě KB8 (TC8) a KB9 (TC9) při použití jednoho a dvou plechů

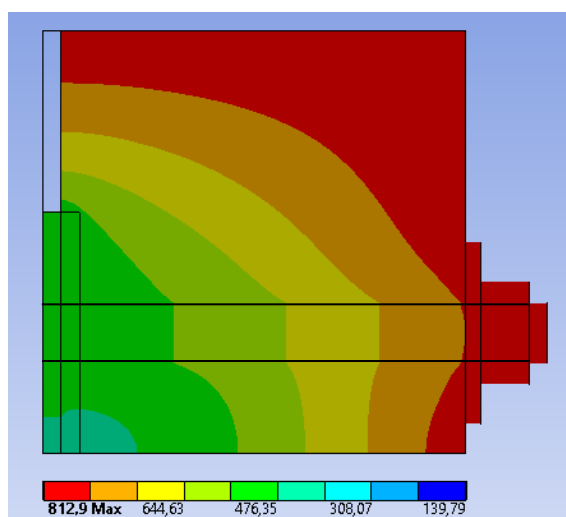


Obr. 69: Rozložení teploty v bodě KB10, KB11 a KB12 při použití dvou plechů

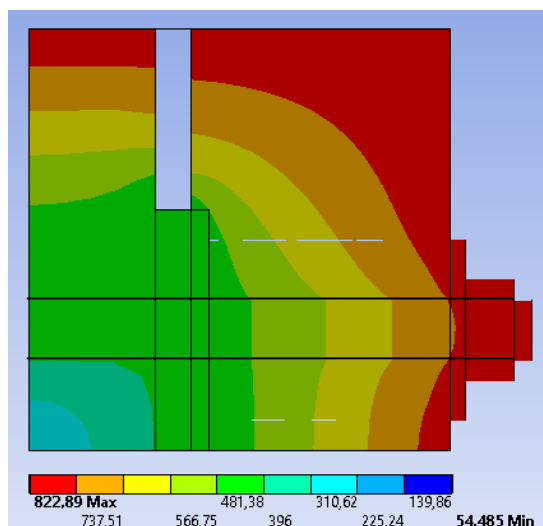
6.10.2 Závěr numerického výpočtu

Změna počtu plechů má výrazný vliv na průběh teploty skoro všech částí spoje. Ocelový plech v kontrolních bodech KB1 a KB3 ukazuje zvýšení teploty o 52,25 °C v čase 30 min (obr. 65) v porovnání se stejnými kontrolními body u plechu TC1 a TC3 umístěnými v ose spoje. Takovou tepelnou odezvu lze vysvětlit bližší polohou ocelové desky k ohřívanému povrchu. Větší zahřátí plechu nepříznivě působí na teploty v svornících. V bodě KB5 (obr. 67) je vidět rychlejší nárůst teploty.

Vzhledem k nové poloze kontrolních bodů KB4, KB6 jejich nárůst teploty méně intenzivní než u stejných bodů u modelu s jednou ocelovou deskou. U modelu se dvěma plechy jsou tyto body umístěny v blízkosti modifikované vrstvy, která má horší vlastnost se zahřívát. Principiálně stejné umístění má bod KB8. Zde je vidět skoro plné zastavení nárůstu teploty v čase 15 min. Teploty v částech mimo spoj jsou stejné u obou numerických modelů. Šíření teploty ve spojích přes spojovací prostředek je znázorněno na obr. 70 a obr. 71. Tyto řezy prochází přes kontrolní body KB11, KB4 a TC4.



Obr. 70: Rozložení teploty v modelu s jednou ocelovou deskou – řez spojovacím prostředkem



Obr. 71: Rozložení teploty v modelu s dvěma ocelovými deskami – řez spojovacím prostředkem

Středová část dřevěného trámu se jako jediná nachází mezi plechy, což znamená, že se zde netvoří efekt parozábrany, jelikož většina vlhkosti unikne ven ze dřeva a zbytek se směřuje dovnitř spoje, kde není žádný ocelový prvek, a proto se v numerickém modelu nevyskytuje modifikační vrstva. Z obr. 69 je patrné, že dřevo mezi svorníky KB12 je v čase 30 minut téměř zuhelnatělé a rozdíl teploty v bodech TC5 a KB 11 je v čase 30 minut minimální.

6.11 Vliv typu spojovacích prostředků

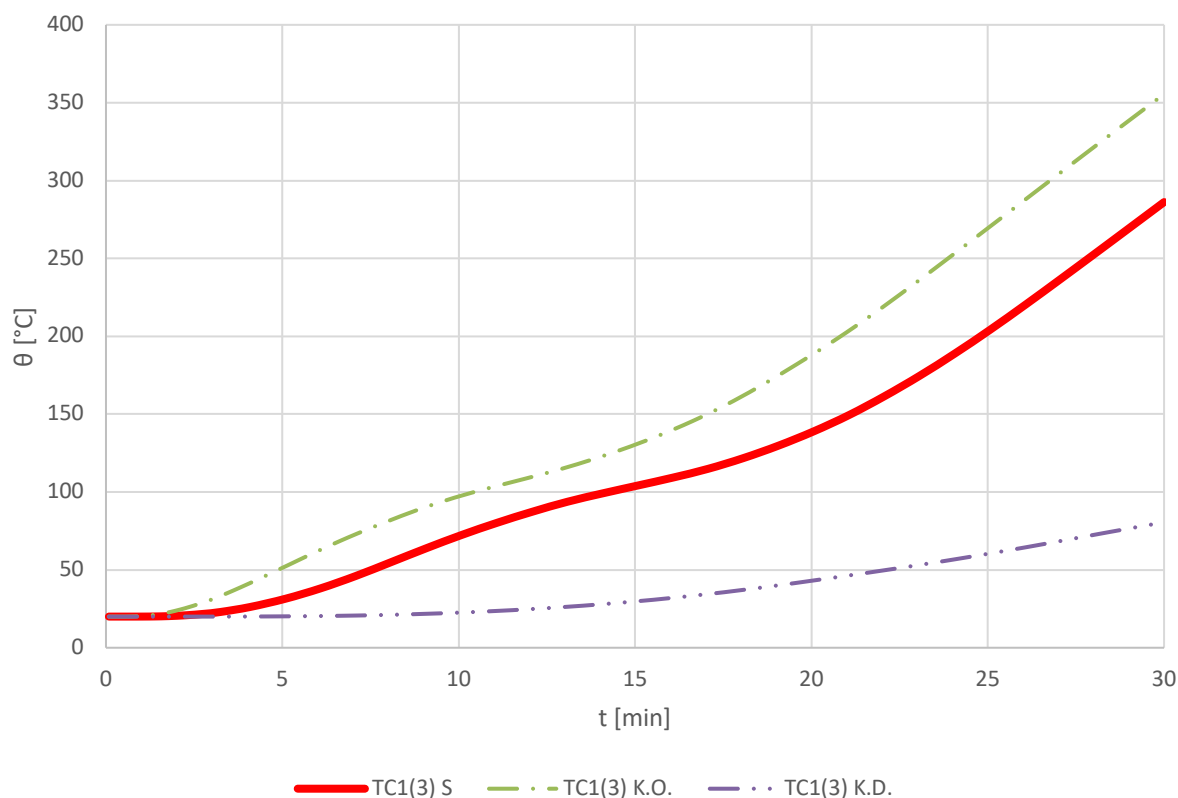
Zásadní vliv na šíření tepla ve spoji mají spojovací prostředky, které se mohou lišit tvarem, materiálem a únosností. Ke každému typu jsou stanovené zvláštní konstrukční zásady. Všechny numerické modely v této podkapitole tyto zásady splňují, ale mají odlišnou únosnost.

6.11.1 Výsledky numerického výpočtu

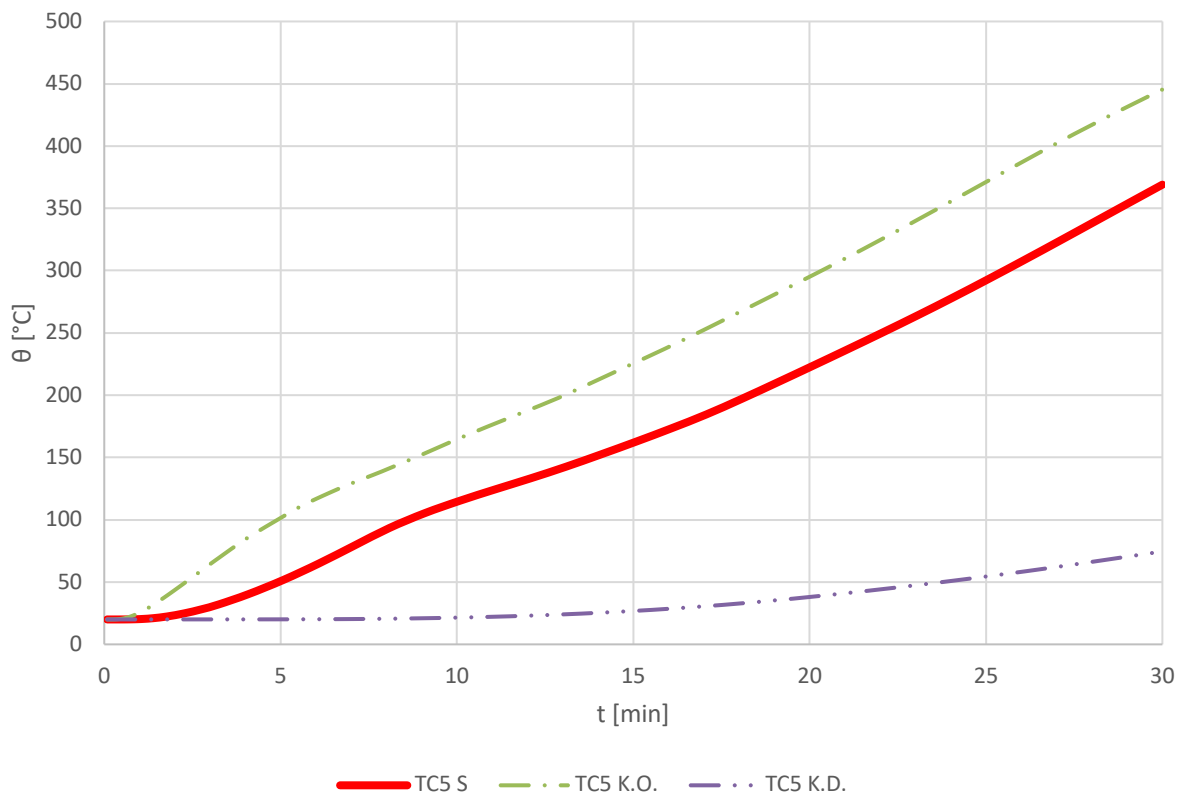
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v ocelovém plechu (TC1/TC3), viz obr. 72, uprostřed svorníku (TC5), viz obr. 73, v dřevěném trámu mezi svorníky (TC8/TC9), viz obr. 74.

Vysvětlivky ke grafům:

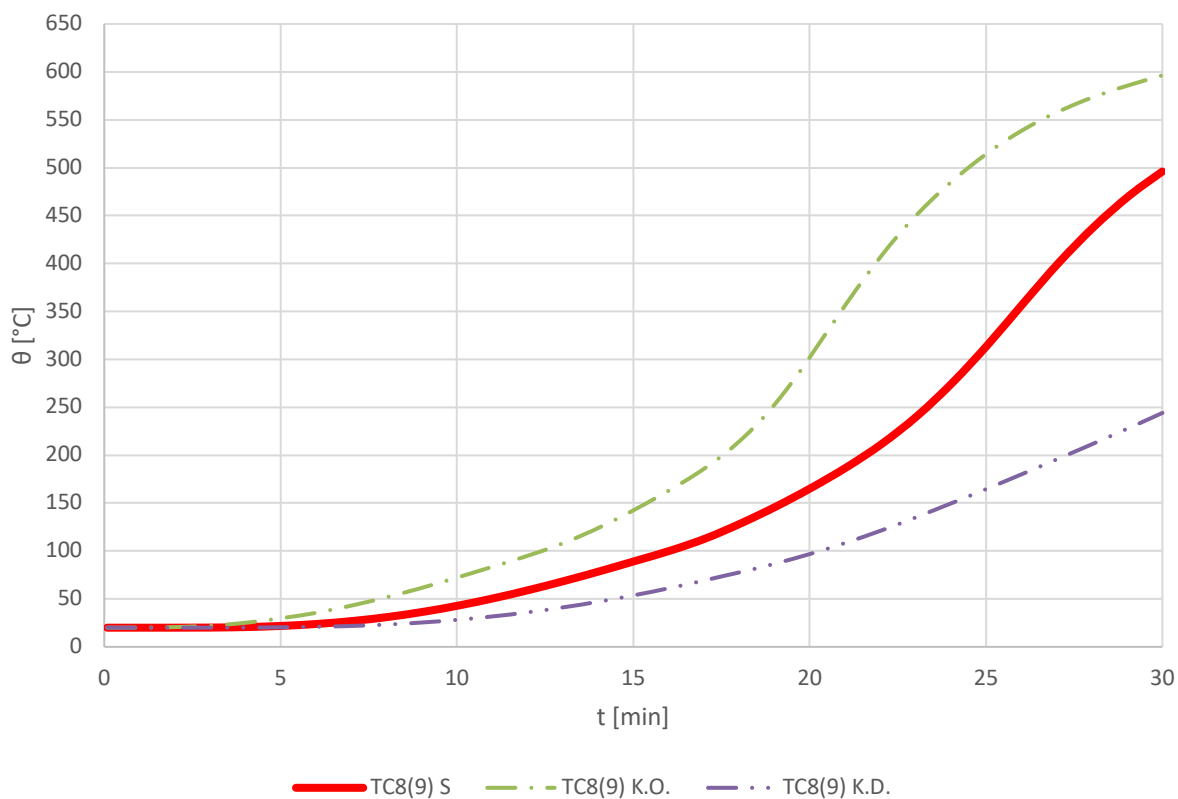
- | | |
|----------|--|
| TCx S | - teploty z numerické analýzy spoje se svorníky |
| TCx K.O. | - teploty z numerické analýzy spoje ocelovými kolíky |
| TCx K.D. | - teploty z numerické analýzy spoje dřevěnými kolíky |



Obr. 72: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých spojovacích prostředků



Obr. 73: Rozložení teploty v bodě TC5 při použití různých spojovacích prostředků

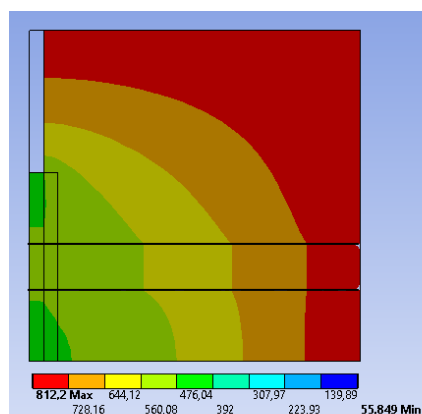


Obr. 74: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých spojovacích prostředků

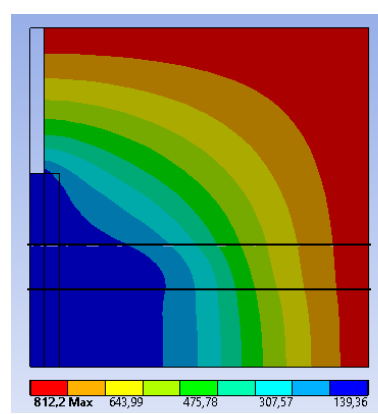
6.11.2 Závěr numerického výpočtu

Numerický model s ocelovými kolíky má ve všech kontrolních bodech rychlejší nárůst teploty v porovnání s numerickým modelem se svorníky. Takovou reakci na požár lze vysvětlit kratší délkou spojovacího prostředku, tzn. kratší vzdáleností kontrolního bodu od spojovacího prostředku, a menším objemem ohřívané hmoty. Zahřátá část průřezu, která je označena červenou barvou, se posunula směrem k centru průřezu, viz obr. 75 a obr. 77. Následně je rychlost zahřátí podobná původnímu modelu. Teplota v trámu v blízkosti ocelových částí je ovlivněna minimálně. Největší rozdíl teplot 76,36 °C je v kolíku v ose spoje. Použití dřevěných kolíků má příznivý vliv na všechny části spoje, nicméně není vhodné při potřebě jeho vyšší únosnosti.

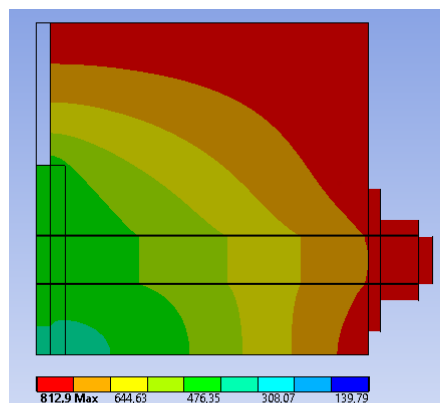
Tepelné odezvy numerického modelu se svorníky jsou popsány v předchozích kapitolách a [28]. Teploty v částech mimo spoj jsou stejné u obou numerických modelů s ocelovými spojovacími prostředky. Šíření teploty ve spoích přes spojovací prostředek je znázorněno na obr. 75, obr. 76 a obr. 77. Tyto řezy prochází přes TC4.



Obr. 75: Rozložení teploty v modelu s ocelovými kolíky – řez spojovacím prostředkem



Obr. 76: Rozložení teploty v modelu s dřevěnými kolíky – řez spojovacím prostředkem



Obr. 77: Rozložení teploty v modelu se svorníky – řez spojovacím prostředkem

7 Vliv typu požáru na chování spoje

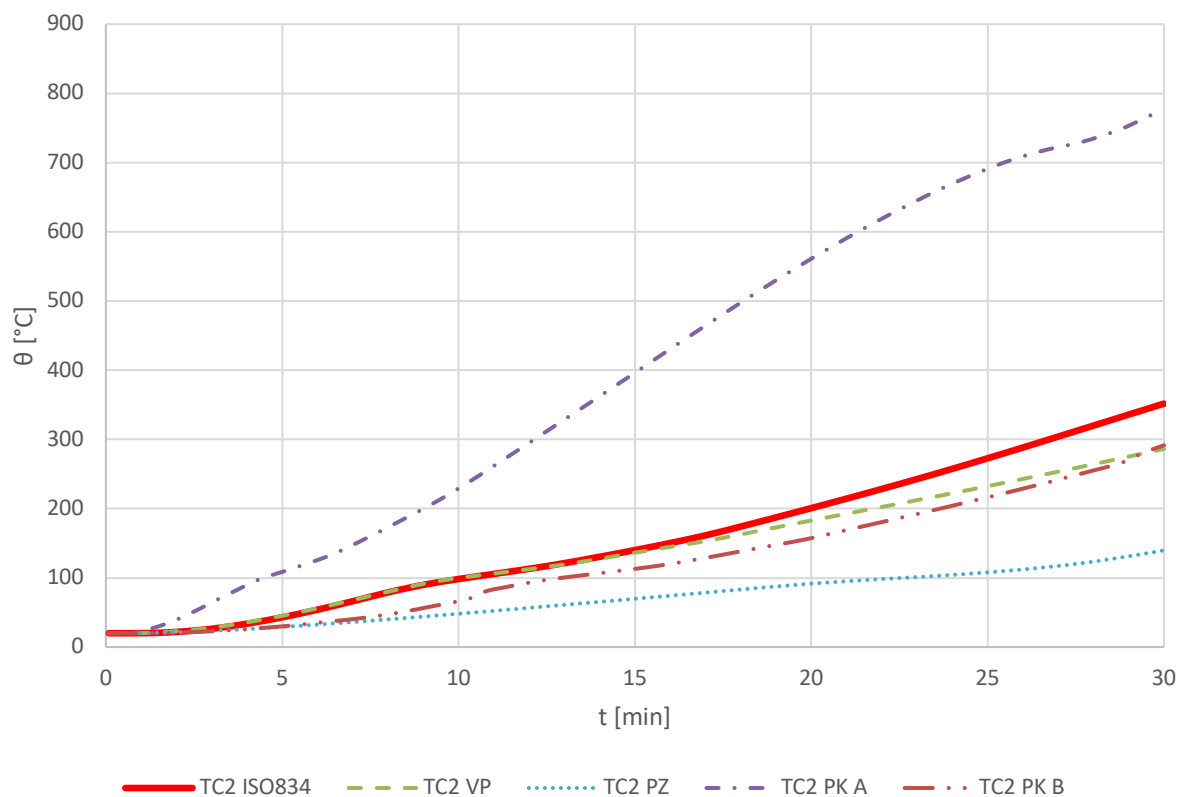
Nedílnou součástí modelování spojů konstrukcí je definování požárního scénáře. Všechny numerické modely v předchozí kapitole byly vystaveny normové teplotní křivce. V této kapitole je posouzen vliv různých teplotních křivek, které jsou již uvedené v kapitole 4. Změna teplotního zatížení má zásadní vliv na odhořívání dřevěných prvků spoje, nárůst teploty v ocelových prvcích a na celkovou únosnost spoje.

7.1 Výsledky numerických výpočtů

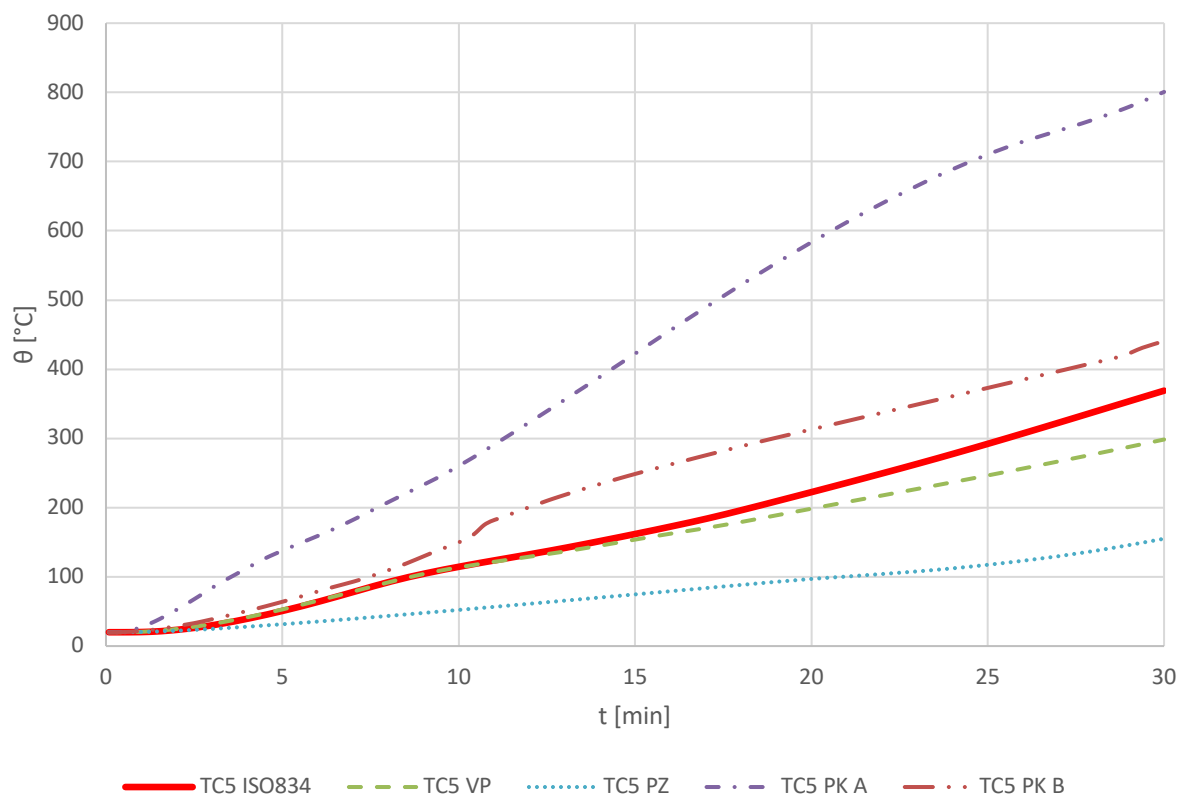
Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot v ocelovém plechu (TC2), viz obr. 78, ve čtvrtině rozpětí svorníku (TC5), viz obr. 79, uprostřed svorníku (TC6), viz obr. 80, v dřevěném trámu (TC7), viz obr. 81 a v dřevěném trámu mezi svorníky (TC8/TC9), viz obr. 82.

Vysvětlivky ke grafům:

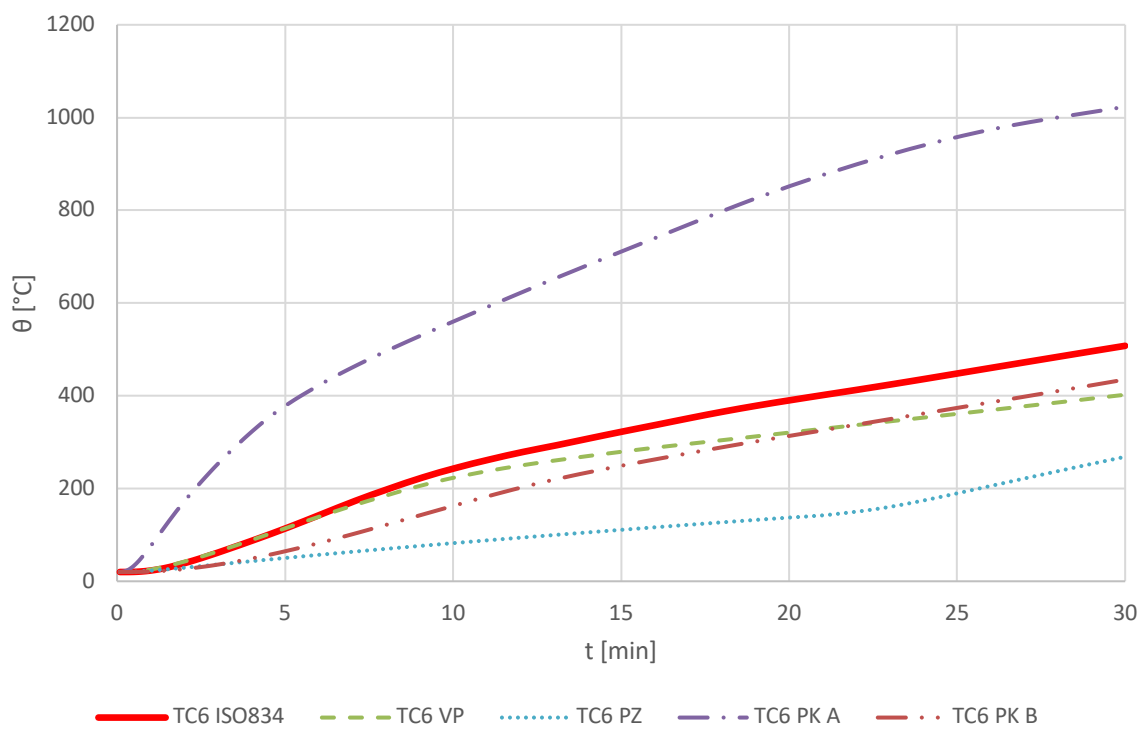
TCx ISO834	- teploty spoje vystaveného normové teplotní křivce
TCx VP	- teploty spoje vystaveného křivce vnějšího požáru
TCx PR	- teploty spoje vystaveného křivce pomalého rozhořívání
TCx PK A	- teploty spoje vystaveného parametrické křivce A
TCx PK B	- teploty spoje vystaveného parametrické křivce B



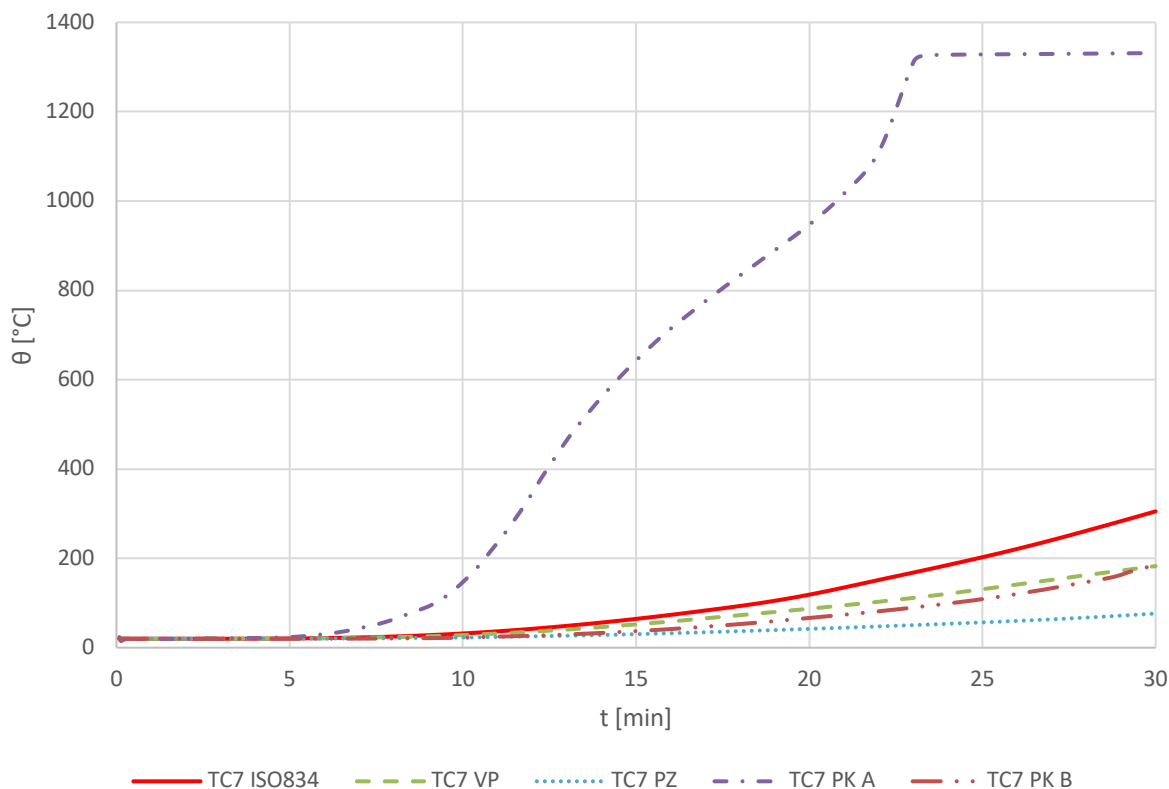
Obr. 78: Rozložení teploty v bodě TC2 při vystavení spoje různým teplotním křivkám



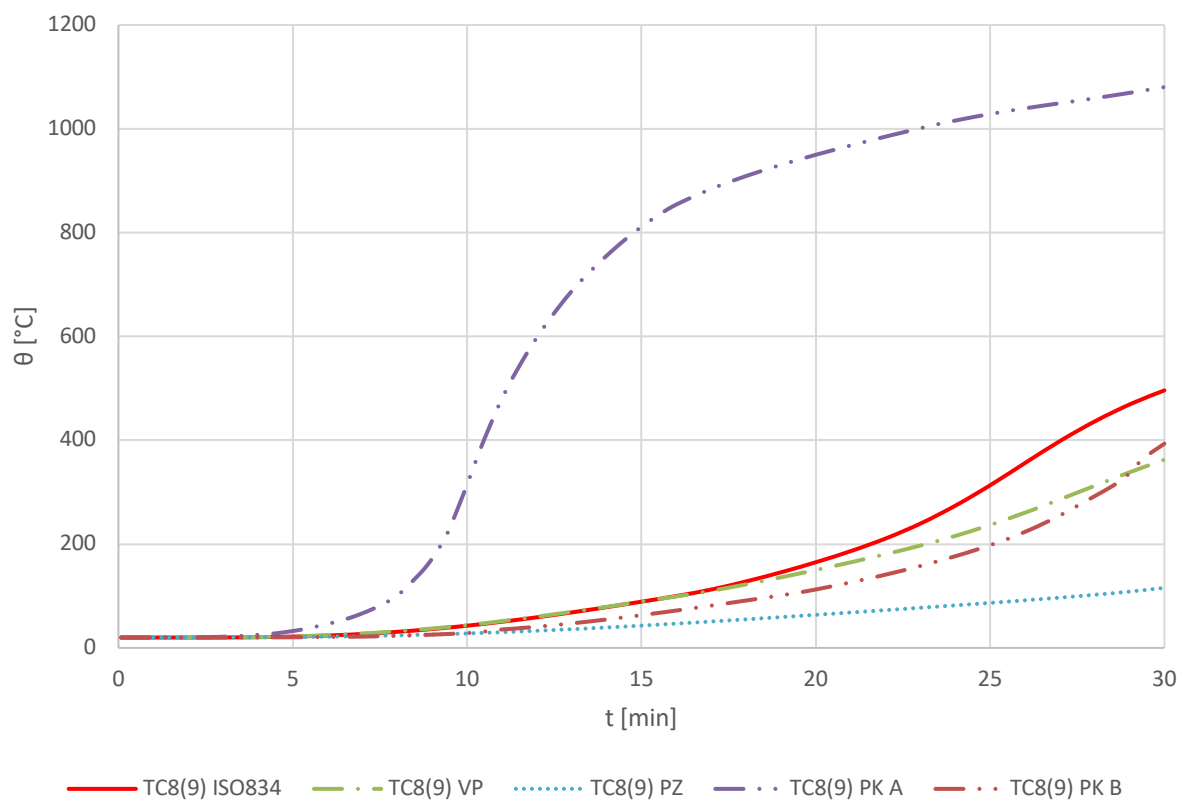
Obr. 79: Rozložení teploty v bodě TC5 při vystavení spoje různým teplotním křivkám



Obr. 80: Rozložení teploty v bodě TC6 při vystavení spoje různým teplotním křivkám



Obr. 81: Rozložení teploty v bodě TC7 při vystavení spoje různým teplotním křivkám



Obr. 82: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při vystavení spoje různým teplotním křivkám

7.2 Shrnutí vlivu teplotního zatížení

Nejvyšší hodnoty teplot ve spoji odpovídají parametrické křivce A. Vysoké teploty jsou vyvolány náhlým nárůstem teploty požáru. Ocelové prvky mají téměř okamžitou odezvu na požár, tzn. že v čase 5 min se prohřejí až do teploty 364,36 °C, zatímco dřevěný trám má ve stejném čase v bodě TC7 teplotu 29,78 °C. Nárůst teploty ve dřevě probíhá pozvolna až do cca 10. minuty a následně se zahřívá s výrazně větší rychlostí. Dřevěné prvky začnou uhelnatět při teplotě cca 300 °C, tedy v okamžik, kdy ocelové části mají max. 560 °C. Při takové teplotě ocel výrazně ztrácí své mechanické vlastnosti a lze tedy předpokládat, že v případě tak náhlých požárů je nejslabším prvkem spoje nechráněná ocel – ocelové svorníky.

Dále následuje popis teploty prvků vystavených požáru podle normové teplotní křivky. Cca do 10 minuty probíhá prudký nárůst teploty a následně tato rychlost se snižuje. Použití těchto teplot u návrhu konstrukce zaručuje bezpečnostní rezervu ale zároveň v určitých případech způsobuje jejich zbytečné předdimenzování.

Teplotní odezvy od parametrické křivky B a křivky vnějšího požáru jsou téměř shodné. Vykazují menší hodnoty teplot v porovnání se spojem vystaveným ISO 834. V čase 9,8 min dosahuje hodnota teploty konstantních 660 °C, nic méně tento faktor nebrání zahřívání všech prvků spoje. Takový výsledek numerické analýzy lze vysvětlit tím, že hořlavé vlastnosti dřeva způsobí další samovolné hoření dřeva. Použití těchto křivek může vést ke zvýšení výpočtové požární odolnosti konstrukce a zároveň k zachování bezpečnostní rezervy únosnosti.

Nejnižší teploty byly spočtené u spoje vystaveného křivce pomalého zahřívání. Maximální teplota v ocelových částech nepřekračuje 300 °C a v dřevěném trámu 100 °C. Jelikož tato teplota nepřekračuje teplotu zuhelnatění dřeva, lze uvažovat celý průřez trámu ve výpočtu požární odolnosti spoje jako neovlivněný. Použití této křivky pro stanovení požární odolnosti konstrukce menší než 100 minut je nevhodné z důvodu nedostačující bezpečnostní rezervy únosnosti.

8 Závěr a stanovení doporučení k návrhu spoje

Na základě řady provedených citlivostních analýz lze jednoznačně tvrdit, že pomocí změny geometrie a pevnosti dřeva je možné zvýšit požární odolnost dřevěného svorníkového spoje s vloženou ocelovou deskou. Nicméně se nejedná o její výrazné zvětšení.

Největší vliv na průběh teploty ve spoji má výška a šířka trámu, velikost ocelové desky a velikost spojovacích prostředků. Nejmenší vliv byl pozorován u analýzy příčné mezery mezi trámy, podélné mezery v trámu a analýzy pevnosti dřeva. Proto by bylo vhodné navrhovat spoje s větším počtem spojovacích prostředků o menších průměrech a také upřednostňovat větší šířky spojů. Toto řešení příznivě ovlivňuje teplotu spojovacích prostředků a ocelové desky. Volba větší pevnosti dřeva by neměla ovlivnit průběh teploty uvnitř spoje, ale toto řešení by se dalo doporučovat v případě dřevěných spojů bez ocelových prostředků. Pracovní spáry do 6 mm jsou přípustné, jelikož téměř neovlivňují nárůst teploty ve spoji ani v oblasti mimo spoj. Optimální volbou spojovacích prostředků jsou svorníky. Dle numerické analýzy ocelové kolíky mají nepříznivý účinek na tepelnou odezvu všech částí spoje. Dřevěné kolíky příznivě ovlivňují chování spoje při požáru, ale mají výrazně menší únosnost, tzn. že v případě potřeby dosažení větší únosnosti by bylo potřeba vložit větší plech a větší počet spojovacích prostředků. Tyto změny způsobí další negativní změny geometrie, např. zvýšení pracovní spáry kvůli zvětšení pracovních spár v trámu, zvětšení délky ocelového plechu – zvětšení jeho ohřívané plochy a zvětšení velikosti spoje – větší ohrožená část konstrukce apod.

Podle provedených citlivostních analýz je možné doporučit numerické modely nechráněného dřevěného svorníkového spoje s vloženou ocelovou deskou za použití materiálových vlastností od Janssense [19] u dřeva a materiálových vlastností z EC5 [9] u ocelových částí. Numerické modely by měly zahrnovat také modifikační vrstvu tloušťky 3 mm u plechu na exponované straně. Materiálové vlastnosti této vrstvy jsou dány od Janssense [19] s úpravou měrné tepelné kapacity na 100 kJ/kgK.

Dalším důležitým faktorem při návrhu dřevěného spoje s vloženou ocelovou deskou je správná volba požárního scénáře, kterému je konstrukce nebo její část vystavena. Z numerické analýzy je patrné, že návrh řešeného spoje bude předimenzován, pokud se bude uvažovat s parametrickou křivkou s intenzitou nárůstu teploty větší než u ISO 834. A naopak, pokud se pro výpočet požární odolnosti použije křivka s menší intenzitou nárůstu teploty, např. křivka vnějšího požáru, zvýší se požární odolnost, ale zaniká její bezpečnostní rezerva. Takové řešení lze doporučit jen při podrobné analýze požárního úseku, ve kterém se spoj nachází.

Pro rozšíření vědomostí o tomto tématu by bylo vhodné provést validaci a verifikaci zatíženého “idealizovaného” spoje dle doporučení uvedených výše. Rovněž by bylo vhodné provést podrobnější analýzu modifikované vrstvy, tzn. vytvořit numerický model, který bude respektovat tvarovou, polohovou a časovou nestálost této vrstvy a provést detailnější průzkum šíření zabudované vlhkosti ve dřevě při požáru.

Seznam obrázků

Obr. 1: Půdorys a pohled zkoušeného vzorku [28]	3
Obr. 2: Bokorys a pohled na numerický model [28]	4
Obr. 3: Pohled na numerický model [2].....	6
Obr. 4: Hloubka zuhelnatění vzorků smrku při působení tepelného toku 25 kW/m^2 . Doby expozice vzorků jsou zleva: 10, 15 a 20 minut	7
Obr. 5: Řez vzorky po ukončení zkoušky v 110 min [14]	9
Obr. 6: Jednorozměrná a nominální hloubka zuhelnatění [6]	12
Obr. 7: Proces hoření dřeva	12
Obr. 8: Nominální křivky [20].....	14
Obr. 9: Parametrické křivky [6]	16
Obr. 10: Schematické tvary parametrických křivek:	17
Obr. 11: Numerický model dřevného spoje s vloženou ocelovou deskou a ocelovými kolíky	20
Obr. 12: Dřevěný kolík s vroubkovaným povrchem	20
Obr. 13: Ocelový válcovaný kolík	21
Obr. 14: Model válcovaného kolíku	21
Obr. 15: Měrná tepelná kapacita vzduchu.....	22
Obr. 16: Tepelná vodivost vzduchu.....	22
Obr. 17: Objemová hmotnost vzduchu	22
Obr. 18: Objemová hmotnost oceli	22
Obr. 19: Měrná tepelná kapacita oceli.....	23
Obr. 20: Tepelná vodivost oceli.....	23
Obr. 21: Objemová hmotnost jehličnatého dřeva	23
Obr. 22: Tepelná vodivost dřeva	23
Obr. 23: Měrná tepelná kapacita dřeva	23
Obr. 24: Objemová hmotnost bukového dřeva	23
Obr. 25: Tepelné křivky zavedené do numerických modelů.....	24
Obr. 26: Schéma umístění bodů – pohled	25
Obr. 27: Schéma umístění bodů – půdorys	25
Obr. 28: Schéma umístění bodů – pohled	26
Obr. 29: Schéma umístění bodů – půdorys	26
Obr. 30: Rozložení teploty v bodě TC2 při různých tloušťkách modifikované vrstvy	28
Obr. 31: Rozložení teploty v bodě TC4 při různých tloušťkách modifikované vrstvy	28
Obr. 32: Rozložení teploty v bodě TC7 při různých tloušťkách modifikované vrstvy	29

Obr. 21: Objemová hmotnost jehličnatého dřeva.....	30
Obr. 22: Tepelná vodivost dřeva.....	30
Obr. 23: Měrná tepelná kapacita dřeva.....	30
Obr. 33: Rozložení teploty v bodě TC2 při různých vlastnostech dřeva.....	31
Obr. 34: Rozložení teploty v bodě TC5 při různých vlastnostech dřeva.....	31
Obr. 35: Rozložení teploty v bodě TC7 při různých vlastnostech dřeva.....	32
Obr. 36: Rozložení teploty v bodě TC8 při různých vlastnostech dřeva.....	32
Obr. 37: Rozložení teploty v bodě TC2 při různých tloušťkách ocelové desky	34
Obr. 38: Rozložení teploty v bodě TC5 při různých tloušťkách ocelové desky	35
Obr. 39: Rozložení teploty v bodě TC7 při různých tloušťkách ocelové desky	35
Obr. 40: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při různých tloušťkách ocelové desky	36
Obr. 41: Rozložení teploty v bodě TC4 při použití různé pevnosti dřeva	37
Obr. 42: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různé pevnosti dřeva	38
Obr. 43: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různé pevnosti dřeva	38
Obr. 44: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různé pevnosti dřeva	39
Obr. 45: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých velikostí svorníků	40
Obr. 46: Rozložení teploty v bodě TC5 při použití různých velikostí svorníků.....	41
Obr. 47: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých velikostí svorníků.....	41
Obr. 48: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých velikostí svorníků	42
Obr. 49: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC 3 při použití různých výšek trámu	43
Obr. 50: Rozložení teploty v bodě TC4 při použití různých výšek trámu	44
Obr. 51: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých výšek trámu	44
Obr. 52: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých výšek trámu.....	45
Obr. 53: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých šířek trámu	46
Obr. 54: Rozložení teploty v bodě TC4 při použití různých šířek trámu	47
Obr. 55: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých šířek trámu	47
Obr. 56: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých šířek trámu	48
Obr. 57: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých velikostí mezery	49
Obr. 58: Rozložení teploty v bodě TC5 při použití různých velikostí mezery	50
Obr. 59: Rozložení teploty v bodě TC7 při použití různých velikostí mezery	50
Obr. 60: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých velikostí mezery	51
Obr. 61: Rozložení teploty v bodě TC2 v modelu se spárou a v modelu bez spáry	52
Obr. 62: Rozložení teploty v bodě TC5 v modelu se spárou a v modelu bez spáry.....	53
Obr. 63: Rozložení teploty v bodě TC6 v modelu se spárou a v modelu bez spáry	53

Obr. 64: Rozložení teploty v bodě TC7 v modelu se spárou a v modelu bez spáry	54
Obr. 65: Rozložení teploty v bodě KB1 (TC1) a KB3 (TC3) při použití jednoho a dvou plechů.....	55
Obr. 66: Rozložení teploty v bodě KB4 (TC4) při použití jednoho a dvou plechů	56
Obr. 67: Rozložení teploty v bodě KB5 (TC5) při použití jednoho a dvou plechů	56
Obr. 68: Rozložení teploty v bodě KB8 (TC8) a KB9 (TC9) při použití jednoho a dvou plechů.....	57
Obr. 69: Rozložení teploty v bodě KB10, KB11 a KB12 při použití dvou plechů.....	57
Obr. 70: Rozložení teploty v modelu s jednou ocelovou deskou – řez spojovacím prostředkem.....	58
Obr. 71: Rozložení teploty v modelu s dvěma ocelovými deskami – řez spojovacím prostředkem ...	58
Obr. 72: Rozložení teploty v bodě TC1 a TC3 při použití různých spojovacích prostředků.....	59
Obr. 73: Rozložení teploty v bodě TC5 při použití různých spojovacích prostředků.....	60
Obr. 74: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při použití různých spojovacích prostředků.....	60
Obr. 75: Rozložení teploty v modelu s ocelovými kolíky – řez spojovacím prostředkem	61
Obr. 76: Rozložení teploty v modelu s dřevěnými kolíky – řez spojovacím prostředkem.....	61
Obr. 77: Rozložení teploty v modelu se svorníky – řez spojovacím prostředkem.....	61
Obr. 78: Rozložení teploty v bodě TC2 při vystavení spoje různým teplotním křivkám	62
Obr. 79: Rozložení teploty v bodě TC5 při vystavení spoje různým teplotním křivkám	63
Obr. 80: Rozložení teploty v bodě TC6 při vystavení spoje různým teplotním křivkám	63
Obr. 81: Rozložení teploty v bodě TC7 při vystavení spoje různým teplotním křivkám	64
Obr. 82: Rozložení teploty v bodě TC8 a TC9 při vystavení spoje různým teplotním křivkám	64

Seznam tabulek

Tab. 1: Vstupní údaje parametrických křivek	24
Tab. 2: Výsledky numerické analýzy tloušťky modifikované vrstvy.....	29
Tab. 3: Výsledky numerické analýzy založené na materiálových vlastnostech dřeva	33

Literatura

- [1] AUDEBERT, M., D. DHIMA, M. TAAZOUNT a A. BOUCHAÏR. Experimental and numerical analysis of timber connections in tension perpendicular to grain in fire. *Fire Safety Journal* [online]. 2014, 63, 125–137. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2013.11.011
- [2] AUDEBERT, M., D. DHIMA, M. TAAZOUNT a A. BOUCHAÏR. Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire. *Engineering Structures* [online]. 2011, 33(12), 3257–3268. ISSN 0141-0296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2011.08.021
- [3] AUDEBERT, M., D. DHIMA a A. BOUCHAÏR. Proposal for a new formula to predict the fire resistance of timber connections. *Engineering Structures* [online]. 2020, 204, 110041. ISSN 0141-0296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2019.110041
- [4] AUDEBERT, M., D. DHIMA, A. BOUCHAÏR a A. FRANGI. Review of experimental data for timber connections with dowel-type fasteners under standard fire exposure. *Fire Safety Journal* [online]. 2019, 107, 217–234. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2019.102905
- [5] CÁBOVÁ, K. et al. *Ověřování modelů v požární bezpečnosti*, Praha: Czech Technical University in Prague, 2019. ISBN 978-80-01-06616-4.
- [6] Czajkowski Łukasz, Olek Wiesław a Weres JERZY. Effects of heat treatment on thermal properties of European beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2020, vol. 78, no. 3, s. 425-431. ISSN 00183768.
- [7] CZAJKOWSKI, Łukasz, Wiesław OLEK a Jerzy WERES. Effects of heat treatment on thermal properties of European beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020, vol. 78, no. 3, s. 425-431. ISSN 0018-3768.
- [8] ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [9] ČSN EN 1993-1-2 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru, 2006
- [10] ČSN EN 1995-1-2 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru, 2006
- [11] ČSN EN 338: Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti, 2016

-
- [12] DOMANSKI, T., KMIECIK, K. Load-bearing capacity of the steel-to-timber connections in fire temperature. MATEC Web Conf. [online]. 2019, 262, 09005. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201926209005
- [13] FABIAN, M. Samovznícení dřevěných konstrukcí ve vztahu k požární bezpečnosti komínů, Praha: Czech Technical University in Prague, 2020
- [14] FRANGI, Andrea a Mario FONTANA. Charring rates and temperature profiles of wood sections. Fire and Materials. 2003, vol. 27, no. 2, s. 91-102. ISSN 0308-0501.
- [15] FRIQUIN, Kathinka Leikanger. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. Fire and Materials. 2011, vol. 35, no. 5, s. 303-327. ISSN 0308-0501.
- [16] HOPKIN, D. J. et al. An effective thermal property framework for softwood in parametric design fires: Comparison of the Eurocode 5 parametric charring approach and advanced calculation models. Construction & Building Materials. 2011, vol. 25, no. 5, s. 2584-2595. ISSN 0950-0618.
- [17] HRUŠKOVÁ, K. Spoje se styčnickovými deskami s prolisovanými trny za požáru, Praha: Czech Technical University in Prague, 2017
- [18] HUČ, Sabina, Robert PEČENKO a Tomáš HOZJAN. Predicting the thickness of zero-strength layer in timber beam exposed to parametric fires. Engineering Structures. 2021, vol. 229. ISSN 0141-0296.
- [19] JANSSENS M. Thermo-physical properties for wood pyrolysis models. Pacific Timber Engineering Conference Gold Coast, Australia, 1994.
- [20] KUČERA, Petr, Rudolf KAISER, Tomáš PAVLÍK a Jiří POKORNÝ. Požární inženýrství dynamika požáru. Ostrava. 2009. ISBN 978-80-7385-074-6.
- [21] LANGE, David et al. The Reduced Cross Section Method Applied to Glulam Timber Exposed to Non-standard Fire Curves. Fire Technology. 2015, vol. 51, no. 6, s. 1311-1340. ISSN 0015-2684;1572-8099;
- [22] MENIS, A. Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) elements. Dostupné z: <https://iris.unica.it/handle/11584/266138?mode=simple.1140#.YHrCaC2w1QI>
- [23] PALMA, Pedro a Andrea FRANGI. Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicularly to the grain. Fire Safety Journal [online]. 2019, 107, 54-74. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2017.12.001
-

- [24] RACHER, P., K. LAPLANCHE, D. DHIMA a A. BOUCHAÏR. Thermo-mechanical analysis of the fire performance of dowelled timber connection. *Engineering Structures* [online]. 2010, 32(4), 1148–1157. ISSN 0141-0296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2009.12.041
- [25] SAMAKÉ, Abdoulaye, Mustapha TAAZOUNT, Philippe AUDEBERT a Patricio PALMILI. Thermo-hydric transfer within timber connections under fire exposure: Experimental and numerical investigations. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2014, 63(1), 254–265. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.10.049
- [26] SCHMID, Joachim et al. The Reduced Cross-Section Method for Evaluation of the Fire Resistance of Timber Members: Discussion and Determination of the Zero-Strength Layer. *Fire Technology*. 2014;2015;, vol. 51, no. 6, s. 1285-1309. ISSN 0015-2684;1572-8099;.
- [27] STŘÍLKA, Jan. Rychlost odhořívání dřeva [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/110119>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [28] ZEMAN, J. Modelování spoje dřevěných konstrukcí s vloženou ocelovou deskou za požáru. 2021. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební