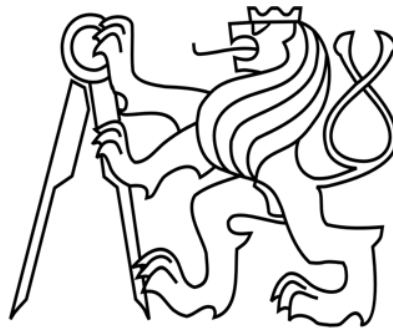


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**TEPLOTNÍ ANALÝZA STYKU PREFABRIKOVANÝCH  
PŘEDPJATÝCH TT PANELŮ VYSTAVENÝCH POŽÁRU**

**THERMAL ANALYSIS OF A CONNECTION OF PRECAST  
PRESTRESSED DOUBLE T SHAPED PANEL EXPOSED TO FIRE**

Autor práce: Bc. Václav Kloida

Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

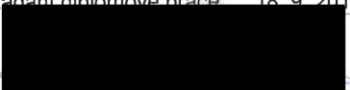
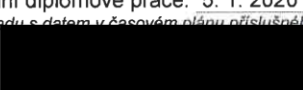
2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

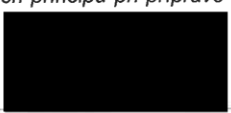
Příjmení: Kloida	Jméno: Václav	Osobní číslo: 438150
Zadávající katedra: K133		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Teplotní analýza styku prefabrikovaných předpjatých TT panelů vystavených požáru	
Název diplomové práce anglicky: Thermal Analysis of a Connection of Precast Prestressed Double T Shaped Panel Exposed to Fire	
Pokyny pro vypracování: Rešerše literatury. Popis materiálových charakteristik. Teplotní analýza svařovaného spoje TT panelu. Příprava, realizace a vyhodnocení požárního experimentu. Vyhodnocení. Závěr.	
Seznam doporučené literatury: ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru R. Štefan. Transport Processes in Concrete at High Temperatures. Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling. PhD thesis, CTU in Prague, 2015. A. H. GUSTAFERRO and L. D. MARTIN. Design for fire resistance of precast prestressed concrete. 2nd ed. Chicago, Ill: Prestressed Concrete Institute, 1989. ISBN 978-0-937040-41-6.	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 18. 9. 2019	Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 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“.*

 Podpis studenta(ky)
18. 9. 2019 Datum převzetí zadání

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

.....

Podpis autora

Bc. Václav Kloida

**Poděkování:**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za ochotu při konzultacích, věcné připomínky a odborné vedení.

---

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratek</b>	<b>III</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2 Současný stav poznání</b>	<b>6</b>
2.1 Požární bezpečnost staveb	6
2.2 Požární odolnost stavebních konstrukcí	7
2.3 Mechanické zatížení při požáru	10
2.4 Chování konstrukcí za požáru	11
2.5 Montážní spáry mezi konstrukčními prvky	12
<b>3 Materiály za zvýšené teploty</b>	<b>17</b>
3.1 Beton	17
3.1.1 Mechanické vlastnosti betonu	18
3.1.2 Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu	21
3.2 Betonářská výztuž	25
3.2.1 Mechanické vlastnosti výztuže	25
3.3 Ocel	27
3.3.1 Mechanické vlastnosti oceli	28
3.3.2 Teplotní a fyzikální vlastnosti oceli	30
3.4 Minerální izolace	34
3.4.1 Teplotní a fyzikální vlastnosti minerální izolace	35
<b>4 Teplotní analýza</b>	<b>37</b>
4.1 Nominální teplotní křivky	41
4.2 Sdílení tepla	43
4.3 Tepelný tok	44
<b>5 Teplotní analýza styku střešních panelů</b>	<b>46</b>
5.1 Střešní panel	46
5.2 Numerický model	49
5.2.1 Numerický model ANSYS	50
5.2.2 Numerický model TempAnalysis	54
5.2.3 Vyhodnocení	60
5.3 Požární experiment	63
5.3.1 Zkušební pec	64
5.3.2 Zkouška požární odolnosti	65
5.3.3 Vyhodnocení	70
5.4 Porovnání numerických modelů s požárním experimentem	73
<b>6 Závěr</b>	<b>75</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>76</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>79</b>
<b>Literatura</b>	<b>80</b>

---

## Abstrakt

*Diplomová práce je zaměřena na teplotní analýzu svařovaného spoje a montážní spáry mezi dvěma střešními panely. Tyto spoje jsou umístěny ve styčné spáře mezi panely a zajišťují vodorovnou tuhost střešní tabule. Vzhledem k tomu, že ocelový spoj je přímo vystaven účinkům požáru a zároveň zajišťuje prostorovou tuhost objektu, jedná se o nejslabší článek celé konstrukce. V práci je rovněž uvedena problematika prefabrikovaných konstrukcí a spár, které jsou mezi jednotlivými prvky. Práce se dále zabývá tvorbou numerických modelů, které simulují zatížení konstrukce normovým požárem. Numerické modely byly vytvořeny v programech ANSYS a TempAnalysis pro dvě varianty spojů – jedna varianta spoje jako nechráněná a druhá varianta s izolací z minerální vlny. V diplomové práci je řešena experimentální analýza ocelového spoje, příprava požárního experimentu a následné vyhodnocení. Provedený experiment ověřuje přesnost numerických modelů. Výsledkem numerických modelů je rozložení teploty po průřezu pro různé časové intervaly. Cílem diplomové práce je vymodelovat doposud používané řešení ocelového spoje a zhodnotit, jak jej ovlivňuje požár a zda bude při budoucí realizaci nutné tento spoj požárně chránit.*

### Klíčová slova

*Svařovaný spoj; teplotní analýza; numerický model; TempAnalysis; ANSYS; prefabrikované konstrukce; spára; těsnění spár*

## Abstract

*This master's thesis is focused on the thermal analysis of a welded connection and the assembly joint between two roof panels. The welded connection is placed in the joint and provides the horizontal stiffness of the roof board. In view on the fact that it is exposed directly to fire, the connection is the weakest element as it provides the spacial stiffness of the whole object. The thesis also deals with issues of precast structures and the joints between them. Furthermore, the master's thesis is focused on making two numerical models which simulate the load by a standard fire. The finite element models were established in ANSYS software and TempAnalysis software for two types of connection exposed to fire, first connection insulated by mineral wool insulation and the second one without insulation. This work describes an experimental analysis of a steel connection, preparation of the fire experiment and the final evaluation. The numerical models and their accuracy is compared and validated with the experiment. The output of the finite element models is a temperature distribution over the cross-section in the different time intervals. This thesis aims to model the joint used to connect panels and evaluate the impact of the fire, as well as to determine whether it will be necessary to protect this connection in the future implementation.*

### Keywords

*Welded connection; thermal analysis; numerical model; TempAnalysis; ANSYS; precast concrete construction; joint; joint seal*

---

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Symboly použité v textu

$f_c$	Charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech při pokojové teplotě	MPa
$f_{c,\theta}$	Charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku při teplotě $\theta$	MPa
$f_y$	Mez kluzu oceli při pokojové teplotě $\theta$	MPa
$f_{y,\theta}$	Mez kluzu oceli při teplotě $\theta$	MPa
$\dot{h}_{net}$	Čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$\dot{h}_{net,c}$	Čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem proudění	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$\dot{h}_{net,r}$	Čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem sálání	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$k_\theta$	Redukční součinitel pevnostních nebo deformačních vlastností v závislosti na teplotě materiálu $\theta$	-
$\Phi$	Polohový faktor	-
$\varepsilon_m$	Emisivita povrchu	-
$\varepsilon_f$	Emisivita požáru	-
$\sigma$	Napětí, Stephanova-Boltzmannova konstanta	Pa, W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$\theta_r$	Sálavá teplota v okolí prvku	°C
$\theta_m$	Povrchová teplota prvku	°C
$\theta_g$	Teplota plynů v požárním úseku	°C
$\theta_{cr}$	Kritická teplota prvku	°C
$\frac{\Delta l}{l}$	Poměrné prodloužení od teploty	-
E	Modul pružnosti	MPa
c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
$\rho$	Objemová hmotnost	kg/m <sup>3</sup>
$\Omega$	Výpočtová oblast	-
$\varepsilon$	Poměrné přetvoření materiálu	-
$\mu_0$	Stupeň využití	-
$\theta$	Teplota	°C
u	Vlhkost betonu	%

---

**Zkratky použité v textu**

MKP	Metoda konečných prvků
SHZ	Stabilní hasící zařízení
ZOKT	Zařízení pro odvod kouře a tepla
EPS	Elektrická požární signalizace
CFD	Computational fluid dynamics
2D	Dvoudimenzionální



# 1 Úvod

Při požárech objektů nastávají podmínky, které ohrožují zdraví a životy lidí nebo zvířat. Průběh požáru také doprovází vysoká teplota, která má negativní vlivy na spolehlivost stavebních konstrukcí. Se vzrůstající teplotou degradují mechanické vlastnosti stavebních materiálů, a navíc vznikají přídatná namáhání, která mohou být pro konstrukce fatální. Proto je velice důležité věnovat zvýšenou pozornost stavebním konstrukcím z hlediska požární bezpečnosti.

Tato diplomová práce je zaměřena na teplotní analýzu styku dvou střešních prefabrikovaných předpjatých TT panelů, mezi kterými je umístěn typický ocelový spoj, kterým jsou tyto panely mezi sebou propojeny. Soustava těchto spojů vytváří spolupůsobení mezi jednotlivými panely, které pak působí jako jeden tuhý celek. V práci je zkoumán vliv vysoké teploty, které je spoj v případě požáru vystaven. Teplotní analýza je provedena pomocí numerických modelů metodou konečných prvků, které byly následně ověřeny pomocí experimentu v akreditované požární laboratoři PAVUS, a.s. Výsledkem analýzy je rozložení teploty po průřezu konstrukce v čase, které je porovnáno s výsledky experimentu. Na základě výsledků bude možné prohlásit, zda budou materiálové charakteristiky použitých materiálů ovlivněny natolik, že by se konstrukce při požáru mohla stát nespolehlivou.

V diplomové práci je rovněž popsána problematika prefabrikovaných konstrukcí a materiálů, které se běžně používají. Prefabrikované konstrukce mají z požárního hlediska nevýhodu v tom, že jsou montovány přímo na stavbě, a tudíž mezi jednotlivými dílci vznikají spáry. Tyto spáry narušují celistvost a kompaktnost konstrukce jako celku a mohou se tak stát nejcitlivějším místem.

## 2 Současný stav poznání

### 2.1 Požární bezpečnost staveb

Požáry stavebních objektů způsobují ztráty na majetku a představují riziko pro zdraví a životy osob, popř. zvířat. Požární bezpečnost staveb je jedním ze základních nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 305/2011 [1], přílohy I. Na stavby jsou z hlediska požární bezpečnosti kladeny požadavky, které mimo jiné určují, že stavba musí být navržena a provedena takovým způsobem, aby v případě požáru:

- a) byla po určenou dobu zachována nosnost konstrukce;
- b) byl uvnitř stavby omezen vznik kouře a šíření ohně a kouře;
- c) bylo omezeno šíření požáru na sousední stavby;
- d) obyvatelé mohli stavbu opustit nebo aby mohli být jinými prostředky zachráněni;
- e) byla brána v úvahu bezpečnost záchranných jednotek [1].

Z výše uvedených požadavků vyplývá, že požární bezpečnost staveb tvoří nedílnou část navrhování stavebních konstrukcí jak v České republice, tak také v zemích Evropské unie. Požární bezpečnost staveb zahrnuje zejména požadavky na dispoziční řešení staveb a na vlastnosti konstrukcí, zabudovaných stavebních výrobků, technických zařízení budov a požárně bezpečnostních zařízení.

## 2.2 Požární odolnost stavebních konstrukcí

Požární odolnost je doba, po kterou jsou stavební konstrukce, případně uzávěry, schopny odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by byla ohrožena jejich funkce. Podle evropské normy [2] se klasifikační doby požární odolnosti vyjadřují v minutách, kdy jsou použity hodnoty 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, případně 360 minut. Podle kmenových norem požární bezpečnosti staveb v České republice se používají časy 15, 30, 45, 60, 90, 120 a 180 minut.

Pro identifikaci požadavků na stavební prvky se používají následující charakteristiky, takzvané mezní stavy. Mezi nejzákladnější mezní stavy podle [2] patří:

- **R – Nosnost:** schopnost prvku konstrukce odolávat po určitou dobu působení účinků požáru na jeden nebo více povrchů při daném mechanickém zatížení, bez jakékoliv ztráty konstrukční stability.
- **E – Celistvost:** schopnost konstrukčního prvku s dělicí funkcí odolávat působení požáru pouze u jedné strany, bez přenosu požáru na neohřívanou stranu v důsledku průniku plamenů nebo horkých plynů. Ty mohou způsobit vznícení neohřívaného povrchu, nebo jakéhokoliv materiálu ležícího v jeho těsné blízkosti.
- **I – Izolace:** schopnost konstrukčního prvku odolávat vystavení požáru pouze z jedné strany, bez přenosu požáru v důsledku významného přestupu tepla z ohřívané strany na neohřívanou stranu. Přestup tepla musí být omezen tak, aby se nevznítla ani neohřívaná strana, ani jakýkoliv materiál v její blízkosti. Prvek musí rovněž vytvářet tepelnou bariéru, schopnou chránit osoby v její blízkosti.
- **W – Radiace:** schopnost konstrukčního prvku odolávat vystavení požáru pouze z jedné strany tak, aby se snížila pravděpodobnost přenosu požáru následkem prostupu značného sálavého tepla jak prvkem, tak i z neohřívaného povrchu prvku na sousední materiály. Prvek má také chránit osoby v jeho blízkosti. Prvek vyhovující kritériu I, se považuje jako vyhovující i požadavku W po stejnou dobu. Kritériem pro mezní stav radiace je hustota tepelného toku. Pro tyto prvky se klasifikace stanoví jako doba, po níž maximální hodnota radiace, měření podle zkušební normy, nepřesáhne  $15 \text{ kW/m}^2$ .
- **M – Mechanická odolnost:** je schopnost prvku odolat rázu, představujícímu případ, kdy konstrukční porušení jiného dílu při požáru způsobí náraz na posuzovaný prvek. Prvek se vystaví rázu předem stanové síly krátce po skončení požadované klasifikační doby R, E a/nebo I. Prvek musí odolat rázu bez narušení vlastností R, E a/nebo I, aby měl klasifikaci doplněnou M.
- **S – Kouřotěsnost:** je schopnost prvku snížit nebo vyloučit pronikání plynů nebo kouře z jedné strany prvku na druhou.
- **C – Samozavírání:** je schopnost otevřených dveří nebo otevřeného okna se úplně uzavřít do jejich rámců a aktivovat zavírací zařízení, které může být jejich výbavou, bez lidského

zásahu pomocí zdroje energie nebo primárním elektrickým zdrojem jištěným záložním zdrojem pro případ výpadku energie.

Příklad požadované požární odolnosti konstrukce může vypadat takto:

**REI 90** – konstrukce si zachová nosnou a požárně dělicí funkci po dobu alespoň 90 minut.

Výsledky zkoušek a rozšířené aplikace se vždy zaokrouhlují na nejbližší nižší třídu. Při kombinaci charakteristik se uváděná doba vztahuje vždy k charakteristice s nejkratší dobou.

Z výše uvedeného vyplývá, že základním předpokladem splnění požadované odolnosti je následující vztah:

$$\text{požární odolnost konstrukce} \geq \text{požadovaná požární odolnost konstrukce.} \quad (1)$$

Při vystavení požáru musí prvky splňovat kritéria R, E, I takto:

- pouze nosnost R;
- pouze dělicí funkce EI;
- nosnost a dělicí funkce REI.

Požární odolnost konstrukce se dá podle [3] ověřit z hlediska tří základních podmínek spolehlivosti:

- Z hlediska času

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,req}, \quad (2)$$

kde  $t_{fi,d}$  je návrhová doba požární odolnosti a  $t_{fi,req}$  je požadovaná doba požární odolnosti. Projektanty požární bezpečnosti staveb je upřednostňováno kritérium spolehlivosti z hlediska času, protože kodex norem požární bezpečnosti v České republice udává požadavky na minimální čas.

- Z hlediska teploty

$$\theta_d \leq \theta_{crit}, \quad (3)$$

kde je  $\theta_d$  návrhová hodnota teploty materiálu a  $\theta_{crit}$  návrhová hodnota kritické teploty materiálu. Kritérium z hlediska teploty může být použito obzvlášť pro mezní stav izolace, kde rozhoduje teplota na neexponované straně konstrukce. Na základě kritéria teploty je také možné posuzovat některé konstrukce, například porovnání skutečné teploty konstrukce s kritickou teplotou konstrukce. Tento způsob návrhu je uplatněn obzvlášť o nechráněných, nebo chráněných ocelových konstrukcích.

- Z hlediska únosnosti

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}, \quad (4)$$

kde  $R_{fi,d,t}$  je návrhová hodnota únosnosti prvku při požáru v čase  $t$  a  $E_{fi,d,t}$  je návrhová hodnota příslušných účinků zatížení při požární situaci v čase  $t$ . Tyto hodnoty mohou být vyjádřeny například jako normálové síly, posouvající síly nebo ohybové momenty.

## 2.3 Mechanické zatížení při požáru

Účinek zatížení se v případě požáru stanoví podle obecného pravidla pro mimořádnou kombinaci zatížení podle [4] jako

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}); Q_{k,1}; \psi_{2,1}; Q_{k,i}\} j \geq 1; i > 1, \quad (5)$$

kde je  $G_{k,j}$  charakteristická hodnota  $j$ -tého stálého zatížení,  $P$  je reprezentativní hodnota zatížení od předpětí,  $A_d$  je návrhová hodnota mimořádného (požárního) zatížení,  $\psi_1$  je součinitel pro častou hodnotu proměnného zatížení,  $\psi_2$  je součinitel pro kvazistálou hodnotu proměnného zatížení,  $Q_{k,1}$  je charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení,  $Q_{k,i}$  je charakteristická hodnota  $i$ -tého proměnného zatížení. Doporučené hodnoty součinitelů  $\psi_1$  jsou uvedeny v [4].

Při požáru představuje  $A_d$  návrhovou hodnotu mimořádného zatížení v důsledku teplotního namáhání (rovnoměrné, nebo nerovnoměrné ohřátí konstrukce). V některých případech lze účinky mimořádného požárního zatížení zanedbat, např. staticky určité konstrukce nebo konstrukce, kde je zanedbání nepřímého požárního zatížení konzervativní. Při vlivu nepřímých zatížení od požáru na nosnou způsobilost konstrukce se mají brát v úvahu vyvolaná teplotní roztažení prvků, např. sloupy ve vícepodlažních rámových konstrukcích, rozdílná přetvoření staticky neurčitých konstrukcí apod. V případě zanedbání účinku mimořádného zatížení lze účinky zatížení zjednodušeně stanovit pouze pro čas  $t = 0$ , kde  $A_d = 0$ , a tyto účinky považovat za neměnné po celou dobu působení požáru [3]. V tomto případě platí

$$E_{fi,d,t} \cong E_{fi,d}. \quad (6)$$

Výpočet se zjednoduší tím, že konstantní účinky zatížení při požáru  $E_{fi,d}$  (nezávislé na čase) se stanoví redukcí odpovídajících účinků, které byly vypočítány pro pokojovou teplotu následovně

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d, \quad (7)$$

kde  $E_d$  je návrhová hodnota příslušných účinků zatížení za běžné teploty pro základní kombinaci podle [4].

V případě, že byla při návrhu za běžné teploty použita základní kombinace zatížení podle výrazu 6.10 [4], stanoví se redukční součinitel jako

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d}}{E_d} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}. \quad (8)$$

Analogicky se určí pro výrazy 6.10a a 6.10b podle [4]. Výše uvedená rovnice platí za předpokladu, že konstrukční prvek přenáší pouze jedno stálé zatížení  $G_k$  a jedno (hlavní) proměnné zatížení  $Q_{k,1}$ .

Konzervativně lze uvažovat redukční součinitel  $\eta_{fi}$ :

- pro betonové konstrukce  $\eta_{fi} = 0,7$ , podle ČSN EN 1992-1-2;
- pro zděné konstrukce  $\eta_{fi} = 0,65$ , podle ČSN EN 1996-1-2;
- pro ocelové a ocelobetonové konstrukce  $\eta_{fi} = 0,65$ , podle ČSN EN 1993-1-2, s výjimkou skladů, kde se má uvažovat  $\eta_{fi} = 0,7$ ;
- pro dřevěné konstrukce  $\eta_{fi} = 0,65$ , podle ČSN EN 1995-1-2;
- pro hliníkové konstrukce  $\eta_{fi} = 0,65$ , podle ČSN EN 1999-1-2.

## 2.4 Chování konstrukcí za požáru

Zvýšená teplota při požáru obecně ovlivňuje mechanicko-fyzikální vlastnosti materiálů. Jedná se především o tepelnou vodivost, objemovou hmotnost, měrnou tepelnou kapacitu, teplotní roztažnost. Jedná se ale například také o modul pružnosti – důsledkem vysoké teploty dochází k postupné ztrátě stability a pevnosti (obzvláště u ocelových konstrukcí). Z hlediska stavebních konstrukcí se za požární situace posuzuje celá řada mezních stavů (viz kap. 2.2). Aby konstrukce odolávaly veškerým účinkům požáru, je nutné tyto mezní stavy ověřit, a to několika možnými způsoby. Toto ověření je možné provádět buď zkouškou v požární zkušebně, porovnáním výsledků s již předchozími zkouškami nebo výpočtem požární odolnosti stavební konstrukce [5]. Při požáru nastává nerovnoměrné rozložení teploty, kterým je mimo jiné ovlivněn průběh vnitřních sil. Vlivem teplotní roztažnosti je bráněno volnému protažení konstrukční části chladnější nebo tužší části konstrukce [6]. Teplotní roztažnost materiálu vyvolává osově síly, přičemž mechanická odolnost materiálu s rostoucí teplotou klesá. Zvýšená teplota tak ovlivňuje nejen jednotlivé konstrukční části, ale také konstrukce jako celek [7].

Chování stavebních konstrukcí za požáru je podle [5] nejvíce ovlivněno následujícími faktory:

- Geometrie prvku (průřez, osová vzdálenost výztuže od okrajů, štíhlost, hrany);
- počet stran vystavených požáru (z jedné nebo z více stran);
- materiál (ocel, beton, dřevo atd.);
- konstrukční systém (staticky určitá konstrukce, staticky neurčitá konstrukce);
- konstrukční detaily (podpory, spoje, spáry);
- stupeň využití prvku;
- dodatečná ochrana konstrukce (omítka, obklad, nástřík).

## 2.5 Montážní spáry mezi konstrukčními prvky

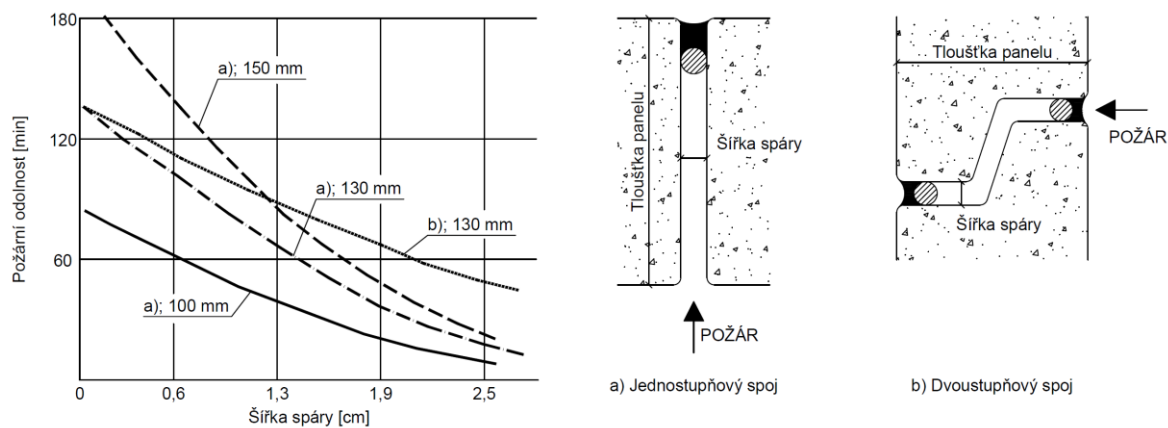
Betonové konstrukce mají z hlediska požární bezpečnosti staveb velmi dobrou odolnost proti vysokým teplotám. Na rozdíl od jiných materiálových variant jsou betonové konstrukce méně citlivé na vysoké teploty, které vznikají za požáru. Z hlediska požárně dělicí funkce mají největší výhodu monolitické konstrukce, protože v nich nevznikají žádné spáry.

Výše zmíněnou výhodu ovšem postrádají prefabrikované konstrukční systémy, jelikož se jedná o soustavu prvků, které jsou smontovány až dodatečně při realizaci [5]. Prostřednictvím styků je z jednotlivých prefabrikovaných dílců vytvořen prostorově působící nosný systém budovy. Únosnost a tuhost styků mají zásadní význam pro vzájemné spolupůsobení prefabrikovaných dílců, redistribuci namáhání mezi jednotlivými prvky systému a zajištění tuhosti a stability celého systému [8]. Mezi jednotlivými dílci vznikají spáry, které mohou být z hlediska požární bezpečnosti konstrukce nejslabším místem. Podle článku 9.7.1 [9] nesmí být požární odolnost požárně dělicích konstrukcí snížena nebo porušena jakýmkoliv zmenšením tloušťky konstrukce či jiným oslabením (např. spáry, styky) vedoucím ke snížení požadované požární odolnosti.

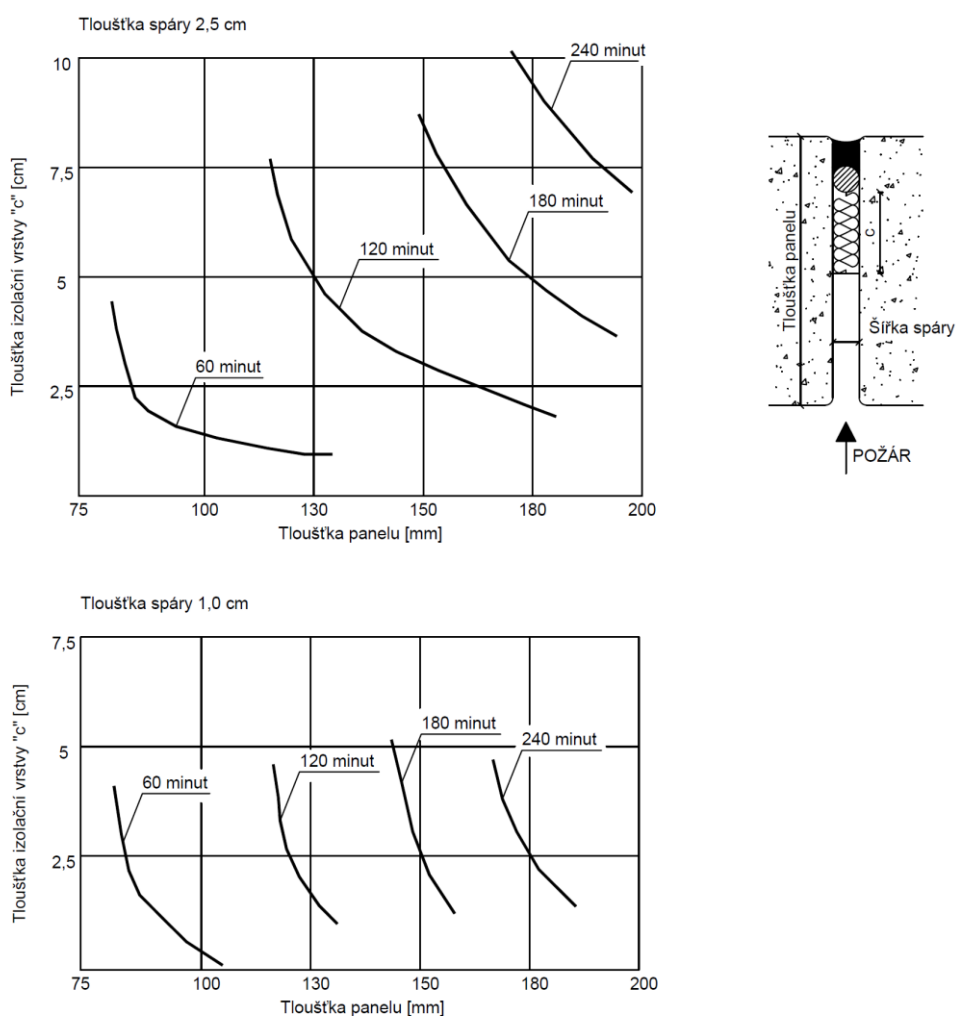
Spára je lineární prázdný prostor s poměrem délky k šířce nejméně 10:1 mezi dvěma nebo více protilehlými konstrukčními prvky [10]. Ve spáře může být umístěn spoj nebo styk konstrukčních prvků. Na spáru se má podle [11] pohlížet stejně jako volný prostor, pokud není vyplněna výplňovým materiálem. Jako výplňový materiál se nejčastěji používá zálivka na cementové bázi, tepelně izolační materiál nebo těsnící šňůra (tkaninová, pěnová) + tmel. Volná spára také může být vyplněna systémovou ucpávkou. V případě, že se spára nachází v obvodových konstrukcích pod úrovní terénu, nemusí být požární odolnost spáry posuzována. Pokud jsou na spáru kladeny požadavky požární odolnosti, musí být podle [12] čl. 6.3.2 zajištěna požární odolnost shodná s požadovanou dobou požární odolnosti konstrukce, v níž se vyskytuje.

Požární zkoušky prefabrikovaných panelů ukázaly, že požární odolnost konstrukce je ovlivněna typem styku, materiálem styku, šířkou spáry a tloušťkou prefabrikovaného prvku [13] (viz Obrázek 1 a Obrázek 2). Zkoušky rovněž potvrdily, že pokud se spára vyplní dostatečnou tloušťkou tepelně izolačního materiálu, dá se požadované požární odolnosti dosáhnout [11].





Obrázek 1 – Požární odolnost jednostupňového a dvoustupňového styku mezi panely podle [13]



Obrázek 2 – Požární odolnost jednostupňového styku chráněného tepelnou izolací podle [13]

Těsnění spáry se samostatně posuzuje pouze v případech, kdy spáry nebyly součástí zkoušky požární odolnosti požárně dělících konstrukcí a kde se jedná o průmyslově vyráběné konstrukce (např. panelové stěny nebo stropy), nebo jsou spáry tvořeny na místě u vzorově specifikovaných

a opakujících se konstrukčních sestav (např. u stěny z deskových výrobků nebo z jiných dílců). V takovém případě se jedná o těsnění spáry, které se hodnotí podle [2] následovně:

- a) požární odolnost EI, jsou-li těsněny spáry v požárně dělících konstrukcích EI, nebo;
- b) požární odolnost E, jsou-li těsněny spáry v požárně dělících konstrukcích EW nebo E.

Spáry se v budovách vyskytují z důvodů:

- přípustných rozměrových tolerancí mezi dvěma nebo více konstrukčními prvky;
- řešení postihující různé pohyby vyvolané teplotními rozdíly, seismickou činností a větrem;
- důsledku nevhodného řešení, nepřesné montáže, oprav nebo poškození budovy [10].

Účelem zkoušek je podle zkušební normy stanovit:

- účinek těsnění spár na celistvost a izolační schopnost konstrukce;
- celistvost a izolační schopnost těsnění spár;
- účinek pohybů v podpěrné konstrukci na požární vlastnosti těsnění spár [10].

Podle [12] se spáry dělí na horizontální nebo vertikální. Označení spár je patrné z tabulky níže.

Tabulka 1 – Značení spár podle [2]

Zkušební podmínky	Označení
Orientace vzorku - vodorovná podpěrná konstrukce - svislá podpěrná konstrukce – svislá spára - svislá podpěrná konstrukce – vodorovná spára	H V T
Schopnost pohybu - bez pohybu - vyvození pohybu (v %)	X M000
Typ spojů - průmyslové vyráběný - tvořený na místě - oba případy	M F B
Rozsah šířky spáry (v mm)	W w1 až w2 <sup>1)</sup>
<sup>1)</sup> w1 je nižší mezní šířka a w2 je vyšší mezní šířka	

Klasifikace zjištěné třídy požární odolnosti může vypadat např. EI 30 – H – M 100 – B – W30 až W 90.

V současné době se provádí požární zkoušky spár podle evropské normy [10] a účelem těchto zkoušek je stanovit účinek těsnění spár na:

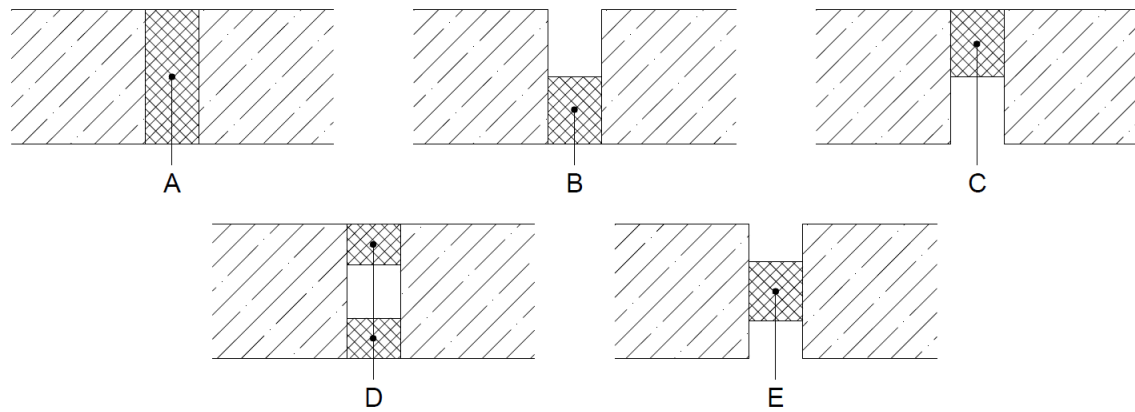
- celistvost a izolační schopnost konstrukce;
- celistvost a izolační schopnost těsnění spár;
- účinek pohybů v podpůrné konstrukci na požární vlastnosti těsnění spár.

Výsledky těchto zkoušek jsou jedním z faktorů při posuzování požárních vlastností spár.

Těsnění spár je podle [12] považováno za vyhovující, pokud jsou vyplněna shodným materiálem jako jiné spáry v konstrukci s vyhovující požární odolností (např. zdící malta u napojení zděné konstrukce na železobetonový sloup) nebo u konstrukcí druhu DP1 při splnění následujících požadavků [12]:


- Jedná se o spáru zděné konstrukce (keramické cihly, pórobeton) nebo betonové konstrukce stěny (vč. kombinací) s tloušťkou minimálně 250 mm (včetně omítky).
- Konstrukce stěny je omítnuta vápenocementovou omítkou tloušťky minimálně 15 mm, případně sádrovou omítkou tloušťky minimálně 10 mm, pokud je omítka pouze z jedné strany, snižuje se dále uvedená požární odolnost na polovinu.
- Celková tloušťka spáry je maximálně 25 mm a tato tloušťka je zcela vyplněna materiálem třídy reakce na oheň A1, nebo A2 (zdící maltou, minerální tepelnou izolací apod.), přičemž v případě vyplnění zdící maltou je umožněno v šířce maximálně 5 mm vložit např. zvukově izolační materiál třídy reakce na oheň alespoň E.
- Jedná se o některou z následně uvedených kombinací tloušťky stěny a požadované požární odolnosti:
  - Tloušťka stěny bez omítky 200 mm a požadovaná PO je maximálně 120 minut, nebo;
  - tloušťka stěny bez omítky 150 mm a požadovaná PO je maximálně 90 minut, nebo;
  - tloušťka stěny bez omítky 100 mm a požadovaná PO je maximálně 60 minut, nebo;
  - tloušťka stěny bez omítky 80 mm a požadovaná PO je maximálně 30 minut [12].

Těsnění spáry musí mít při zkoušce podle [10] ohřívanou délku nejméně 900 mm a musí zde být vytvořena typická spára při minimálním tlaku 15 Pa. Těsnění spár lze ve spáře uspořádat následujícími způsoby, viz Obrázek 3.



**LEGENDA:**

- A TĚSNĚNÍ VYPLŇUJE CELOU SPÁRY
- B TĚSNĚNÍ NA SPODU SPÁRY
- C TĚSNĚNÍ NA VRCHU SPÁRY
- D TĚSNĚNÍ TVOŘÍ JEDNU NEBO VÍCE VZDUCHOVÝCH MEZER
- E TĚSNĚNÍ VE STŘEDU SPÁRY

 TĚSNĚNÍ VE STŘEDU SPÁRY

*Obrázek 3 – Příklad uspořádání spáry podle [10]*

### 3 Materiály za zvýšené teploty

Vlivem vysokých teplot dochází ke změnám mechanicko-fyzikálních vlastností stavebních materiálů. Tyto změny jsou současně spojeny i s poklesem únosnosti, porušením celistvosti, sdílením tepla atd. U většiny materiálů se s rostoucí teplotou mění hustota, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. S teplotou se vlivem teplotní roztažnosti rovněž mění délkové (objemové) rozměry ohříváných těles. Většina těles se při zahřívání rozpíná, což může u stavebních konstrukcí (zejména ocelových) vyvolat změnu průběhu vnitřních sil (viz kap. 2.4). Změna hustoty je dána především úbytkem vody obsažené v materiálu (volné, nebo chemicky vázané), dále například rozkladem organických látek nebo dekarbonizací [14]. Jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu při vysokých teplotách je tepelná vodivost. Hodnota tepelné vodivosti udává, jak dobře je materiál schopen vést teplo. Proto je obzvláště důležité, aby byly hodnoty stanoveny v závislosti na teplotě, jelikož tepelná vodivost se s rostoucí teplotou obvykle mění. Měrná tepelná kapacita je udávána jako množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 kg látky o 1 teplotní stupeň. Rozsah měrné tepelné kapacity během zvyšující se teploty obvykle není velký, a pokud nejsou k dispozici hodnoty závislé na teplotě, lze použít konstantní hodnotu [14].

V následujících kapitolách jsou uvedeny vlastnosti základních stavebních materiálů za zvýšených teplot vyvolaných požárem.

#### 3.1 Beton

Ačkoliv je beton materiál nehořlavý, v případě vystavení účinkům požáru se jeho pevnost zmenšuje a je narušena celistvost a soudržnost betonu. Vlivem požáru dochází postupně v betonu k fyzikálním i chemickým změnám – na rozsah těchto změn mají vliv jak vnitřní faktory (kvalita betonu), tak také vnější faktory (okolní teplota, rychlost nárůstu teploty, délka teplotního namáhání, způsob přestupu tepla apod.).

Při teplotách okolo 100 °C se z betonu začíná odpařovat voda. Tento děj dočasně způsobuje zvyšování pevnosti betonu a je ovlivněn strukturou, která se odvíjí od druhu betonu (obyčejný, vysokohodnotný, lehký apod.). Pokud je struktura betonu více pórovitá, tím méně je bráněno unikající vodě a vnitřní napětí nemusí mít tak výrazný růst.

Beton vystavený teplotám více než 300 °C bývá zpravidla porušen trhlinkami na ohříváném povrchu. Vlivem prudké expanze vodní páry může dojít k odprýsknutí vrstvy betonu, která je vystavena požáru (tzv. explozivní odprýskávání). Toto odprýsknutí je nepravděpodobné, pokud má beton vlhkost menší než 3 % hmotnosti.

Při teplotách v rozmezí 400–600 °C se z betonu začíná uvolňovat chemicky vázaná voda, vlivem rozkladu hydroxidu vápenatého ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) na oxid vápenatý ( $\text{CaO}$ ) a vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Touto změnou se významně mění pevnost a ostatní fyzikální vlastnosti betonu.

Dosáhne-li teplota betonu 700 °C, dochází k teplotnímu rozkladu vápence (CaCO<sub>3</sub>) na oxid vápenatý (CaO) a oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>).

Při dosažení teploty více než 800 °C dochází k rozkladu hydraulického spojení mezi složkami betonu, slinutím tak vznikne vazba keramická.

Při teplotě betonu přibližně 1200 °C dochází k tání materiálu [15].

### 3.1.1 Mechanické vlastnosti betonu

Pevnostní a deformační vlastnosti jednoose tlačeneho betonu při zvýšené teplotě lze stanovit z pracovního diagramu, viz Obrázek 4. Tento diagram je charakterizován pevností betonu v tlaku  $f_{c,\theta}$  a přetvořením  $\varepsilon_{c1,\theta}$  odpovídajícím  $f_{c,\theta}$ . Hodnoty těchto parametrů jsou patrné z Obrázku 5 a jsou uvedeny v Tabulce 2.

Vzestupnou větev pracovního diagramu ( $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta}$ ) lze popsat vztahem

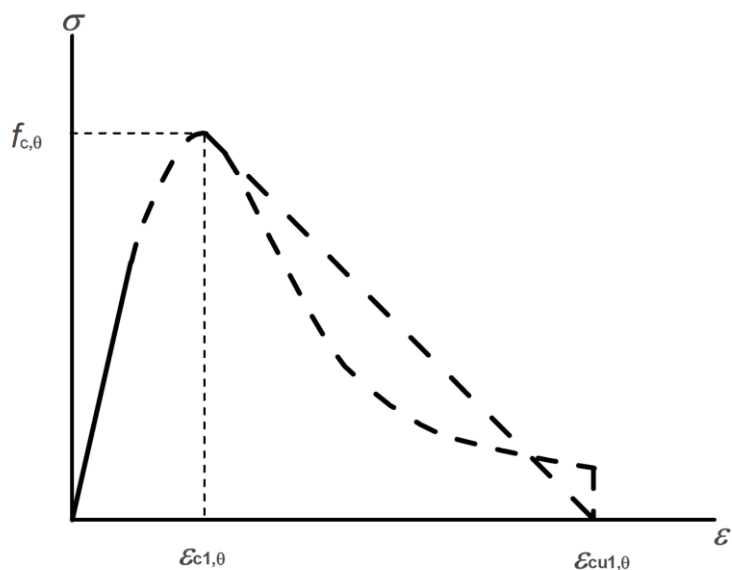
$$\sigma_c(\varepsilon_c, \theta) = \frac{3 \cdot \varepsilon_c \cdot f_{ck,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}, \quad (9)$$

kde  $\sigma_c$  je napětí v betonu,  $\varepsilon_c$  je poměrné přetvoření betonu (absolutní hodnota),  $f_{ck,\theta}$  je charakteristická pevnost betonu v tlaku,  $\varepsilon_{c1,\theta}$  je poměrné přetvoření betonu odpovídající napětí  $f_{ck,\theta}$  a  $\varepsilon_{cu1,\theta}$  je mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku. Hodnoty parametrů  $f_{ck,\theta}$ ,  $\varepsilon_{c1,\theta}$  a  $\varepsilon_{cu1,\theta}$  jsou teplotně závislé a jejich hodnoty lze určit z Tabulky 2. Tyto hodnoty platí pro obyčejný beton ( $\rho = 2000\text{--}2600 \text{ kg/m}^3$ ) s křemičitým, nebo vápencovým kamenivem.

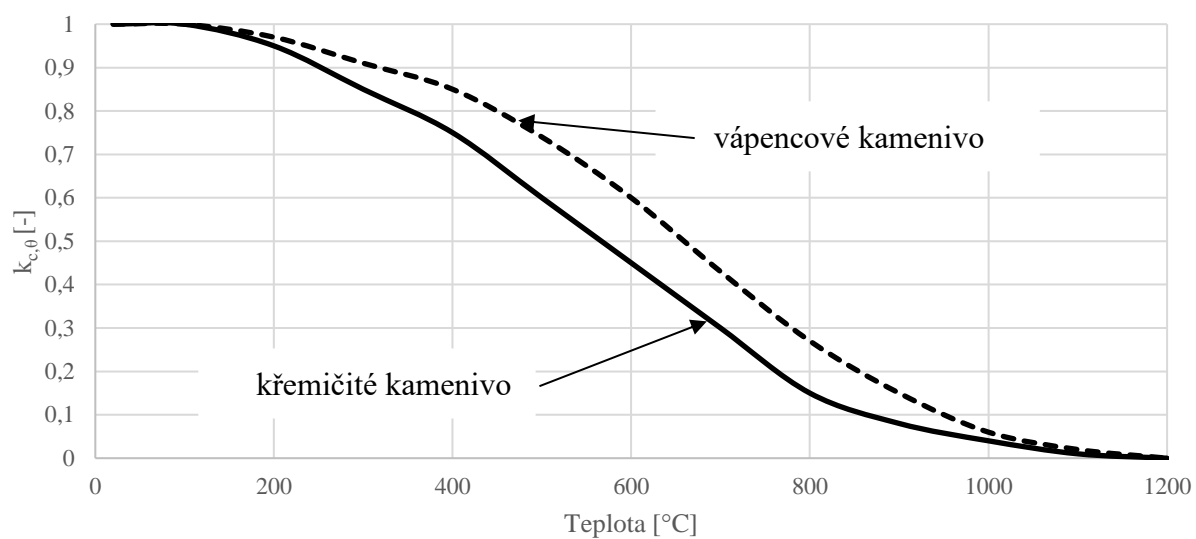
Sestupnou větev pracovního diagramu ( $\varepsilon_{c1,\theta} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$ ) lze modelovat pomocí lineárního a nelineárního vztahu (viz Obrázek 4). Pro nelineární model lze použít vztah (9).

Poměr  $f_{ck,\theta}/f_{ck}$  se označuje jako  $k_{c,\theta}$  – součinitel pro redukci charakteristické pevnosti betonu v tlaku, platí tedy vztah

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_{ck}. \quad (10)$$



Obrázek 4 – Matematický model pro pracovní diagram betonu při zvýšené teplotě, převzato z [16]



Obrázek 5 – Součinitel pro redukci charakteristické pevnosti betonu v tlaku při požáru podle [16]

Tabulka 2 – Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu s křemičitým, nebo vápencovým kamenivem při zvýšených teplotách, podle [16]

Beton	Křemičité kamenivo			Vápencové kamenivo		
Teplota $\theta$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
20	1	0,0025	0,02	1	0,0025	0,02
100	1	0,004	0,0225	1	0,004	0,0225
200	0,95	0,0055	0,025	0,97	0,0055	0,025
300	0,85	0,007	0,0275	0,91	0,007	0,0275
400	0,75	0,01	0,03	0,85	0,01	0,03
500	0,6	0,015	0,0325	0,74	0,015	0,0325
600	0,45	0,025	0,035	0,6	0,025	0,035
700	0,3	0,025	0,0375	0,43	0,025	0,0375
800	0,15	0,025	0,04	0,27	0,025	0,04
900	0,08	0,025	0,0425	0,15	0,025	0,0425
1000	0,04	0,025	0,045	0,06	0,025	0,045
1100	0,01	0,025	0,0475	0,02	0,025	0,0475
1200	0	-	-	0	-	-



### 3.1.2 Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

#### Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost betonu je ovlivněna hlavně typem kameniva [14]. Teplotní poměrné přetvoření betonu, viz Obrázek 6, lze stanovit ve vztahu k délce při teplotě 20 °C následovně [16].

Pro křemičité kamenivo:

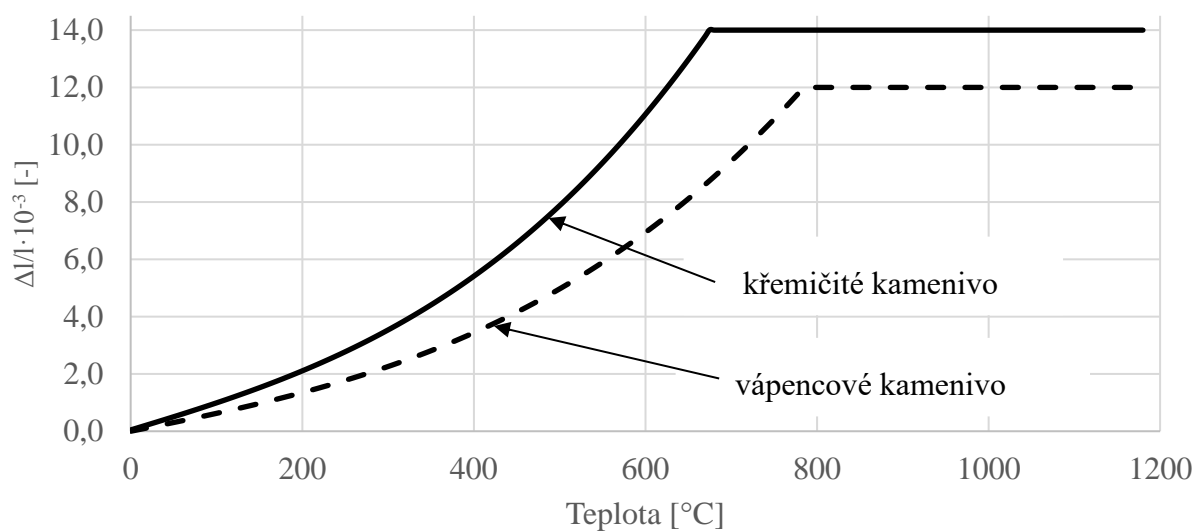
$$\frac{\Delta l}{l} = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \theta^3 \quad [-] \quad \text{pro } 20 \text{ °C} \leq \theta \leq 700 \text{ °C}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \cdot 10^{-3} \quad [-] \quad \text{pro } 700 \text{ °C} < \theta \leq 1200 \text{ °C}$$

Pro vápencové kamenivo:

$$\frac{\Delta l}{l} = -1,2 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-6} \theta + 1,4 \cdot 10^{-11} \theta^3 \quad [-] \quad \text{pro } 20 \text{ °C} \leq \theta \leq 805 \text{ °C}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 12 \cdot 10^{-3} \quad [-] \quad \text{pro } 805 \text{ °C} < \theta \leq 1200 \text{ °C}$$



Obrázek 6 – Teplotní roztažnost betonu podle [3]

## Objemová hmotnost

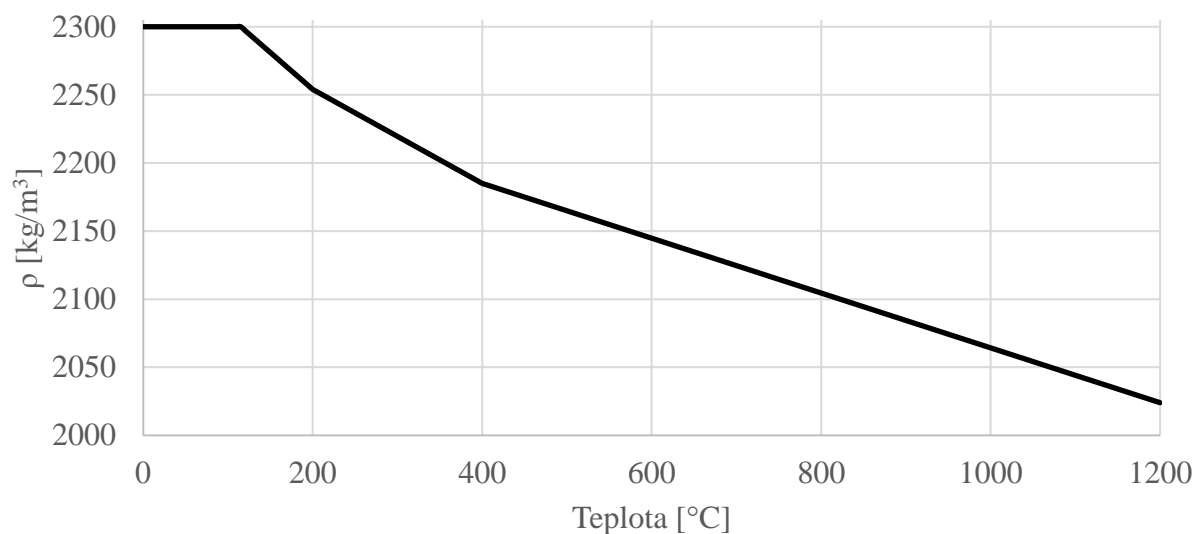
Změna objemové hmotnosti v závislosti na teplotě, viz Obrázek 7, je ovlivněna ztrátou volné i vázané vody a je definována takto [16]:

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{pro } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(1 - \frac{0,02(\theta - 115)}{85}\right) \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{pro } 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,98 - \frac{0,03(\theta - 200)}{200}\right) \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{pro } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,95 - \frac{0,07(\theta - 400)}{800}\right) \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{pro } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1\,200^{\circ}\text{C}$$



Obrázek 7 – Objemová hmotnost betonu podle [16]

## Tepelná vodivost

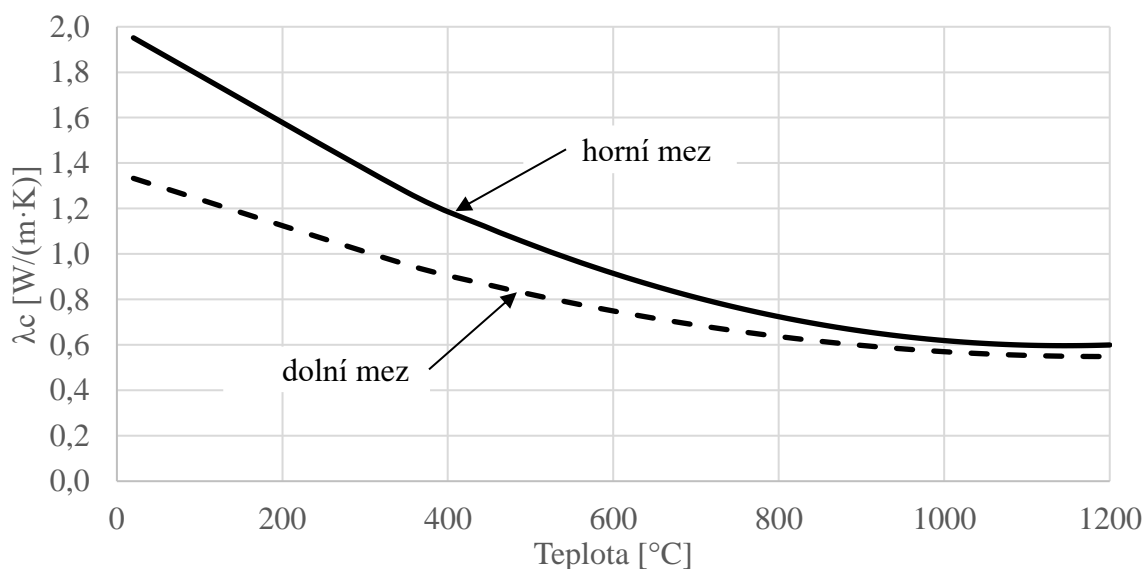
Tepelná vodivost je závislá na každé složce betonu (typ kameniva, typ cementu, obsah vlhkosti) a jejich vzájemných podílech. Tepelnou vodivost lze stanovit mezi dolní a horní mezí, viz Obrázek 8. Součinitel teplotní vodivosti betonu s rostoucí teplotou klesá.

Horní mez obyčejného betonu lze stanovit ze vztahu podle [16]:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \left( \frac{\theta}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{\theta}{100} \right)^2. \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$

Dolní mez obyčejného betonu lze stanovit ze vztahu podle [16]:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \left( \frac{\theta}{100} \right) + 0,0057 \left( \frac{\theta}{100} \right)^2. \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$



Obrázek 8 – Tepelná vodivost betonu podle [16]

### Měrná tepelná kapacita

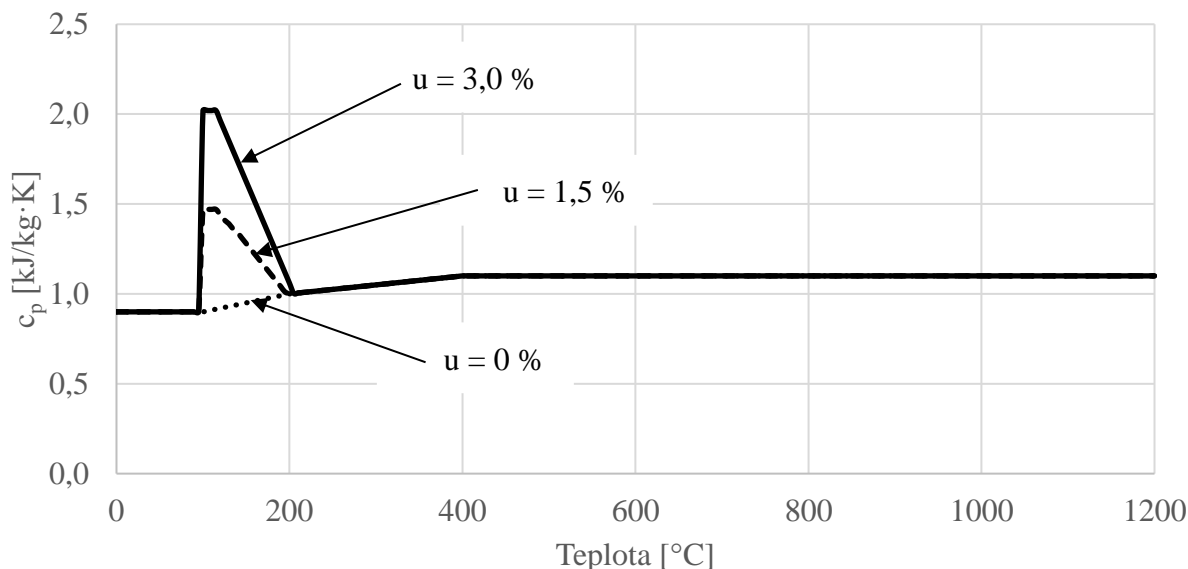
Měrná tepelná kapacita betonu je ovlivněna typem kameniva a vlhkostí betonu. Obsah vody je významný mezi teplotami 100–200 °C, kdy je hodnotou  $c_{p,peak}$  zohledněno odpařování vlhkosti. Norma [16] udává hodnoty pro beton s 0, 1,5 a 3 % vlhkostí, průběh měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě, viz Obrázek 9.

Měrná tepelná kapacita se u suchého betonu (vlhkost  $u = 0\%$ ) pro beton se silikátovým a vápencovým kamenivem určuje takto:

$$\begin{array}{lll}
 c_p(\theta) = 900 & [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] & \text{pro } 20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100\text{ }^\circ\text{C}, \\
 c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) & [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] & \text{pro } 100\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 200\text{ }^\circ\text{C}, \\
 c_p(\theta) = 1000 + \left(\frac{\theta-200}{2}\right) & [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] & \text{pro } 200\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 400\text{ }^\circ\text{C}, \\
 c_p(\theta) = 1100 & [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] & \text{pro } 400\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1\,200\text{ }^\circ\text{C}.
 \end{array}$$

Pokud není vlhkost ve výpočetní metodě přímo uvažována, lze funkci uvedenou pro měrné teplo betonu s křemičitým a vápencovým kamenivem modelovat konstantní hodnotou  $c_{p,peak}$  mezi 100 °C a 115 °C s lineárním poklesem mezi 115 °C a 200 °C.

$$\begin{array}{lll}
 c_{p,peak} = 900 & [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] & \text{pro vlhkost } 0\% \text{ hmotnosti betonu,} \\
 c_{p,peak} = 1470 & [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] & \text{pro vlhkost } 1,5\% \text{ hmotnosti betonu,} \\
 c_{p,peak} = 2020 & [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] & \text{pro vlhkost } 3,0\% \text{ hmotnosti betonu.}
 \end{array}$$



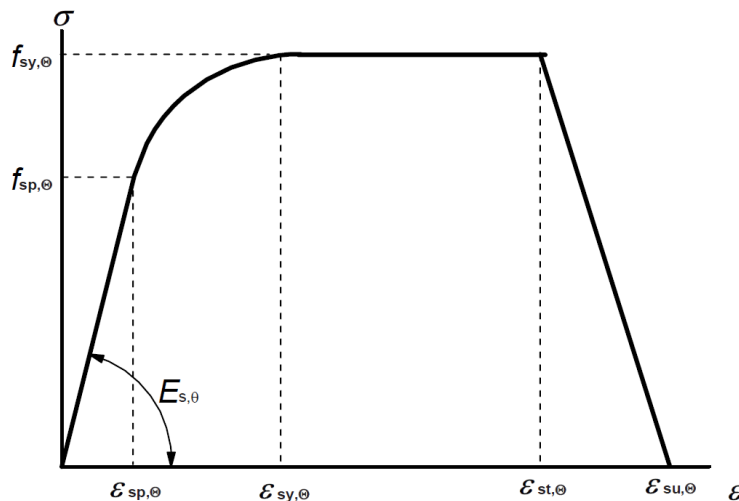
Obrázek 9 – Měrná tepelná kapacita betonu podle [3]

## 3.2 Betonářská výztuž

Beton má vysokou pevnost v tlaku, avšak jeho pevnost v tahu je řádově nižší. Proto se do oblastí tahových napětí vkládá betonářská výztuž, která nízkou pevnost betonu v tahu kompenzuje a tato napětí přenesou. Únosnost železobetonových konstrukcí je zajištěna spolupůsobením betonu a výztuže. Betonářská výztuž je chráněna tzv. krycí vrstvou. Tato krycí vrstva zajišťuje mimo jiné spolupůsobení a také chrání výztuž před vlivy okolního prostředí a zajišťuje tak trvanlivost konstrukce. V případě vzniku požáru tato krycí vrstva chrání výztuž před účinky teploty. Vzájemné spolupůsobení betonářské výztuže a betonu je při běžných teplotách způsobeno především téměř shodnou teplotní roztažností obou materiálů. Při nárůstu teploty nad 100 °C se rozdíl hodnot součinitele teplotní roztažnosti mírně zvyšuje (viz Obrázek 11). Ocelová výztuž se rozpíná více než beton a dochází tak ke vzniku vnitřních napětí, která soudržnost postupně snižují a vznikají tak trhliny [15]. Železobetonové prvky vyztužené výztuží válcovanou za tepla mají obecně lepší vlastnosti při požáru, jelikož výztuž tvářená za tepla je houževnatější [17]. Podobně, jako konstrukční ocel je i betonářská výztuž citlivá na účinky vysokých teplot. Kritická teplota výztuže je dle [16]  $\theta_{cr} = 500$  °C.

### 3.2.1 Mechanické vlastnosti výztuže

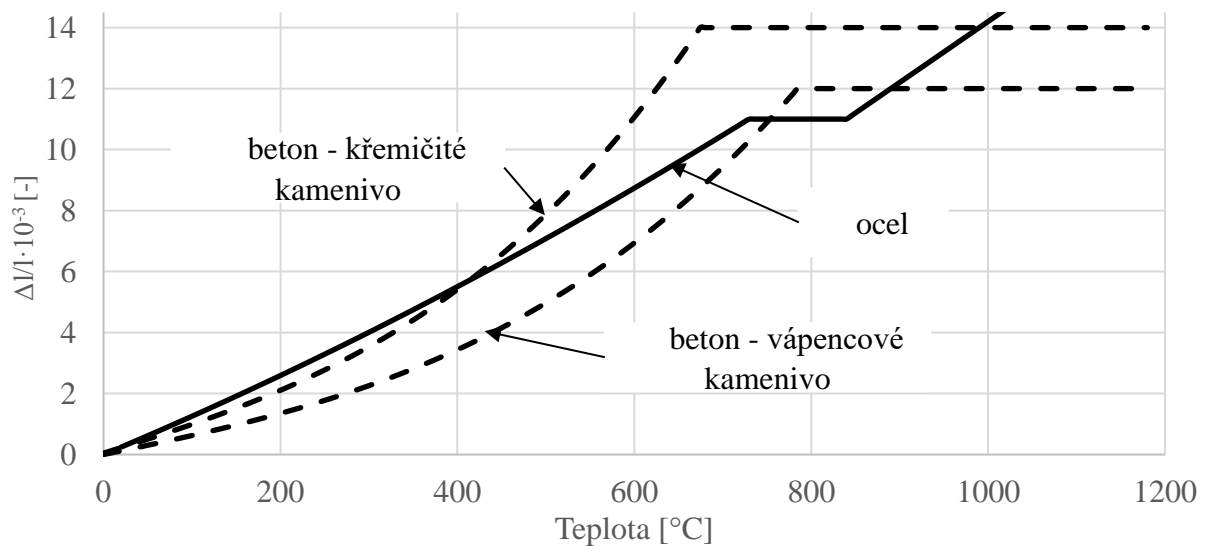
Pevnostní a deformační vlastnosti betonářské oceli při zvýšené teplotě lze stanovit z pracovního diagramu betonářské oceli (viz Obrázek 10). Tento diagram je definován sklonem v lineárně pružné oblasti  $E_{s,\theta}$ , mezí úměrnosti  $f_{sp,\theta}$  a maximálním napětím  $f_{sy,\theta}$ .



Obrázek 10 – Matematický model pro pracovní diagram betonářské výztuže při zvýšené teplotě, převzato z [16]

Tabulka 3 – Hodnoty třídy N pro parametry pracovního diagramu betonářské výztuže válcované za tepla a tvářené za studena při zvýšených teplotách podle [16]

Teplota oceli $\theta_a$	$f_{sy,\theta}/f_{yk}$		$f_{sp,\theta}/f_{yk}$		$E_{s,\theta}/E_s$	
	Válcované za tepla	Tvářené za studena	Válcované za tepla	Tvářené za studena	Válcované za tepla	Tvářené za studena
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000	0,960	1,000	1,000
200	1,000	1,000	0,810	0,920	0,900	0,870
300	1,000	1,000	0,610	0,810	0,800	0,720
400	1,000	0,940	0,420	0,630	0,700	0,560
500	0,780	0,670	0,360	0,440	0,600	0,400
600	0,470	0,400	0,180	0,260	0,310	0,240
700	0,230	0,120	0,080	0,080	0,130	0,080
800	0,110	0,110	0,050	0,060	0,090	0,060
900	0,060	0,0800	0,0400	0,0500	0,070	0,050
1000	0,040	0,0500	0,0300	0,0300	0,050	0,030
1100	0,020	0,0300	0,0100	0,0200	0,020	0,020
1200	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,000



Obrázek 11 – Délková teplotní roztlačnost pro ocel a beton podle [16]

### 3.3 Ocel

Ocel je nehořlavý stavební materiál, ale ve srovnání s betonovými konstrukcemi mají ocelové konstrukce nižší požární odolnost. Nevýhodou oceli je, že má vysokou tepelnou vodivost [3]. Při zvýšené teplotě se ocelové konstrukce deformují a ztrácejí svou únosnost a stabilitu. Jelikož při deformaci části konstrukce může dojít ke kolapsu celé stavby, je potřeba posuzování ocelových konstrukcí na účinky požáru přikládat velkou pozornost [15]. Nebezpečí je zvláště velké u stropních nosných ocelových prvků, jelikož při požáru v uzavřených prostorech je nejvyšší teplota pod jejich stropy [17]. Protože ocelové konstrukce mají samy o sobě dobrou požární odolnost pouze pro nižší časy, je často nutné tyto konstrukce chránit vhodnou protipožární ochranou. Buď užitím oceli s vyšší pevností nebo například užitím protipožárních nátěrů, nástřiků či užitím obkladu, který izoluje povrch konstrukce a zvyšuje tak její požární odolnost [15].

Vysoké teploty způsobují změny vnitřních vazeb ve struktuře oceli a zhoršují tak mechanické vlastnosti oceli.

Při teplotě ocelové konstrukce 350 °C dochází k rekrystalizaci mikrostruktury materiálu, která vede ke ztrátám zlepšených mechanických vlastností, které byly získány různými mechanicko-tepelnými technologiemi zpracování [17]. Tyto ztráty mohou být natolik závažné, že může být ohrožena bezpečnost celé konstrukce. Se zvyšující teplotou se výrazně zhoršuje pevnost, ale i deformační parametry oceli. Jedním z nejdůležitějších jevů je snižování účinné meze kluzu. K plastickým deformacím dochází, pokud je napětí v materiálu vyšší než mez kluzu. To znamená, že při požární situaci budou plastické deformace vznikat dříve než za běžné teploty. Pokud je v oceli dosaženo kritické teploty, dojde k přetvoření konstrukce, které je neslučitelné s její funkcí a dojde tak ke ztrátě stability. Za předpokladu, že se nemusí uvažovat deformační kritéria nebo stabilitní jevy, může se kritická teplota vypočítat podle vztahu (11) v čase při rovnoměrném rozdělení teploty po průřezu pro libovolný stupeň využití [18]

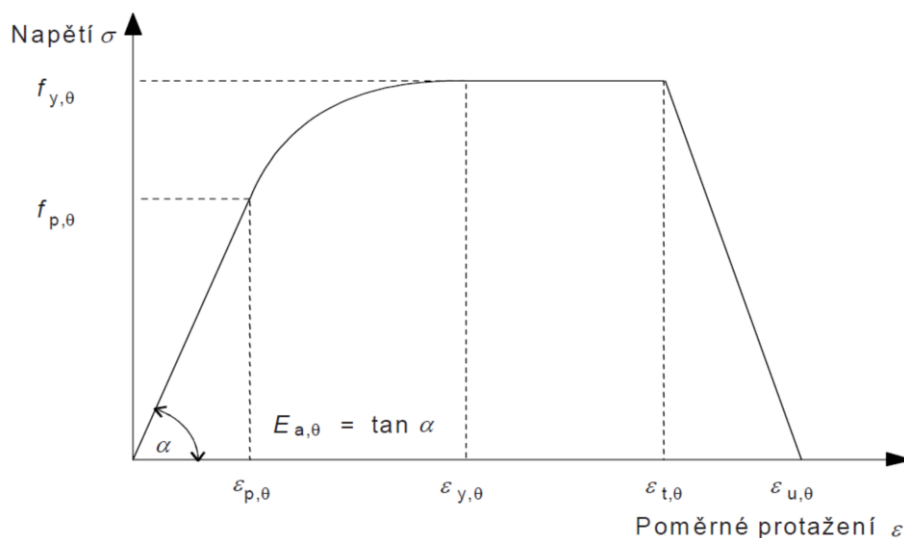
$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482, \quad (11)$$

kde je  $\mu_0$  stupeň využití.

Pokud teplota oceli dosáhne 700–800 °C, dochází ke smršťování struktury oceli v důsledku změny mikrostruktury.

### 3.3.1 Mechanické vlastnosti oceli

Pevnostní a deformační vlastnosti oceli při zvýšené teplotě se určují z pracovního diagramu, viz Obrázek 12. Příslušné parametry pracovního diagramu uhlíkaté oceli se redukuje na základě tzv. redukčních součinitelů (Obrázek 13), hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 4.



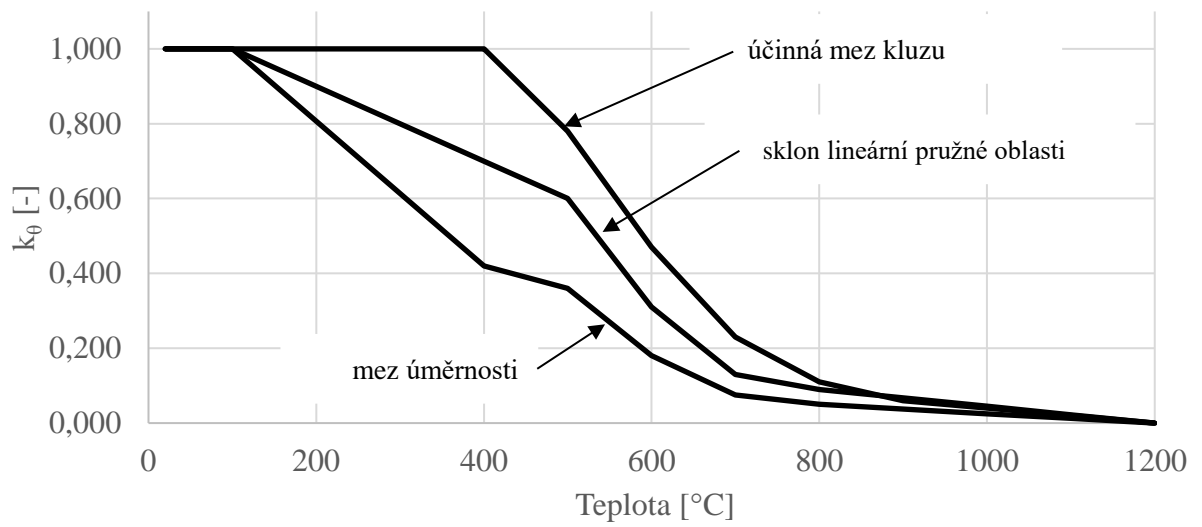
Obrázek 12 – Model pracovního diagramu oceli při zvýšených teplotách (bez zpevnění), převzato z [18]

Tabulka 4 – Redukční součinitele pro účinnou mez kluzu, pro mez úměrnosti a pro modul pružnosti uhlíkové oceli, podle [18]

Teplota oceli $\theta_a$	Redukční součinitele při teplotě $\theta_a$ vztahené k hodnotě $f_y$ nebo $E_a$ při 20 °C		
	Redukční součinitel (vztahený k $f_y$ ) pro účinnou mez kluzu $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Redukční součinitel (vztahený k $f_y$ ) pro mez úměrnosti $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_p$	Redukční součinitel (vztahený k $E_a$ ) pro sklon lineární pružné části $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

POZNÁMKA: pro mezilehlé hodnoty teploty oceli lze lineárně interpolovat





Obrázek 13 – Redukční součinitele pro pracovní diagram uhlíkové oceli při zvýšených teplotách podle [18]

### 3.3.2 Teplotní a fyzikální vlastnosti oceli

U oceli se fyzikální vlastnosti s výraznou změnou teploty mění. Jedná se především o tepelnou roztažnost (Obrázek 14), tepelnou vodivost (Obrázek 16) a měrnou tepelnou kapacitu (Obrázek 17). Objemová hmotnost (Obrázek 15) zůstává po celou dobu působení požáru konstantní.

#### Tepelná roztažnost

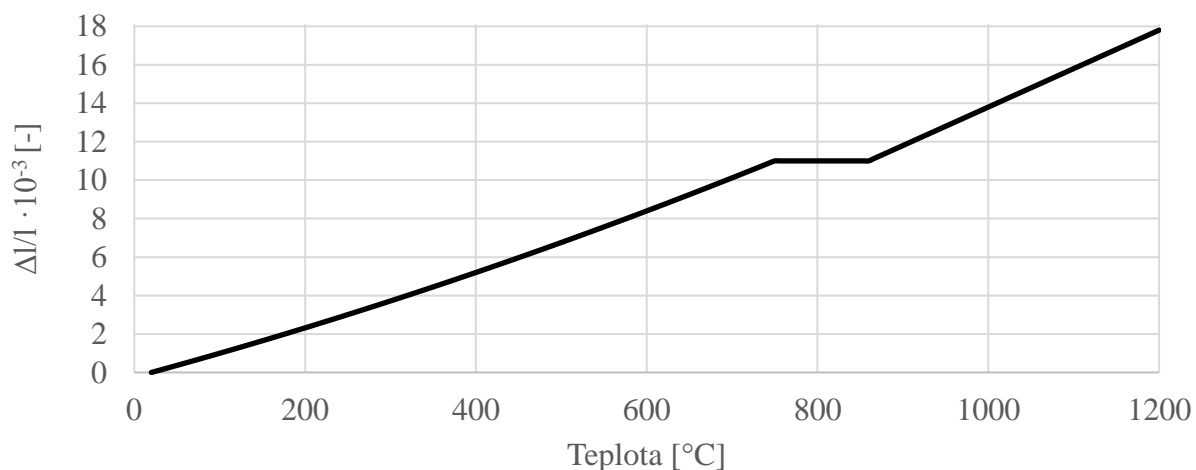
Tepelná roztažnost může být ze statického hlediska nebezpečná, protože například nosník o délce 10 metrů, který se zahřeje na 400 °C, se může prodloužit až téměř o 50 mm.

Poměrná teplotní roztažnost je určena následovně [18]:

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4} \quad [-] \quad \text{pro } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,1 \cdot 10^{-2} \quad [-] \quad \text{pro } 750 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 6,2 \cdot 10^{-3} \quad [-] \quad \text{pro } 750 \text{ }^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$



Obrázek 14 – Teplotní roztažnost oceli podle [18]

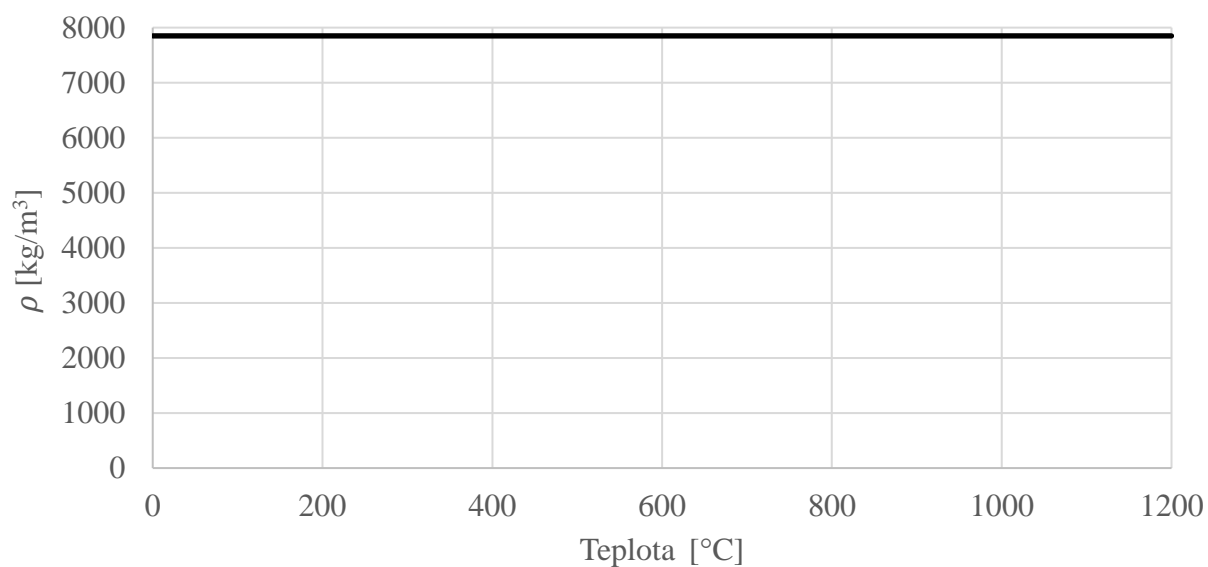
**Objemová hmotnost**

Hustotu lze uvažovat nezávisle na teplotě konstantní [18].

$$\rho = 7850$$

$$[\text{kg/m}^3]$$

$$\text{pro } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$



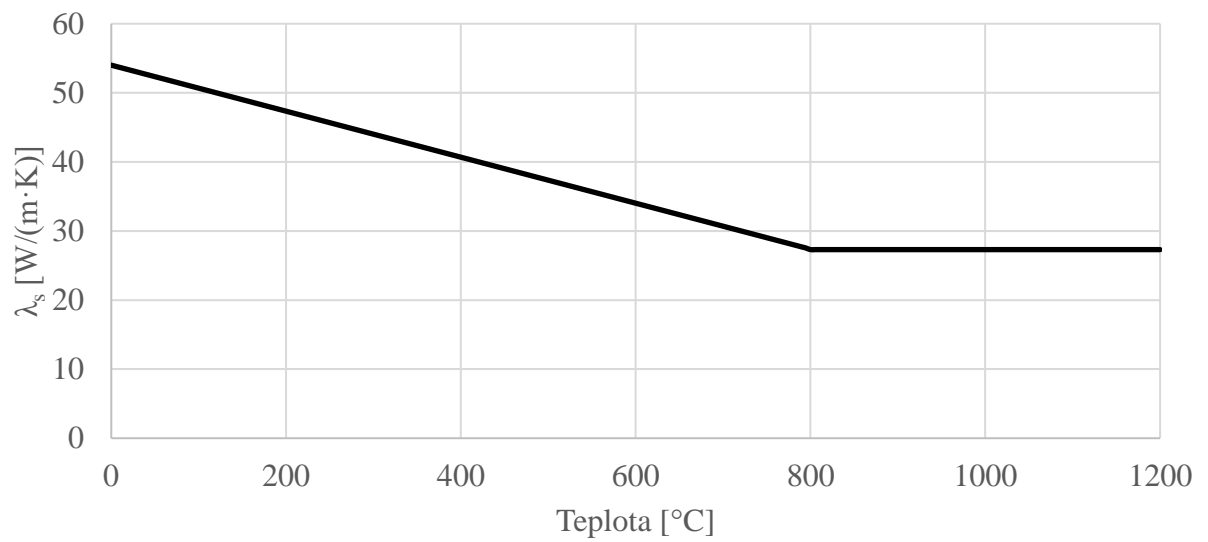
Obrázek 15 – Objemová hmotnost oceli podle [18]

**Tepelná vodivost**

Změna tepelné vodivosti v závislosti na teplotě je popsána níže uvedenými vztahy [18].

$$\lambda_s = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad \text{pro } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lambda_s = 27,3 \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad \text{pro } 800 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1\,200 \text{ }^\circ\text{C}$$



Obrázek 16 – Tepelná vodivost oceli podle [18]

### Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita u oceli pozvolna vzrůstá, pouze s výjimkou při teplotě 735 °C, kdy nastane výrazný vrchol křivky, který je způsoben změnou krystalické mřížky.

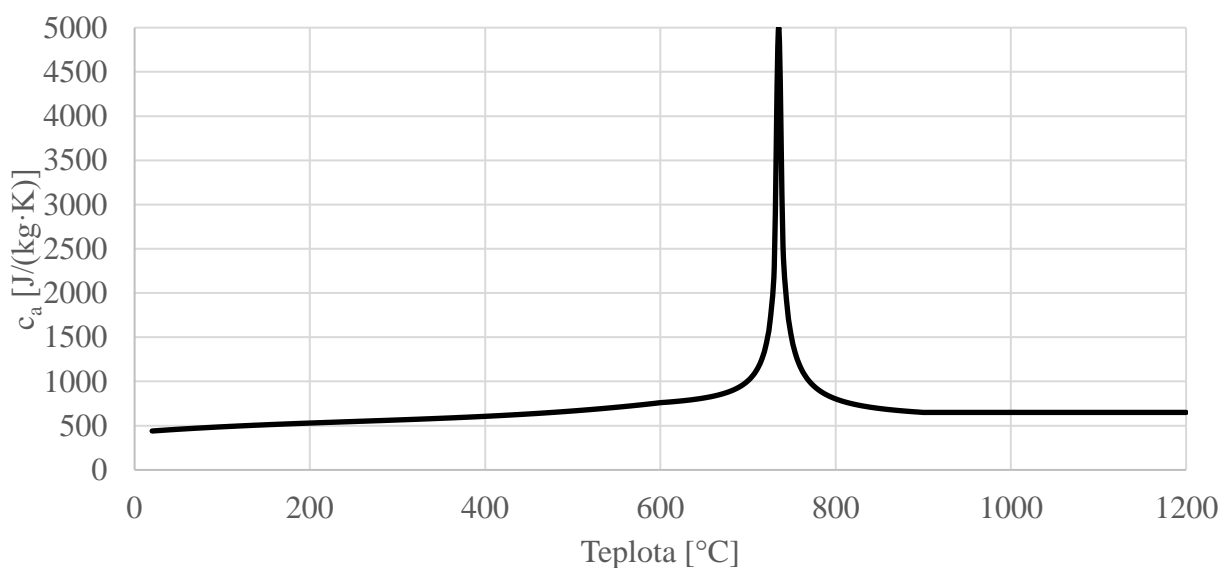
Měrná tepelná kapacita oceli je určena následovně:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1}\theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}\theta_a^3 \quad \text{pro } 20 \text{ °C} \leq \theta < 600 \text{ °C}$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad \text{[J/(kg·K)]} \quad \text{pro } 600 \text{ °C} \leq \theta < 735 \text{ °C}$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad \text{[J/(kg·K)]} \quad \text{pro } 735 \text{ °C} \leq \theta < 900 \text{ °C}$$

$$c_a = 650 \quad \text{[J/(kg·K)]} \quad \text{pro } 900 \text{ °C} \leq \theta < 1200 \text{ °C}$$



Obrázek 17 – Měrná tepelná kapacita oceli podle [18]

### 3.4 Minerální izolace

Izolace z minerálních vláken se vyrábí tavením hornin (nejčastěji čedič, gabro nebo křemen) a v závislosti na druhu vstupních surovin se pak jedná o kamennou vlnu, nebo skelnou vatu. Izolace se vyrábí ve dvou základních variantách jako měkká rohož nebo tuhá deska. Izolace se dá také v rozvlákněné formě aplikovat jako foukaná izolace [17]. Jde o nehořlavý materiál s třídou reakce na oheň A1 (výjimečně A2), minerální izolace má teplotu tání více než 1000 °C [19].

Izolace z minerálních vláken může mít, na rozdíl od jiných protipožárních izolací, více funkcí:

- tepelná a zvuková izolace;
- výplň křidel požárních uzávěrů;
- těsnění dilatačních spár [17].

Výhodou této izolace je nízká hmotnost, možnost použití jakékoliv tloušťky izolantu, odolnost vůči vibracím a dynamickým zatížením, flexibilita a v porovnání s ostatními deskovými izolacemi poměrně snadná montáž [17]. Nevýhodou tepelné izolace z minerálních vláken je vysoká nasákavost, která v případě absorpce vody zásadně zhoršuje tepelně izolační vlastnosti.

Obecně je obtížné získat relevantní teplotní a fyzikální vlastnosti izolačních materiálů za zvýšených teplot. Většinou se totiž jedná o komerční systém výrobce, který tato data nezveřejňuje. Výrobce proto nejčastěji udává materiálové charakteristiky za běžné teploty [14].

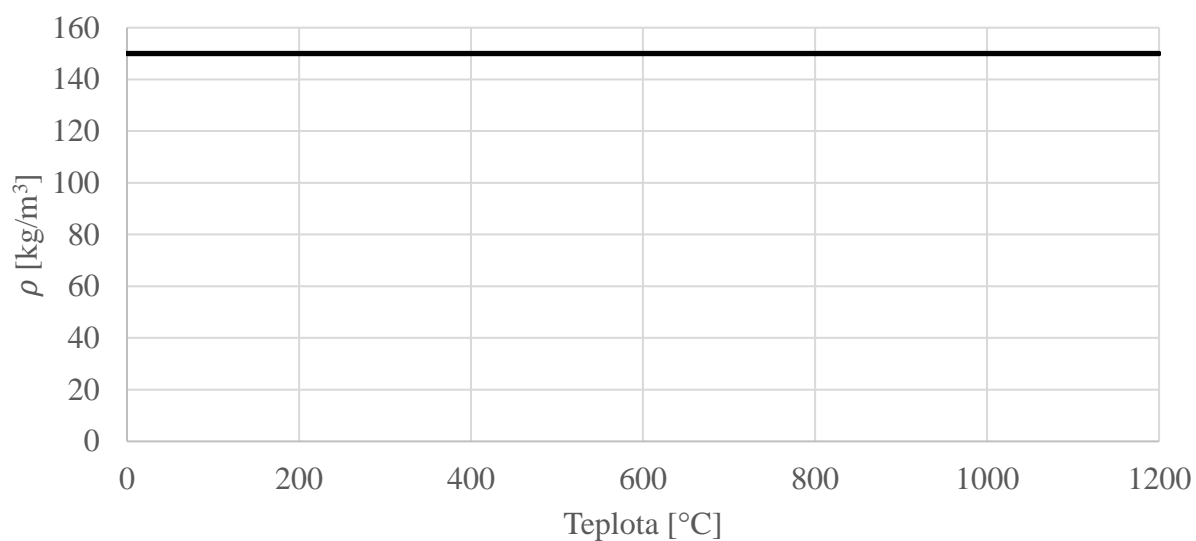
### 3.4.1 Teplotní a fyzikální vlastnosti minerální izolace

Níže uvedené materiálové charakteristiky jsou převzaty z databáze materiálů [20]. Viz Obrázek 18, Obrázek 19, Obrázek 20.

#### Objemová hmotnost

Objemová hmotnost minerální izolace je uvažována jako teplotně nezávislá veličina, v případě, že není v tepelné izolaci přítomna voda.

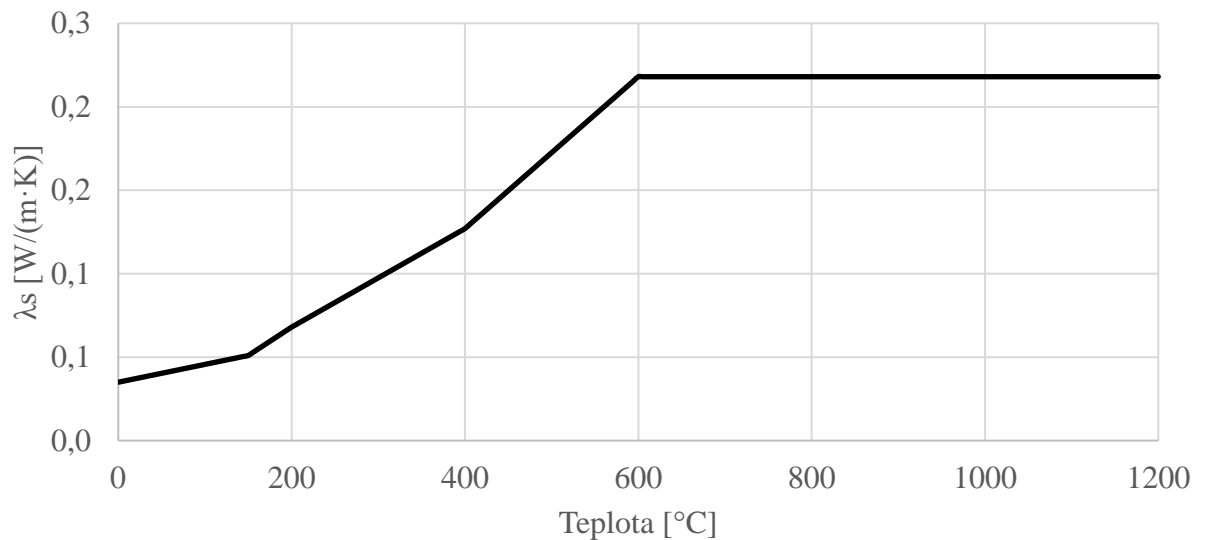
$$\rho = 150 \quad [\text{kg/m}^3]$$



Obrázek 18 – Hustota izolace z minerální vlny podle [20]

### Tepelná vodivost

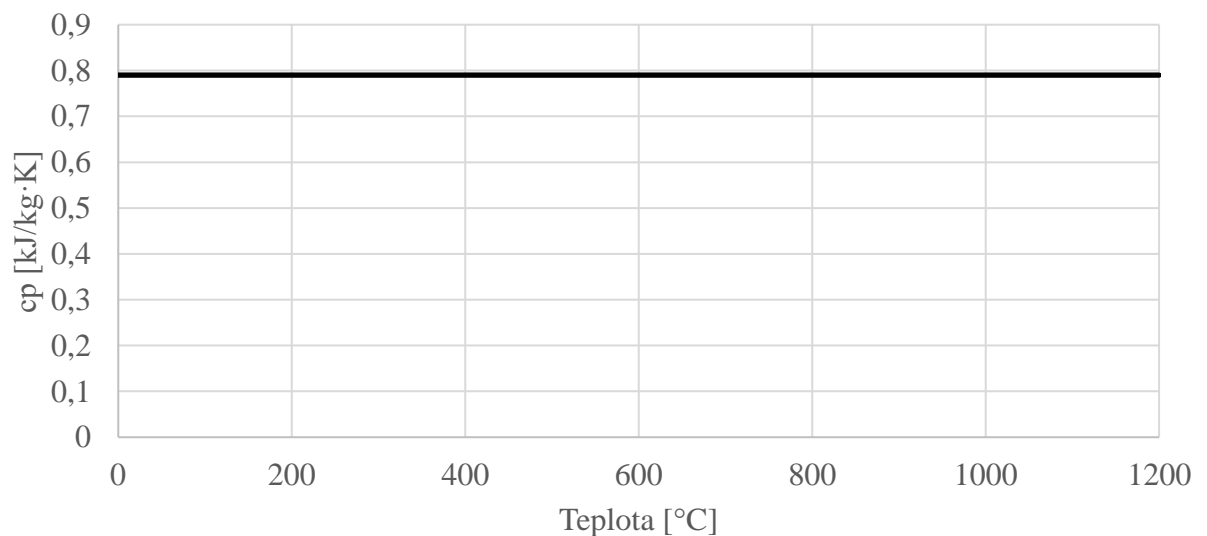
Součinitel teplotní vodivosti v závislosti na teplotě je uvažován následovně.



Obrázek 19 – Tepelná vodivost izolace z minerální vlny podle [20]

### Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita minerální izolace je uvažována jako teplotně nezávislá veličina.



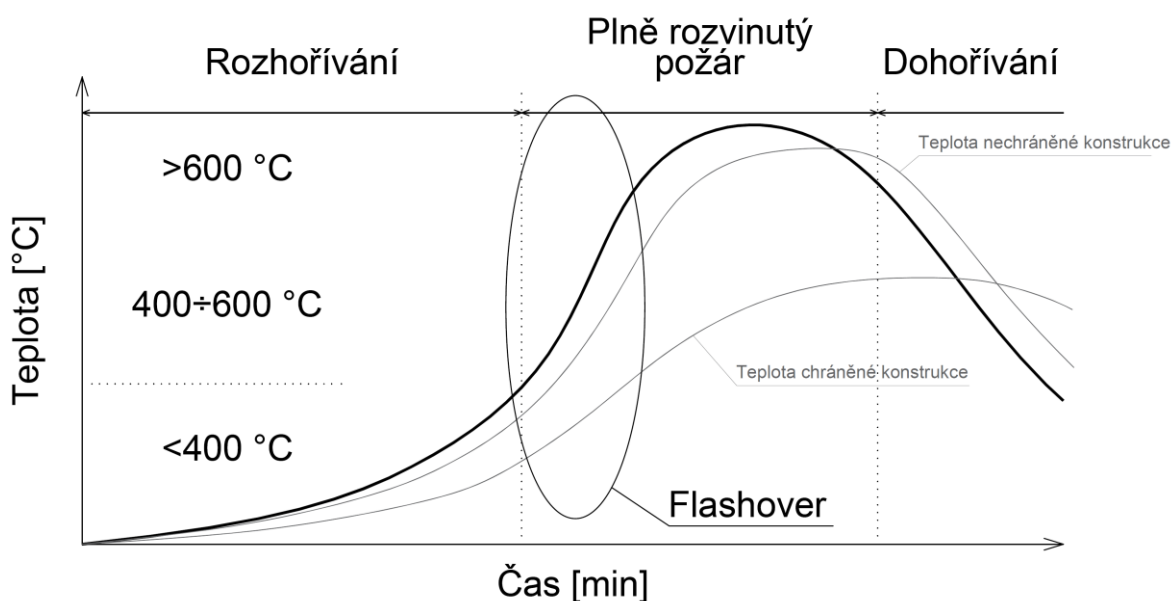
Obrázek 20 – Měrná tepelná kapacita izolace z minerální vlny podle [20]



## 4 Teplotní analýza

Požár lze charakterizovat jako nežádoucí hoření. Lze jej popsat časovým průběhem teplot, tlaku a složení plynů, které v prostoru hoří. Hořícím prostorem je obvykle požární úsek, který je ohraničen požárně dělícími konstrukcemi nebo konstrukcemi bez požární odolnosti, tzv. požárně otevřenými plochami (např. okenní nebo dveřní otvory). Při požáru jsou obvykle popisovány tři časové fáze požáru. V první fázi, fázi rozhořívání, dochází ke vznícení hořlavých materiálů a k šíření na ostatní hořlavé materiály. V této fázi je možná evakuace a účinný zásah jednotek požární ochrany, funguje zde také aktivní požární ochrana (např. EPS, ZOKT, SHZ apod.). Pro tuto fázi jsou charakteristické poměrně nízké teploty a stavební konstrukce obvykle nejsou poškozeny. Druhá fáze, fáze plně rozvinutého požáru, se vyznačuje rychlým vzestupem teplot a ustáleným hořením většiny paliva, tuto fázi doprovází jev zvaný „flashover“ – tedy prostorové vzplanutí. Při flashover efektu jsou definována různá přechodová kritéria, např. teplota horní vrstvy 400–600 °C, zaplnění 80 % výšky požárního úseku kouřem nebo tepelný tok v horní vrstvě 20 kW/m<sup>2</sup>. Požár končí dohoříváním a chladnutím [3], [7]. Tato fáze ale bývá pro návrh stavebních konstrukcí také důležitá, protože teplota konstrukce i při klesání teploty plynu může stále narůstat, viz Obrázek 21 [3].

Rozeznáváme požár řízený palivem, kdy je do požárního úseku přiváděno dostatečné množství kyslíku a rychlost uvolňování tepla je ovlivněna množstvím požárního zatížení. Nebo požár řízený ventilací, kdy je rychlost uvolňování tepla ovlivněna nedostatečným množstvím přiváděného kyslíku [7].



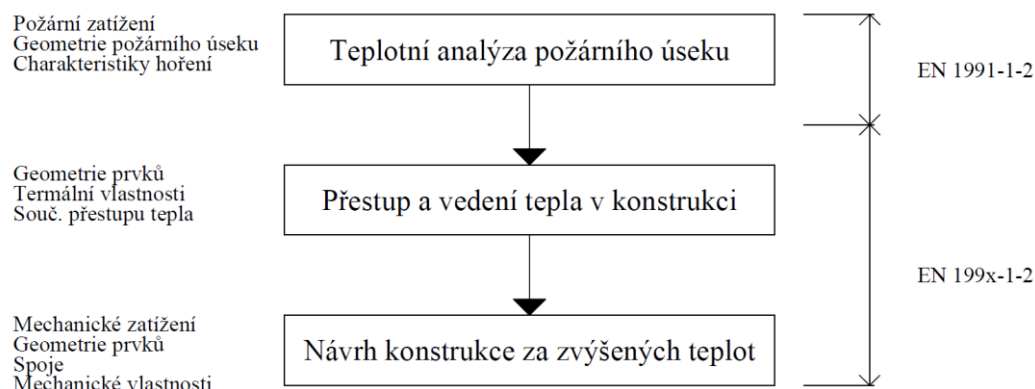
Obrázek 21 – Model teploty plynu v požárním úseku v závislosti na čase podle [3]

Pro návrh stavebních konstrukcí je rozhodující modelování plně rozvinutého požáru probíhajícího v celém prostoru požárního úseku.

K požární bezpečnosti staveb přispívají modely požární spolehlivosti a návrh požární odolnosti stavebních konstrukcí. Požární spolehlivost konstrukce se stanoví analýzou rizik. Tato analýza se stanovuje u zvláště důležitých staveb ve spojení s dalšími možnými riziky, jako například zemětřesení, živelné katastrofy nebo teroristické útoky. Pro požár se zvažují všechny alternativy požárního zatížení, použití aktivních požárně bezpečnostních zařízení a chování konstrukce vypracují požární scénáře možných mimořádných událostí. Na základě těchto požárních scénářů se vypracuje teplotní analýza požárního úseku, následně přestup tepla do konstrukce a návrh konstrukce za vysokých teplot, viz Obrázek 22 [3], toto schéma platí pro konstrukce z různých materiálů [23].

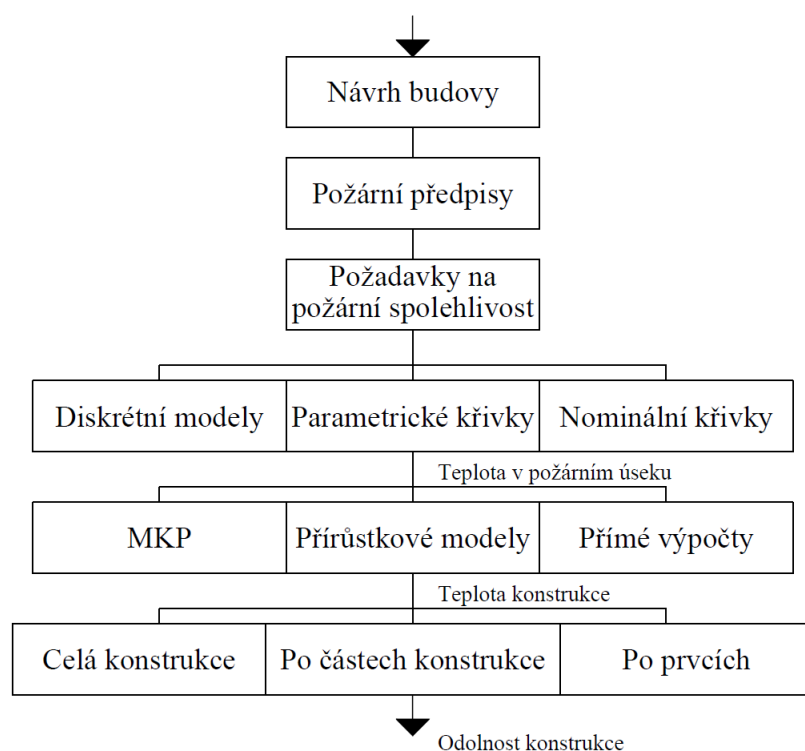
Teplotní analýza požárního úseku se podle [21] řeší např. pomocí nominálních teplotních křivek, parametrických teplotních křivek (příloha A), modelů pro lokální požáry (příloha C), zónovými modely, které jsou založeny na energetické bilanci při hoření (příloha D) nebo výpočtem dynamické analýzy kapalin a plynů (CFD model).

Zjednodušené modely požáru jsou založeny na fyzikálních parametrech a mají omezenou oblast použití. Tyto modely vycházejí z návrhové hustoty požárního zatížení. Za požáru lze uvažovat rovnoměrné rozdělení teploty v čase. Oproti tomu zdokonalené modely požáru uvažují vlastnosti plynu a výměnu hmoty a energie. Mezi zdokonalené modely patří například výpočet dynamické analýzy kapalin a plynů, která stanovuje vývoj teploty v čase i v prostoru [3].



Obrázek 22 – Hlavní části návrhu konstrukce za požární situace podle [3]

Návrhové postupy lze rozdělit do tří úrovní obtížnosti a přesnosti řešení, viz Obrázek 22. Nejpřesněji, a zároveň nejsložitěji, lze teplotu v požárním úseku předpovědět dynamickou analýzou plynů v kombinaci s metodou konečných prvků pro výpočet přestupu tepla do konstrukce. Jednodušším řešením je použití parametrické křivky požáru a nejjednodušším nominální požární křivky. Požární odolnost prvku, která je stanovena za pomoci nominální normové teplotní křivky, se nazývá normová požární odolnost. Přestup tepla do konstrukce a rozvoj tepla v konstrukci závisí na materiálu. Řeší se zjednodušeně pomocí grafů a tabulek, přírůstkovými metodami nebo například metodou konečných prvků [3]. Při výpočtu teplotní analýzy požárního úseku, přestupu tepla do konstrukce nebo globální analýzy celé konstrukce se používá výhradně výpočetní technika. Pro řešení příkladů pomocí diskrétní metody MKP jsou k dispozici univerzitní nebo komerční programy, např. ANSYS, ABAQUS, SAFIR, TempAnalysis apod. Komerční výpočetní software má výhodu, že často dokáže řešit problematiku komplexněji. Například pokud je potřeba stavební konstrukci řešit z hlediska zatížení požárem a například seizmicitou, obvykle tuto kombinaci postihne jeden model. Nevýhodou těchto komerčních programů bývá velmi vysoká cena a složitost zadávání vstupů [7].


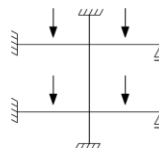
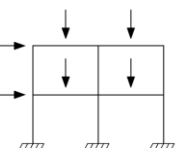
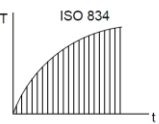



Obrázek 23 – Návrh prvku a konstrukce za požární situace podle [3]

Obrázek 23 ukazuje možné výpočtové způsoby posuzování stavebních konstrukcí za požární situace. Výpočet tepelné odezvy je založen na předpokladech teorie sdílení tepla a respektuje navržené teplotní zatížení. Výpočet mechanické odezvy se opírá o předpoklady stavební mechaniky, přičemž uvažuje s mechanickými vlastnostmi v závislosti na teplotě [15]. Obrázek 24 zobrazuje modely konstrukcí a tepelného zatížení z hlediska tepelné a mechanické odezvy.

Modely z hlediska mechanické odezvy [15]:

- **Prvek konstrukce:** nejjednodušší alternativa výpočtu. Při výpočtu vybraného prvku (např. nosníku nebo sloupu) lze zanedbat účinek rozdělení teploty po průřezu. Účinky zatížení lze získat z výpočtu za běžné teploty. Tento způsob výpočtu je vhodný pro ověření normové požární odolnosti.
- **Část konstrukce:** alternativní způsob ke globální analýze. Výpočet pouze přiměřené části konstrukce – tyto části mají být navrhovány s přihlédnutím k předpokládanému teplotnímu protažení a přetvoření tak, aby jejich interakce s ostatními částmi konstrukce mohla být v průběhu požáru aproximována časově závislým podepřením a okrajovými podmínkami.
- **Celá konstrukce (globální analýza):** nejobecnější výpočtový model pro stavební konstrukce namáhané požárem. Tento model zohledňuje chování a vlastnosti všech konstrukčních částí. Při navrhování celé konstrukce musí být splněna podmínka spolehlivosti pro jakýkoliv okamžik během fáze plně rozvinutého požáru. Pro globální analýzu se používají zpřesněné výpočetní modely, které uvažují vzrůst teploty v konstrukci a mechanické chování konstrukce.

	Mechanická odezva	Prvek konstrukce	Část konstrukce	Celá konstrukce
	Tepelná odezva			
Nominální křivky		Zkouška Tabulkové hodnoty Výpočtové metody (zjednodušené/zpřesněné)	Výpočtové metody (zjednodušené/zpřesněné) Zkouška (výjimečně)	Výpočtové metody (zpřesněné)
Param. křivky Modely požáru Reálné požáry		Výpočtové metody (zjednodušené/zpřesněné) Zkouška (výjimečně)	Výpočtové metody (zpřesněné) Zkouška (výjimečně)	Výpočtové metody (zjednodušené/zpřesněné) Zkouška (výjimečně)

Obrázek 24 – Mechanická a tepelná odezva stavebních konstrukcí podle [7] a [15]

## 4.1 Nominální teplotní křivky

Nominální teplotní křivky vyjadřují závislost teploty na čase (Obrázek 25). Tyto teplotní křivky popisují průběh teploty ve fázi plně rozvinutého požáru (po flashoveru).

Základní teplotní křivkou je normová teplotní křivka, která bývá označována jako ISO 834. Normová teplotní křivka má empirický základ, tzn. neodráží proměnné, které mohou mít vliv na průběh skutečného požáru (větrání, druh paliva apod.) [15]. Při použití normové teplotní křivky není uvažováno s chladnutím. Normová teplotní křivka odpovídá tzv. celulóзовému hoření (hoření dřeva, papíru, oděvů atd.).

Nominální teplotní křivky se používají při zkoušení požární odolnosti konstrukcí ve zkušebních pecích.

Normová teplotní křivka je dána vztahem

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (12)$$

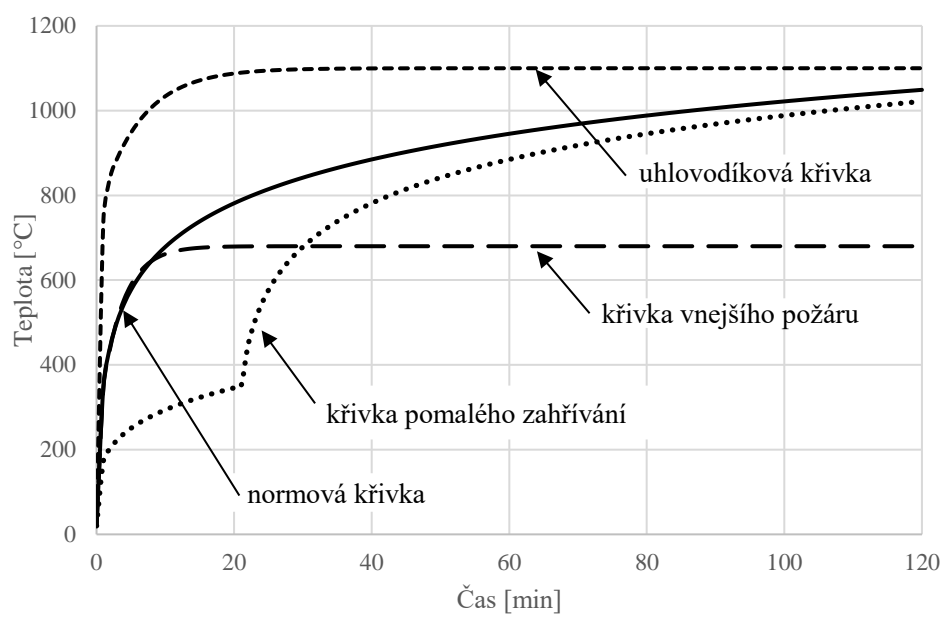
kde je

$\theta_g$  teplota plynu v požárním úseku ve °C,

$t$  čas v minutách.

Mezi další nominální teplotní křivky patří křivka vnějšího požáru, kterou jsou namáhány konstrukční prvky vně objektu, např. obvodové stěny nebo sloupy. Pro simulaci požáru s rychlým nárůstem intenzity (např. požár hořlavých kapalin) se používá uhlovodíková teplotní křivka. Při modelech požáru působící na protipožární vrstvy, které se aktivují pouze tepelným vedením ohně, např. zateplené fasády se uplatňuje křivka pomalého zahřívání [22].

Mezi nominální teplotní křivky patří také například tunelové křivky, které dosahují vyšších teplot než uhlovodíková křivka [22].



Obrázek 25 - Nominální teplotní křivky [3]

## 4.2 Sdílení tepla

Teplota uvnitř požárního úseku představuje rovnováhu mezi množstvím vyprodukovaného tepla a rychlostí tepelných ztrát odvedených do okolí. Sdílení tepla je možné třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací).

**Vedení** je mechanismus sdílení tepla primárně v pevných látkách (může probíhat i v kapalinách a plynech). Při vedení předávají energii částice s vyšší kinetickou energií částicím s nižší energií. Platí také, že materiály, které jsou dobrými elektrickými vodiči, jsou také obvykle dobrými vodiči tepla [7].

**Proudění** je přenos tepla pohybem tekutin nebo plynů. Sdílení tepla prouděním je důležitým faktorem při transportu horkých plynů a kouře ke stropu, nebo ven z oken požárního úseku. Konvektivní sdílení tepla obvykle zahrnuje i přenos tepla mezi pevnou látkou a okolní tekutinou, která daný povrch ohřívá – tzv. přestup tepla prouděním [7].

**Sálání** je přenos tepla elektromagnetickými vlnami. Při radiaci není nutná přítomnost látkového prostředí – sdílení tepla probíhá i ve vakuu [7]. Sálavá složka přenosu tepla je hlavním mechanismem pro sdílení tepla mezi plameny a povrchy vystavené požáru. Účinek sálání je závislý na emisivitě povrchu, na který dopadá, stejně tak jako na vzájemné poloze zdroje a exponovaného povrchu.

Při provádění teplotní analýzy konstrukcí, které jsou vystaveny požáru je potřeba řešit nestacionární vedení tepla (neustálené vedení tepla), jelikož se rozložení teploty mění s časem. Nestacionární vedení tepla lze popsat rovnicí pro vedení tepla, která je doplněna o počáteční podmínku a okrajové podmínky, které zohledňují sdílení tepla radiací a prouděním (resp. přestupem tepla od proudění) [23].

Rovnice nestacionárního vedení tepla ve dvou dimenzích lze dle [23] zapsat následovně

$$Q = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad \text{pro } x, y \in \Omega, \quad (13)$$

kde  $\theta$  je teplota,  $\rho$  objemová hmotnost materiálu,  $c_p$  je měrná tepelná kapacita materiálu,  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti materiálu,  $Q$  je vnitřní zdroj tepla,  $x$  a  $y$  jsou proměnné pro polohovou oblast a  $\Omega$  označuje diskretizovanou oblast. Materiálové vlastnosti je nutné uvažovat jako teplotně závislé (viz kap. 3). Rovnice vedení tepla vychází z Fourierova zákona.

### 4.3 Tepelný tok

Přenos tepla se popisuje pomocí tepelného toku. Tepelný tok je proces, při kterém je energie předána částicemi teplejšího tělesa na částice tělesa chladnějšího. Tepelné zatížení na konstrukce, které jsou přímo exponovány požárem, se udává čistým tepelným tokem v souladu s [21]. Čistý tepelný tok lze rozdělit na dvě části. První část je přestup tepla prouděním a druhá část přestup tepla sáláním [3]. Čistý tepelný tok je dán vztahem

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}, \quad (14)$$

kde je

$\dot{h}_{net,c}$  složka čistého konvekčního toku,

$\dot{h}_{net,r}$  složka čistého sálavého toku.

Složka tepelného toku prouděním se stanoví ze vztahu

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m), \quad (15)$$

kde je  $\alpha_c$  součinitel přestupu tepla prouděním, který se uvažuje pro normovou teplotní křivku hodnotou  $\alpha_c = 25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . Na odvrácené straně požáru se koeficient přestupu tepla prouděním uvažuje při sálání počítaném samostatně hodnotou  $\alpha_c = 4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , při zahrnutí vlivu sálání do konvekčního toku se počítá s hodnotou  $\alpha_c = 9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  [3].

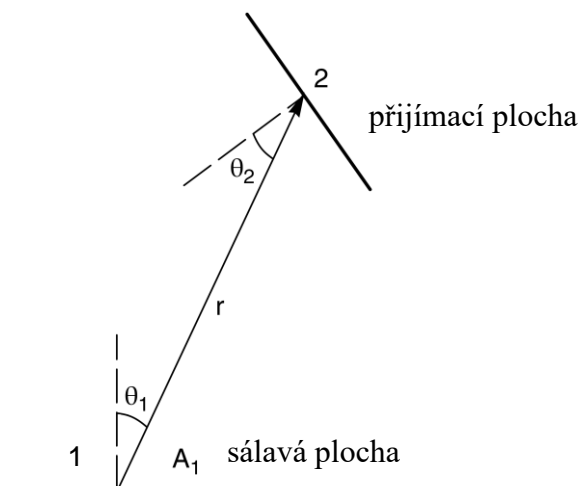
Složka čistého sálavého toku se stanoví ze vztahu

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4], \quad (16)$$

kde je  $\Phi$  polohový faktor, který určuje podíl z celkového sálavého tepla vycházejícího ze sálavého povrchu, který dopadá na danou přijímací plochu. Hodnota polohového faktoru závisí na velikosti sálajícího povrchu, na vzdálenosti mezi povrchy a na jejich vzájemné orientaci (viz Obrázek 26).  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ . Emisivita požáru se uvažuje jako  $\varepsilon_f = 1,0$ . Povrchovou emisivitu prvku lze počítat hodnotou  $\varepsilon_m = 0,7$  pro beton (pro zdivo a ostatní materiály se uvažuje  $\varepsilon_m = 0,8$ ).  $\theta_r$  je účinná teplota sálání prostředí požáru (lze uvažovat, že  $\theta_r = \theta_g$ ) a  $\theta_m$  je povrchová teplota konstrukce.



Důležitou veličinou v sálavé složce tepla je polohový faktor  $\Phi$ . Je to součinitel určující podíl celkového sálavého tepla, které vychází ze sálajícího povrchu a dopadá na přijímací plochu. Hodnota polohového faktoru závisí na velikosti sálavé plochy, na vzájemné vzdálenosti a orientaci obou ploch, viz Obrázek 26. Konzervativně lze polohový faktor uvažovat  $\Phi = 1,0$ , tato úvaha ovšem nepočítá se stíněním a vzájemnou polohou.



Obrázek 26 – Přenos sálavého tepla mezi dvěma plochami podle [7]

Polohový faktor je dán vztahem podle [7]

$$\Phi = \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1, \quad (17)$$

kde je  $A_1$  je sálavá plocha,  $r$  je vzdálenost mezi plochami,  $\theta_1$  a  $\theta_2$  jsou úhly mezi úsečkou 1-2 a normálami k plochám.

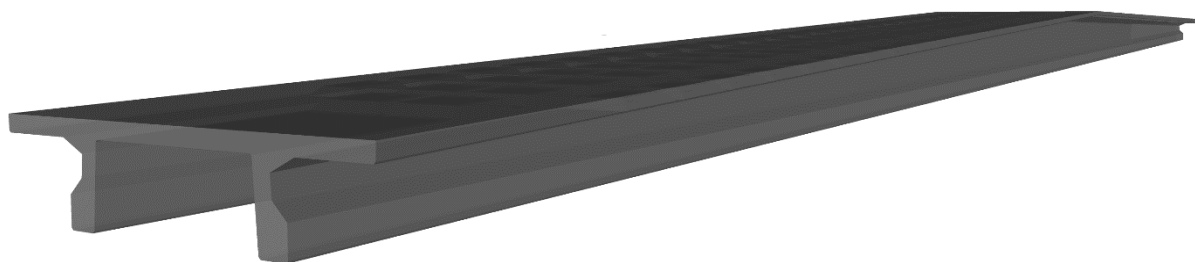
## 5 Teplotní analýza styku střešních panelů

Jedním z hlavních cílů diplomové práce je provedení teplotní analýzy styku dvou předpjatých TT panelů. Ve spáře mezi střešními panely je umístěn ocelový spoj, kterým jsou propojeny jednotlivé prefabrikáty mezi sebou a konstrukce tak tvoří tuhou střešní desku. Teplotní analýza se skládá ze dvou částí. V první části byl vytvořen numerický model výseku spáry, který byl zatěžován normovou teplotní křivkou. Ve druhé části byla konstrukce vyzkoušena v akreditované požární zkušebně PAVUS, a.s. Veselí nad Lužnicí.

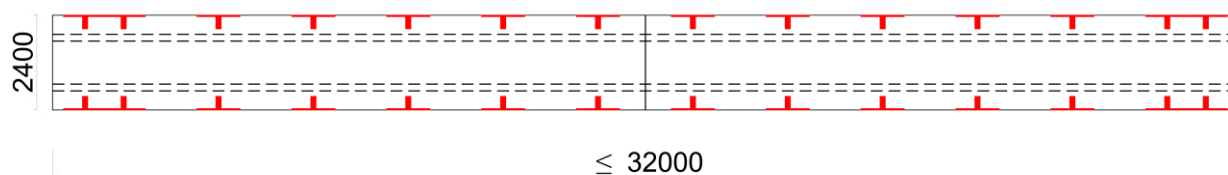
Styčná spára byla vymodelována ve dvou variantách. V první variantě byla ponechána volná spára a ocelový spoj byl tak přímo vystaven účinkům požáru. Ve druhé variantě byla spára lokálně požárně chráněna tepelnou izolací z minerální vlny, která tvoří protipožární ochranu spoje. Tato konstrukce byla následně na exponované straně zatížena normovou teplotní křivkou v souladu s ČSN EN 1991-1-2. Výsledkem teplotní analýzy jsou tzv. teplotní profily, tedy rozložení teploty po průřezu pro různé časy. Na základě zjištěných hodnot je možné redukovat mechanické vlastnosti materiálu redukčními součiniteli pro zvýšené teploty.

### 5.1 Střešní panel

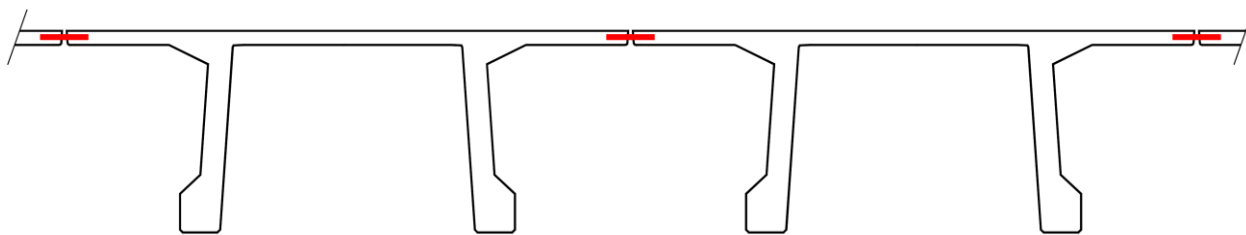
Jedná se o střešní sedlové předpjaté panely, které mají délku až 32 metrů, takže se navrhují především na objekty s velkým rozpětím (např. skladovací nebo výrobní haly, tělocvičny apod.). Tyto střešní prvky se ukládají převážně na obvodové stěny. Sklon střešního panelu je 2,5 %, viz Obrázek 27.



Obrázek 27 – Vizualizace střešního panelu



Obrázek 28 – Půdorys střešního panelu (červeně označeny spoje)

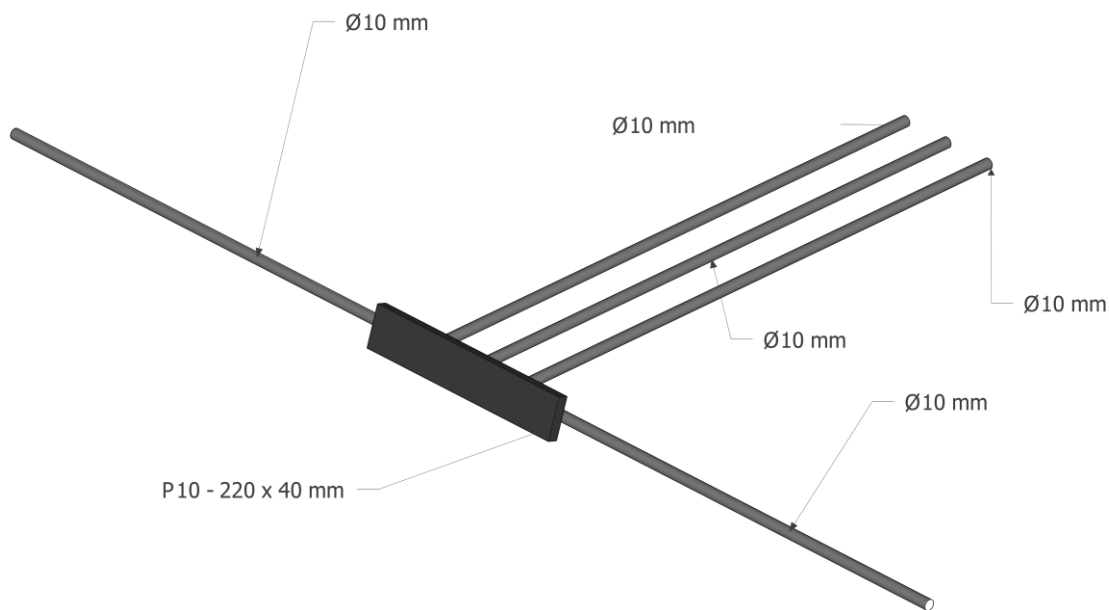


Obrázek 29 – Příčný řez střešními panelem (červeně označeny spoje)

Ve styčné spáře se nachází ocelový spoj, který se opakuje po délce panelu vždy po stejných vzdálenostech, viz Obrázek 28. Tento ocelový spoj sestává z kombinace betonářské výztuže a ocelových plechů.

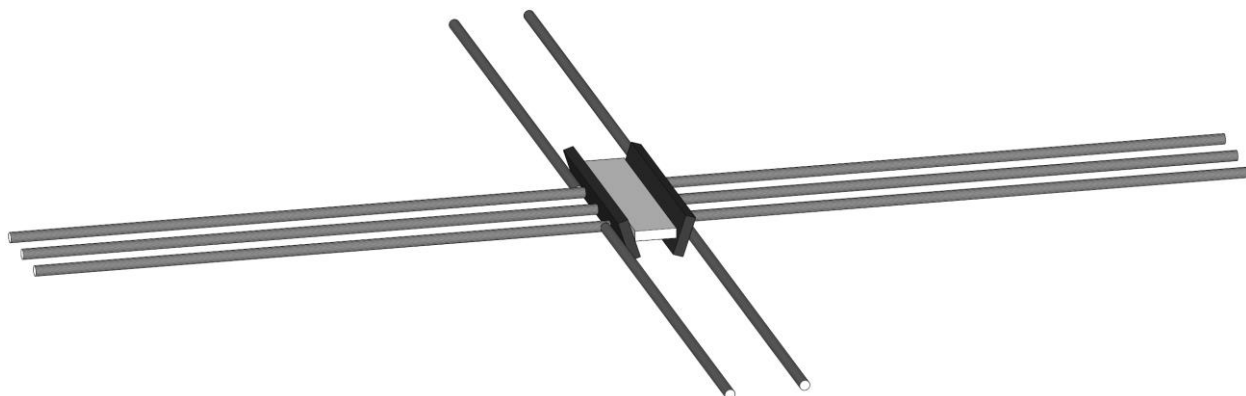
Tyto komponenty jsou mezi sebou vzájemně svařeny. Konkrétně se jedná o ocelový plech P10 s rozměry a betonářskou výztuž B500 B Ø10 mm. K tomuto plechu jsou pod úhlem 18° přivařeny 3 pruty betonářské výztuže a následně kolmo ke dvěma krajním prutům po jednom profilu, viz Obrázek 30 a Obrázek 31.

Takto předpřipravený ocelový svařenec je vkládán do bednění a následně zabetonován spolu s celým panelem.



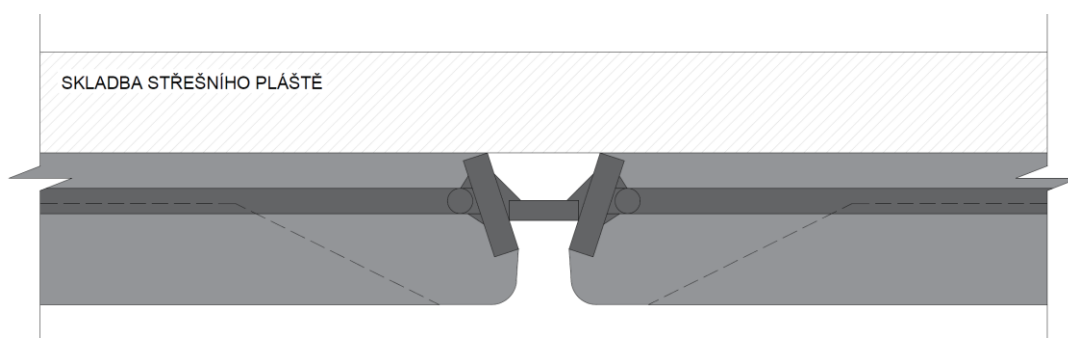
Obrázek 30 – Kotevní prvek

Tyto ocelové prvky k sobě po usazení panelu na stavbě přímo přiléhají a šířka spáry je dána přesností osazení prefabrikátu na podpory. Do této spáry je vložen ocelový plech P8, jehož šířka se odvíjí od skutečné šířky spáry, která se obvykle pohybuje v rozmezí 10–40 mm. Svar vodorovného plechu k šikmým čelům je nutné provést ve dvou vrstvách, aby bylo zabráněno nadměrnému tepelnému namáhání oceli.

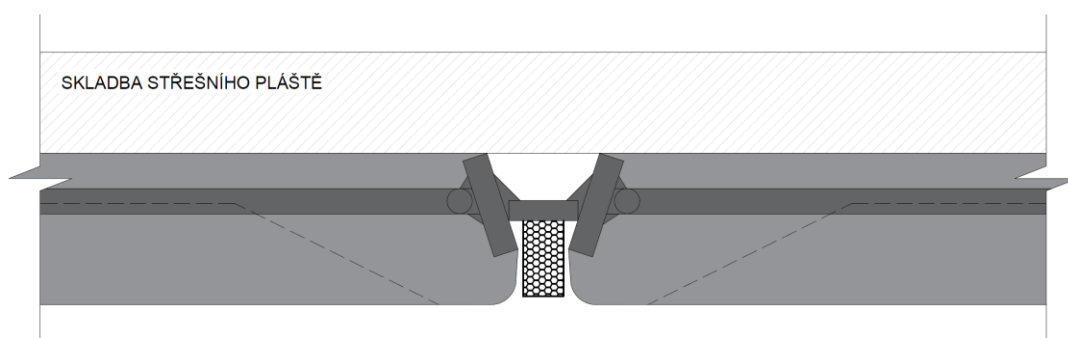


Obrázek 31 – 3D geometrie spoje – ocel

Detaily montážní spáry a ocelového spoje jsou patrné z Obrázek 32 a Obrázek 33.



Obrázek 32 – Detail ocelového spoje (neizolováno)



Obrázek 33 – Detail ocelového spoje (izolováno)

## 5.2 Numerický model

Složitost modelů popisujících transportní procesy ve stavebních konstrukcích vystavených požáru prakticky znemožňuje řešení těchto úloh analyticky. Proto se k tomuto účelu využívají numerické modely – např. metoda konečných prvků. Numerická řešení se provádí téměř výhradně pomocí výpočetní techniky.

Numerický model výseku konstrukce (Obrázek 75) byl vytvořen ve dvou výpočetních programech pro teplotní analýzu. Simulace proběhly pomocí programu ANSYS Mechanical ADPL 2019 [24] a pomocí programu TempAnalysis [25], oba programy numericky řeší parciální diferenciální rovnici nestacionárního vedení tepla, rovnici (13). Podkladem pro vyhotovení počítačových modelů byla výrobně technická dokumentace prefabrikovaných dílců a ocelového prvku.

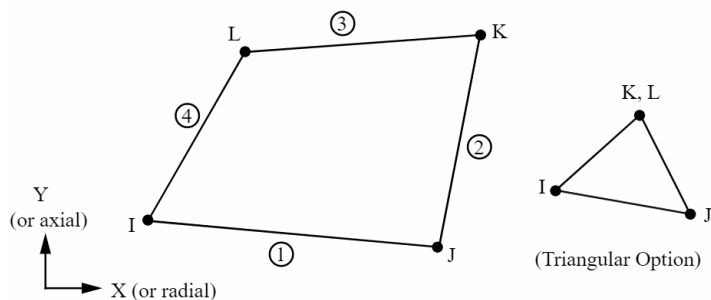
ANSYS [24] je obecně nelineární, simulační multifyzikální nástroj, který umožňuje uživateli řešit strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Vzájemná interakce těles je zajištěna pomocí pokročilých (lineárních i nelineárních) algoritmů. ANSYS umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale díky parametrizovaným výpočtovým modelům i citlivostní a optimalizační analýzy a rovněž výpočty spolehlivosti [26].

TempAnalysis [25] je program, který slouží k teplotní analýze libovolných průřezů. Materiálové vlastnosti lze v programu definovat pomocí konstantních, nebo teplotně závislých proměnných. Program umožňuje reprezentovat návrhový požární scénář pomocí normové nebo parametrické požární křivky podle přílohy A [21]. Diskretizace podle prostorových proměnných je prováděna metodou konečných prvků a časová diskretizace semiimplicitním schématem [27], [28].

### 5.2.1 Numerický model ANSYS

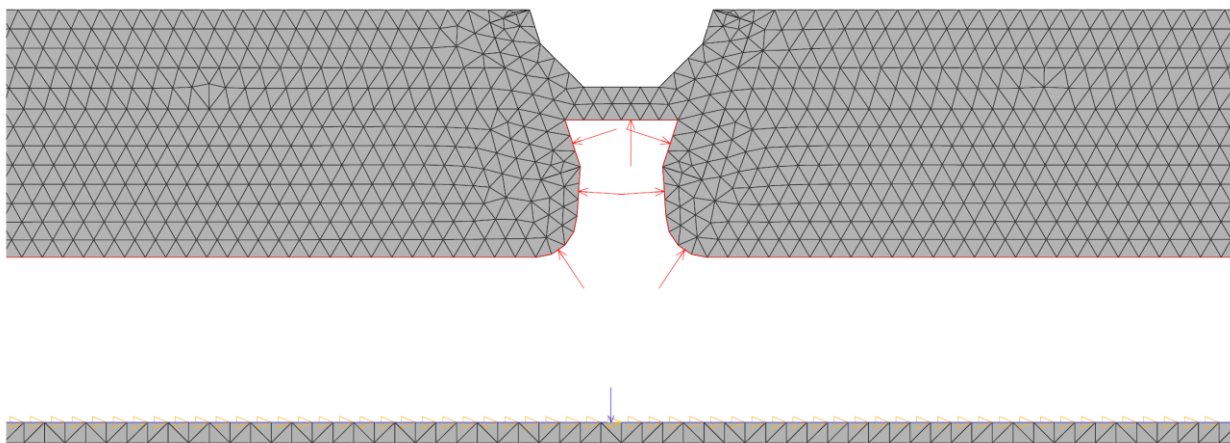
Pro modelování byl zvolen výsek spáry délky 700 mm (na každou stranu 350 mm od osy symetrie). Model byl vyhotoven ve dvou variantách – neizolovaný a izolovaný spoj.

Jako *Element Type*<sup>1</sup> byl zvolen prvek PLANE55, který má být podle [29] použit pro 2D neustálené vedení tepla v pevných látkách. Tepelný tok má být v tomto prvku modelován jako tepelné zatížení na daný povrch (Obrázek 34 – číslo v kroužku).



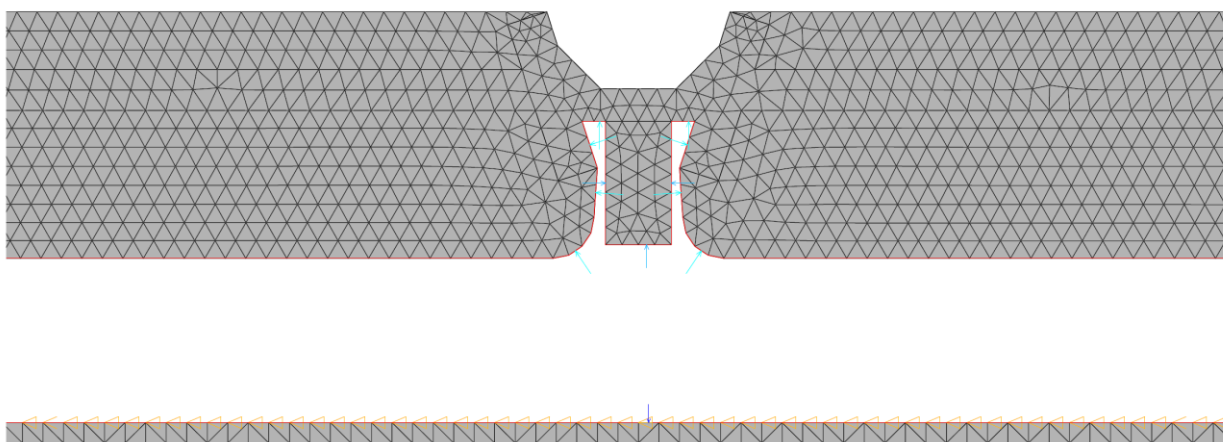
Obrázek 34 – Element Type PLANE55 [29]

ANSYS umožňuje přes příkaz *RDSF* (*surface-to-surface radiation*) vymodelovat okrajovou podmínku – sálavý povrch, který si vyměňuje radiační složku tepla s definovanými povrchy (Obrázek 35 – červené šipky, Obrázek 36 – modré šipky), probíhá tak společně s příkazem *VFOPT* (*specify options for the view factor calculation*) přímý výpočet polohového faktoru pro každý krok výpočtu. Konvektivní složka tepla byla zadána přímo na exponovaný povrch příkazem *CONV*. Dle čl. 4.6.1.2 [29] musí být v případě sálavého tělesa vytvořen *Space node* pro zachycení záření, které by dopadalo mimo uzavřený systém.



Obrázek 35 – Surface-to-surface radiation – neizolováno

<sup>1</sup> Element type je přednastavený výpočtový model, který je určen pro konkrétní druh analýzy (např. teplotní analýza, analýza proudění tekutin, elektromagnetická analýza apod.)

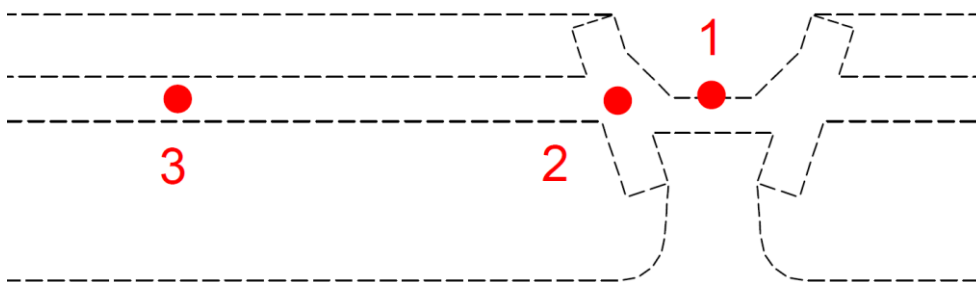


Obrázek 36 – Sufrace-to-surface radiation – izolováno

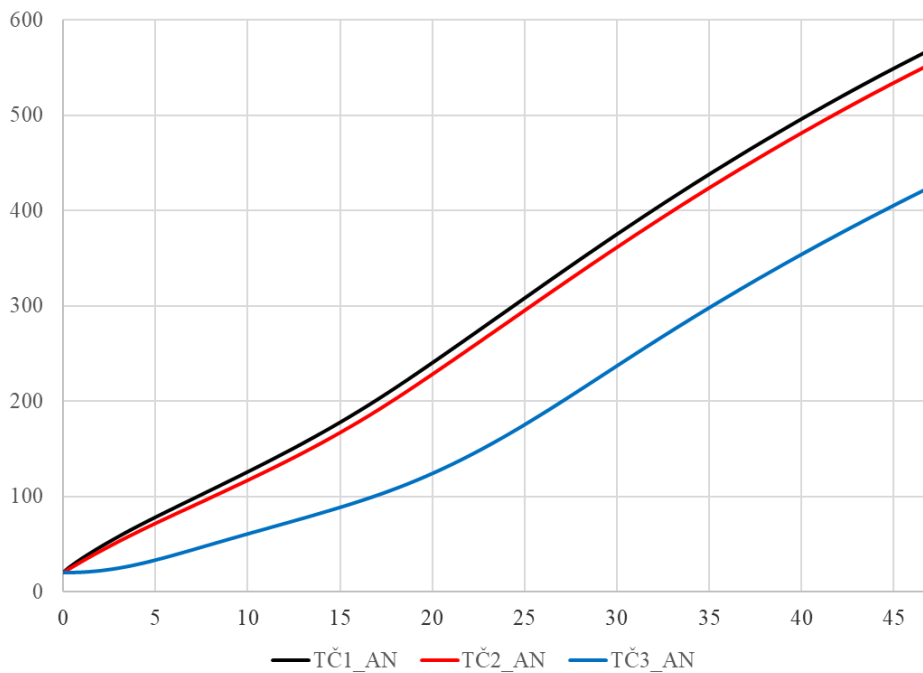
Vytvoření výpočetní sítě bylo provedeno automaticky integrovaným generátorem. Výpočetní oblast  $\Omega_1$  byla diskretizována na 2257 prvků pro neizolovanou variantu a 2305 prvků pro variantu s tepelnou izolací. Velikost jednoho prvku je 5 mm. Pro porovnání byla výpočetní oblast diskretizována na prvky o velikosti 2 mm, resp. 10 mm. Výsledky ale ukázaly, že dělit oblast na jemnější síť není nutné. Naopak hrubší síť již nepokryla vyšetřované body konstrukce a poskytovala odlišné výsledky. Síť o velikosti 5 mm je z hlediska přesnosti výsledků a délky výpočetního času dostatečná. Výpočetní čas byl zvolen stejně jako u experimentu na 46 minut, tj. 2760 sekund.

Model byl vytvořen ze dvou, resp. tří materiálů – beton, ocel a minerální vlna. Materiálové charakteristiky byly zadány jako teplotně závislé (viz kap. 3).

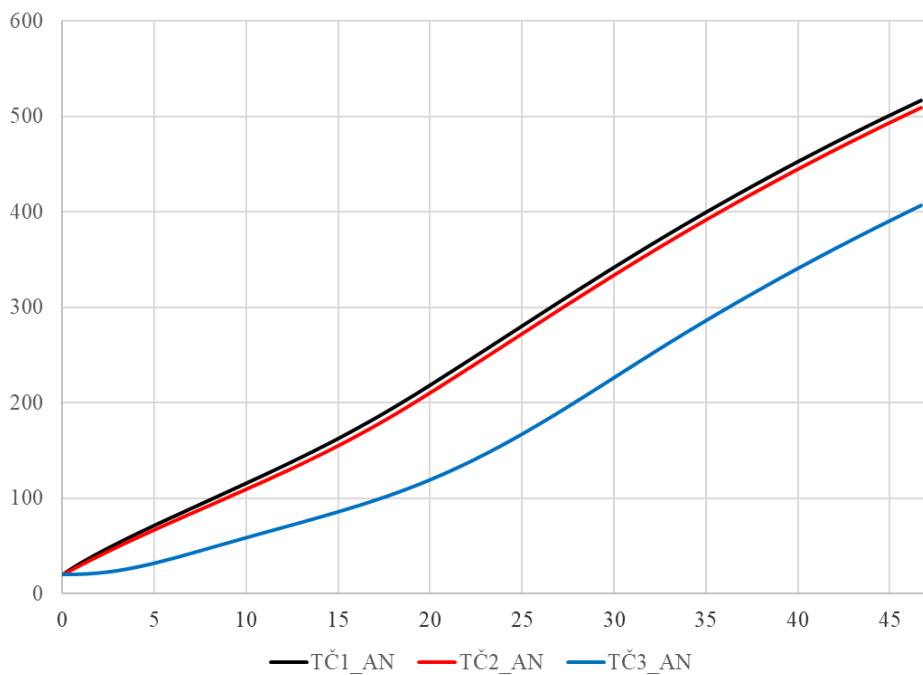
Výsledkem teplotní analýzy je průběh teplot (Obrázek 38 a Obrázek 39) ve zkoumaných částech konstrukce. Do modelu byly vloženy celkem tři termočlánky, které zaznamenávaly průběh teploty v čase. Termočlánek byl umístěn na střed vodorovné stykovací desky (TČ1), dále pak do středu šikmého plechu, který je zabetonován v panelu (TČ2) a také do osy betonářské výztuže 100 mm od svislé osy  $y$  (souřadnice  $x = 0,1$  m). Umístění termočlánků, viz Obrázek 37. Stejně umístění termočlánků platí pro neizolovanou i izolovanou variantu.



Obrázek 37 – Poloha termočlánků

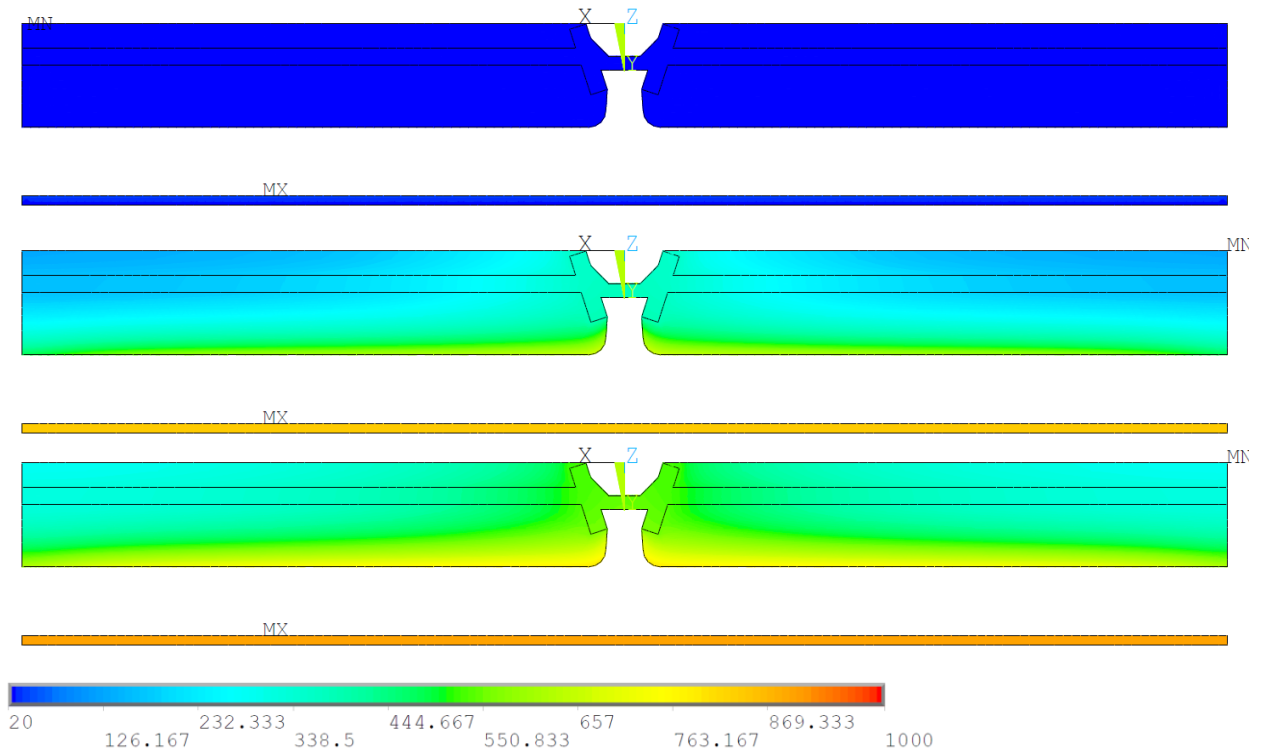


Obrázek 38 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – neizolovaná spára – program ANSYS

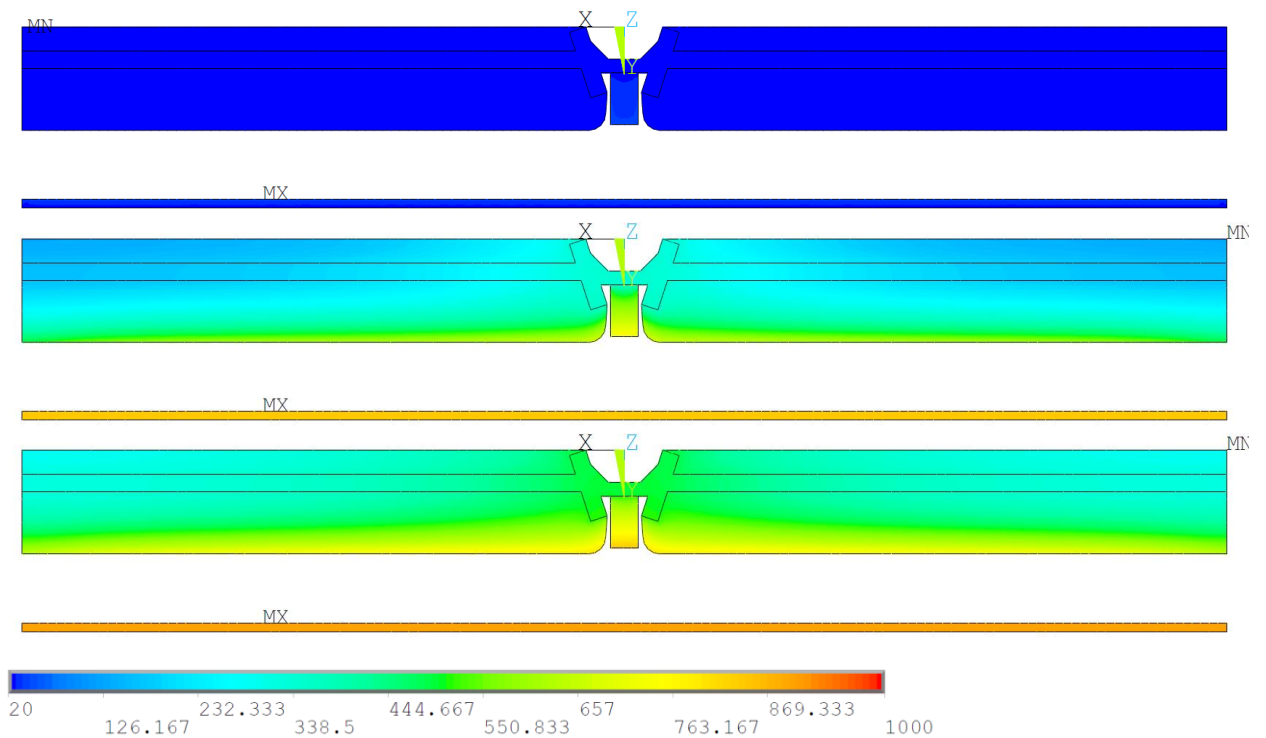


Obrázek 39 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – izolovaná spára – program ANSYS





Obrázek 40 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – neizolovaná spára – program ANSYS



Obrázek 41 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – izolovaná spára – program ANSYS

Hodnoty naměřené numerickým modelem ANSYS jsou pro obě varianty popsány v tabulce.

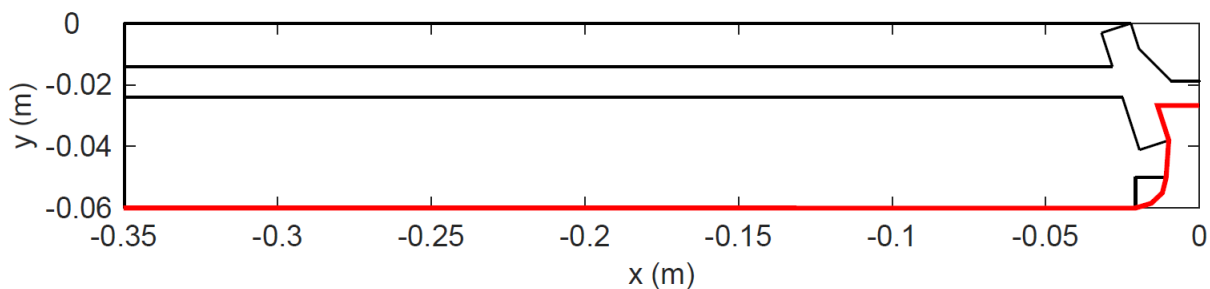
Tabulka 5 - Teploty v numerickém modelu ANSYS

Numerický model ANSYS						
Čas	Neizolovaná spára			Izolovaná spára		
	TČ1	TČ2	TČ3	TČ1	TČ2	TČ3
[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	20	20	20	20	20	20
15	178	167	88	163	155	86
30	376	362	237	343	334	227
45	550	534	405	502	494	391

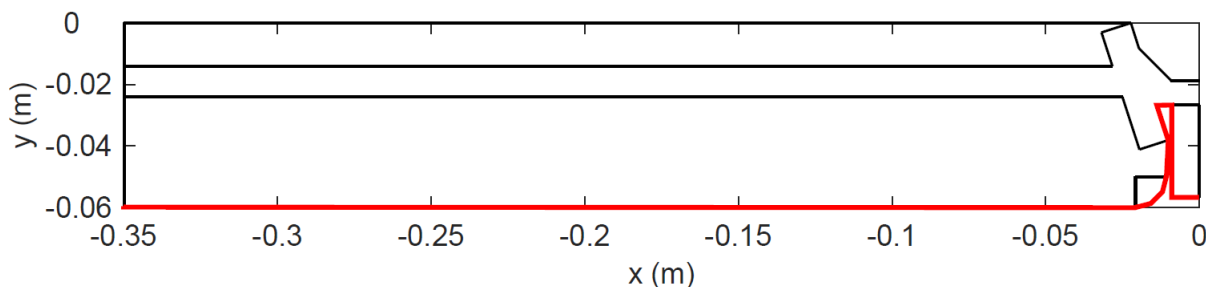
### 5.2.2 Numerický model TempAnalysis

Na rozdíl od numerického modelu ANSYS bylo v případě TempAnalysis využito symetrie. Geometrie vzorku i okrajové podmínky, které jsou zadány do výpočtu, jsou symetrické, proto mohla být vymodelována pouze jeho polovina. Svislou osu symetrie tvoří osa y, které je vedena přímo středem vodorovné stykovací desky. Geometrie byla do programu TempAnalysis zadána pomocí dvouřizměrných souřadnic [x;y], a byly vymodelovány obě varianty spáry.

Zatížení normovou teplotní křivkou, včetně okrajových podmínek, bylo zadáno přímo na exponovaný povrch (viz Obrázek 42, Obrázek 43 – červená čára).

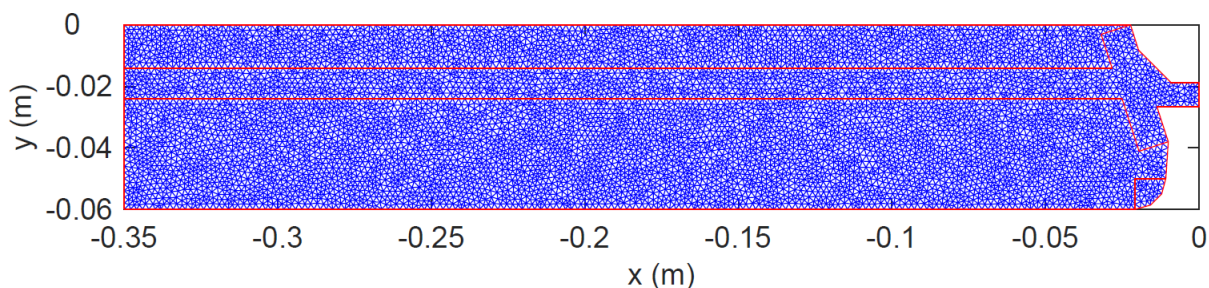


Obrázek 42 – Geometrie modelu + zatížení – neizolovaná spára

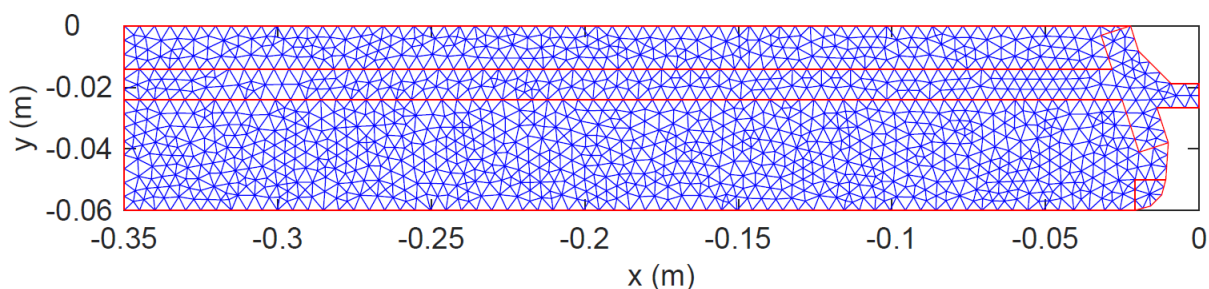


Obrázek 43 – Geometrie modelu + zatížení – izolovaná spára

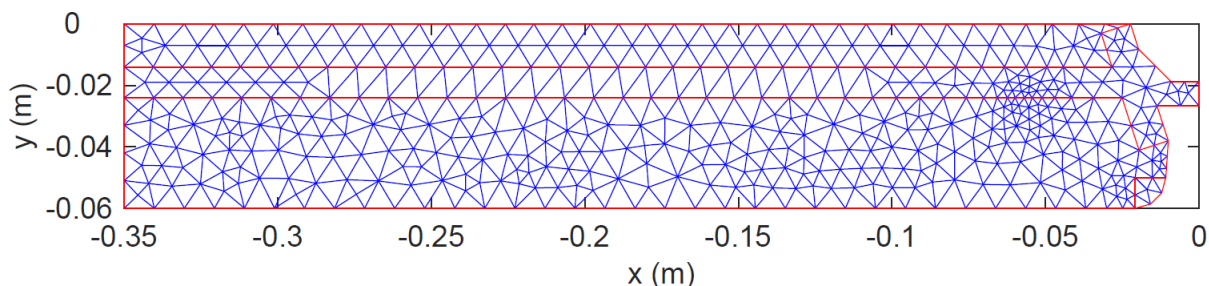
Tato výpočetní oblast  $\Omega_2$  byla diskretizována na síť konečných prvků s velikostí prvku rovněž maximálně 5 mm. Výpočetní síť lineárních trojúhelníkových konečných prvků byla vygenerována automaticky v programu MATLAB pomocí funkce *initmesh*. Celkem tedy bylo použito pro variantu bez tepelné izolace 2860 výpočetních prvků a pro variantu s tepelnou izolací 2881 prvků. Stejně jako u předchozího modelu byly vyzkoušeny tři varianty velikosti prvků – 2 mm, 5 mm a 10 mm (Obrázek 44, Obrázek 45, Obrázek 46).



Obrázek 44 – Diskretizace oblasti  $\Omega_2$ , velikost prvku 2 mm

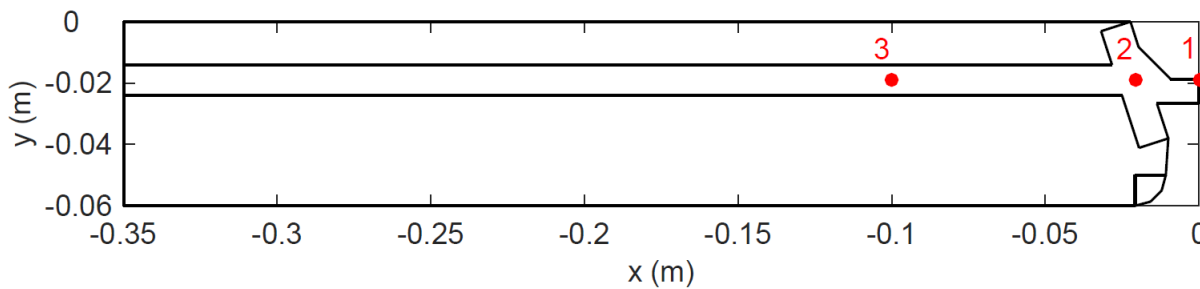


Obrázek 45 – Diskretizace oblasti  $\Omega_2$ , velikost prvku 5 mm

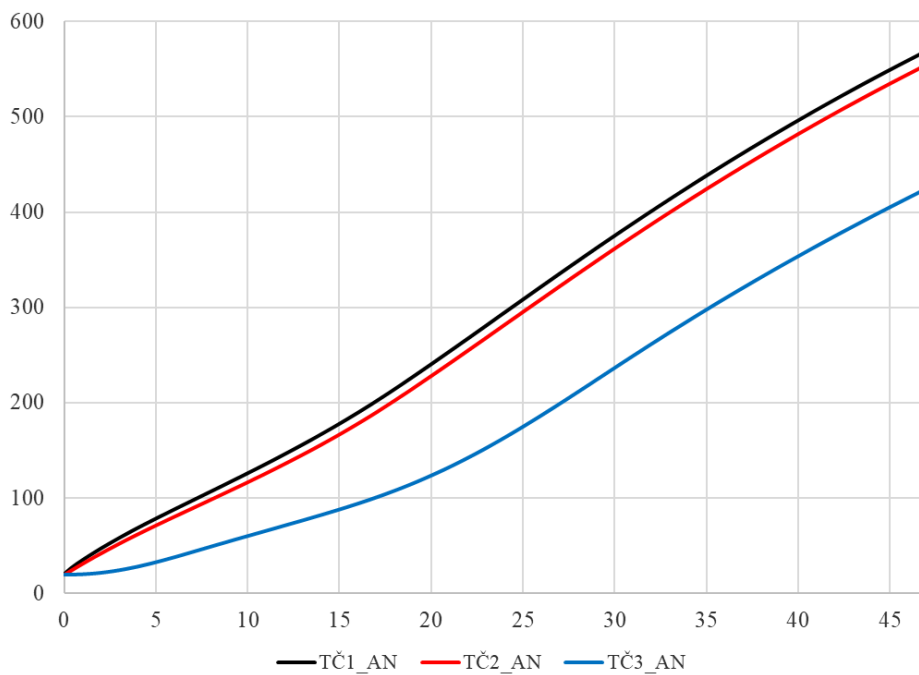


Obrázek 46 – Diskretizace oblasti  $\Omega_2$ , velikost prvku 10 mm

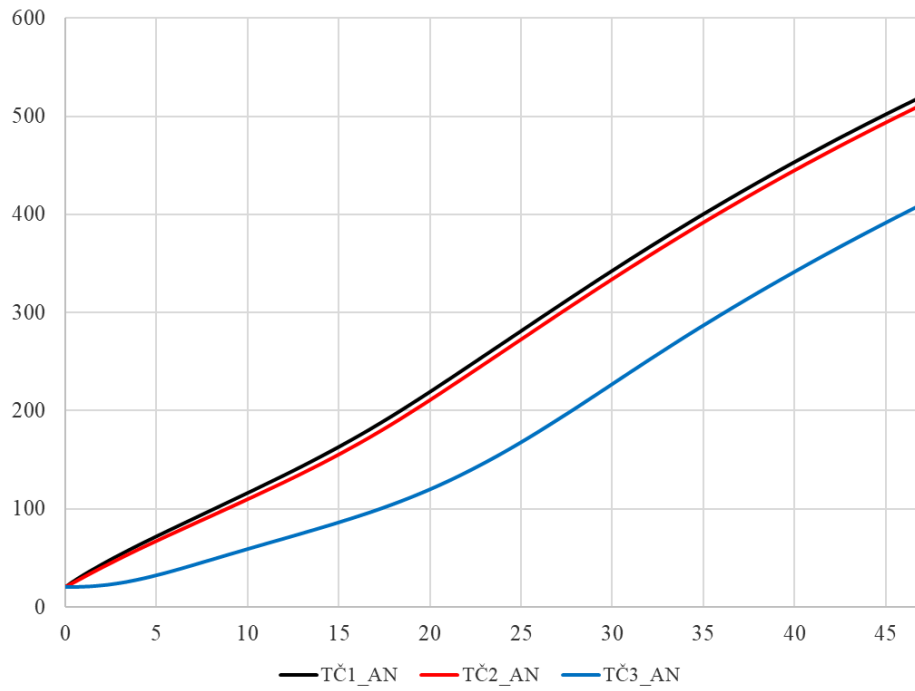
Stejně jako v předchozím případě byly do modelu vloženy tři termočlánky, které zaznamenávaly průběh teploty v čase, viz Obrázek 48 a Obrázek 49. Umístění termočlánků a jejich poloha je shodná s modelem ANSYS, viz Obrázek 47.



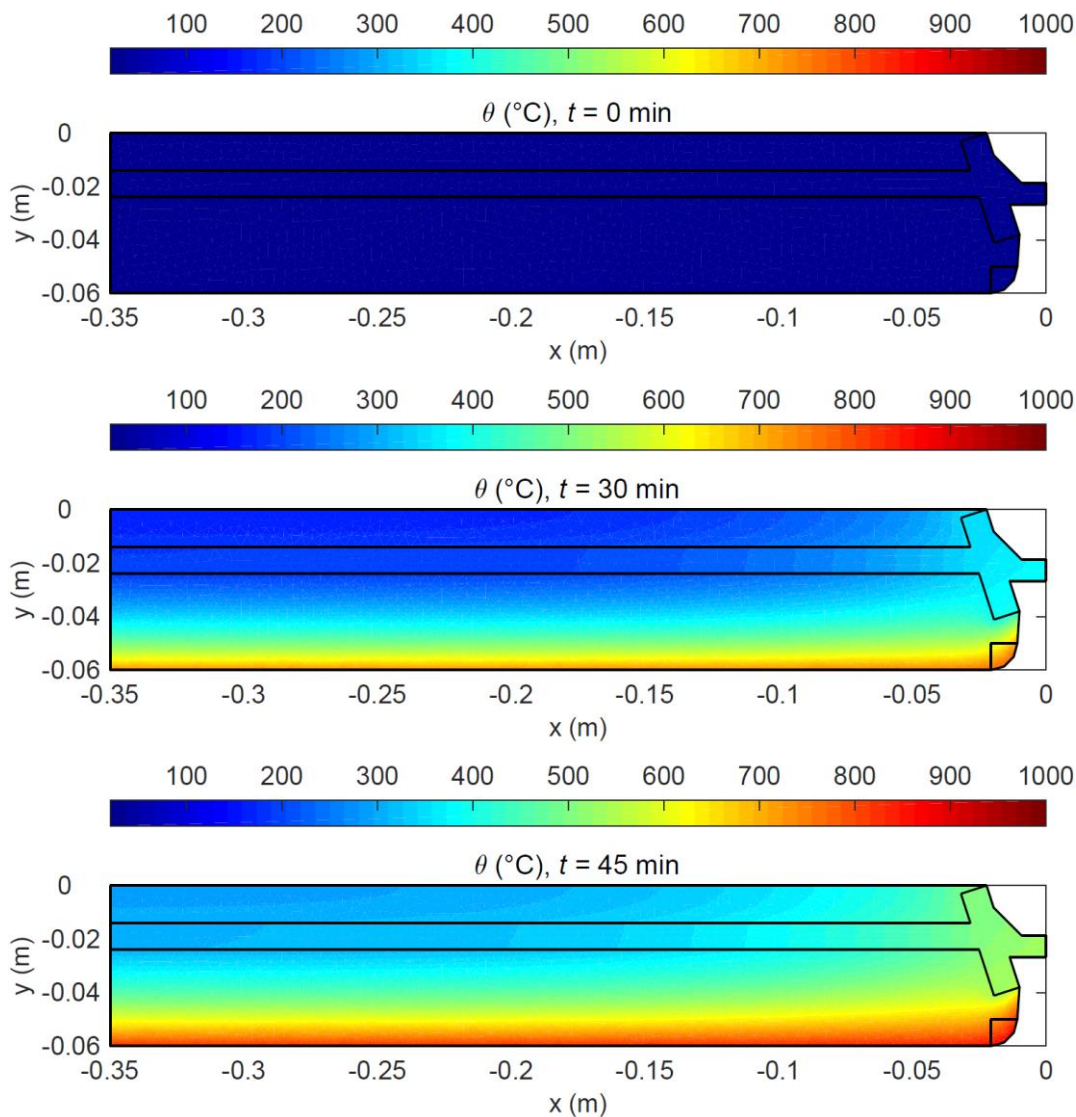
Obrázek 47 – Umístění termočlánků v numerickém modelu TempAnalysis



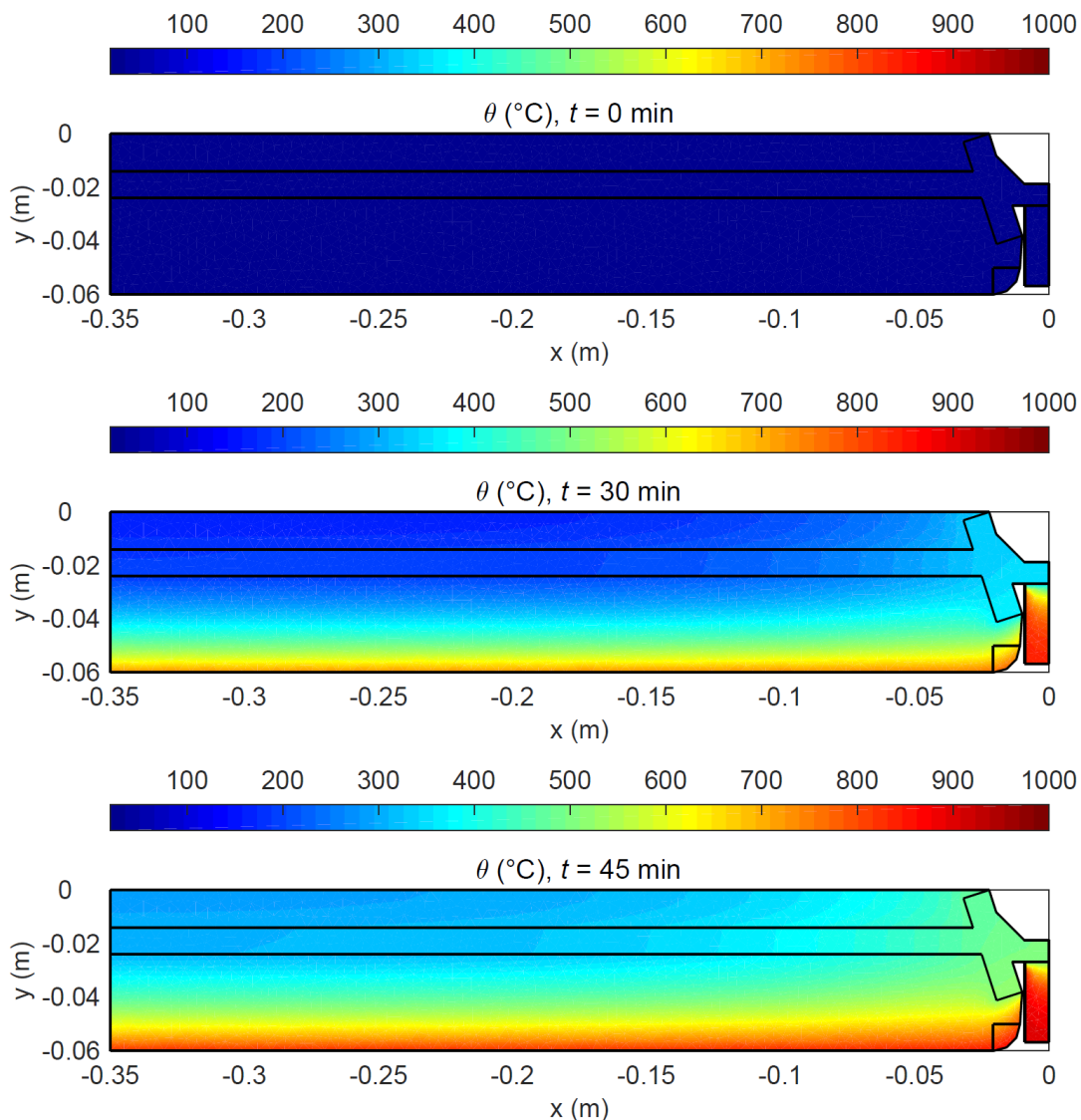
Obrázek 48 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – neizolovaná spára – program TempAnalysis



Obrázek 49 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – izolovaná spára – program TempAnalysis



Obrázek 50 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – neizolovaná spára – program TempAnalysis



Obrázek 51 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – izolovaná spára – program TempAnalysis

Hodnoty naměřené numerickým modelem TempAnalysis jsou pro obě varianty popsány v Tabulce 6.

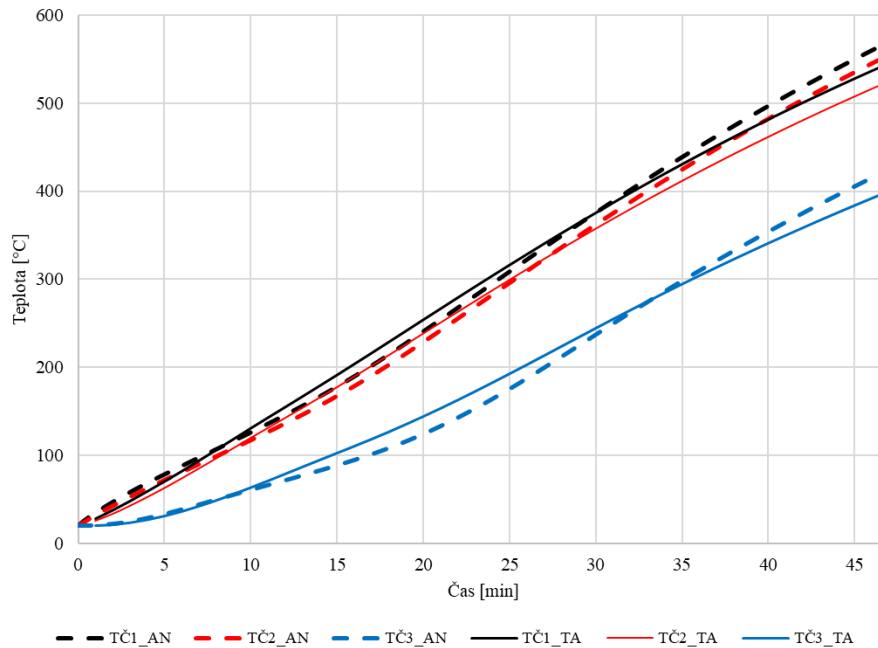
Tabulka 6 – Teploty v numerické modelu TempAnalysis

Numerický model TempAnalysis						
Čas	Neizolovaná spára			Izolovaná spára		
	TČ1	TČ2	TČ3	TČ1	TČ2	TČ3
[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	20	20	20	20	20	20
15	191	177	103	174	165	100
30	375	357	244	348	337	237
45	528	507	383	496	483	374

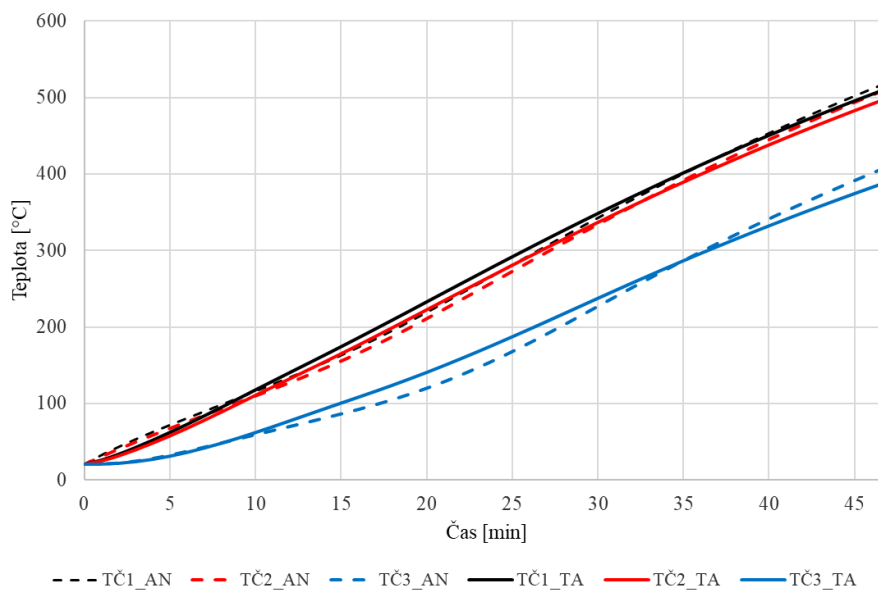


### 5.2.3 Vyhodnocení

Z uvedených výsledků stanovených pomocí obou numerických modelů je patrné, že nejvyšší teplota v nechráněném ocelovém spoji dosahuje ve 45. minutě v modelu ANSYS hodnoty 550 °C, oproti tomu varianta, která je izolována dosahuje maximálních teplot ve spoji přibližně 502 °C. Model TempAnalysis dosáhl ve stejném čase nejvyšší teploty v nechráněném spoji 528 °C, izolovaný spoj měl nejvyšší teplotu 496 °C. Na základě těchto naměřených hodnot by měly být redukovány mechanické vlastnosti materiálů.



Obrázek 52 – Porovnání průběhu teplot (ANSYS čárkovaně, TempAnalysis plně) – neizolovaná spára



Obrázek 53 – Porovnání průběhu teplot (ANSYS čárkovaně, TempAnalysis plně) – izolovaná spára



V níže uvedených tabulkách jsou shrnuty redukční součinitele pro účinnou mez kluzu a modul pružnosti pro uhlíkovou ocel podle [18] (Tabulka 3.1). Dále redukce pevnosti a modulu pružnosti pro betonářskou ocel tvářenou za studena podle ČSN EN 1992-1-2 (Tabulka 3.2a).

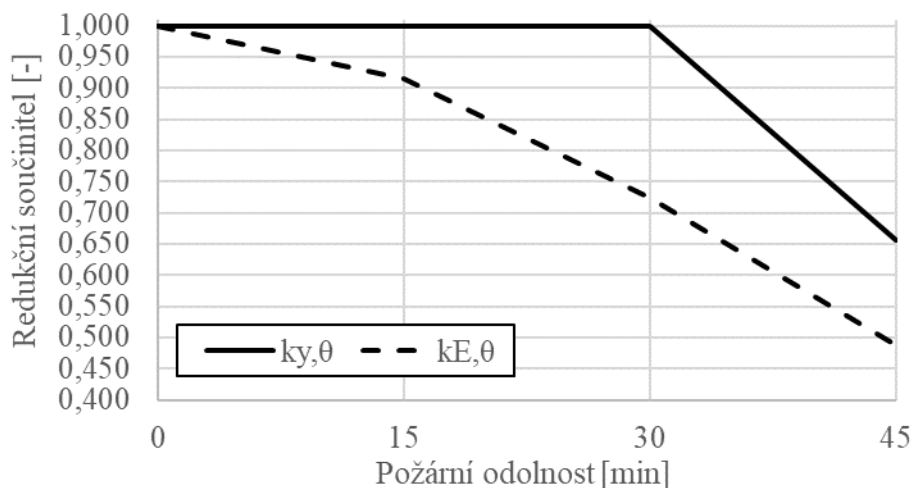
Tabulka 7 – Redukční součinitele stanovené pro numerický model ANSYS

Numerický model ANSYS												
Požadovaná požární odolnost [min]	Neizolovaná spára						Izolovaná spára					
	Ocelový plech 1 (TČ1)		Ocelový plech 2 (TČ2)		Betonářská ocel (TČ3)		Ocelový plech 1 (TČ1)		Ocelový plech 2 (TČ2)		Betonářská ocel (TČ3)	
Redukční součinitel	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{s,\theta}$	$k_{Es,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{s,\theta}$	$k_{Es,\theta}$
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
15	1,000	0,922	1,000	0,933	1,000	1,000	1,000	0,937	1,000	0,945	1,000	1,000
30	1,000	0,724	1,000	0,738	0,862	0,814	1,000	0,757	1,000	0,766	0,873	0,829
45	0,624	0,455	0,670	0,499	0,578	0,551	0,770	0,595	0,790	0,606	0,708	0,574

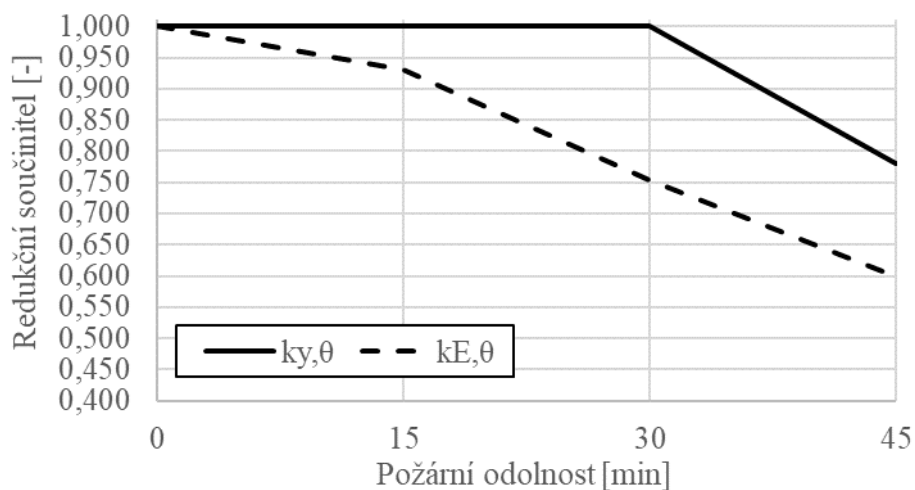
Tabulka 8 – Redukční součinitele stanovené pro numerický model TempAnalysis

Numerický model TempAnalysis												
Požadovaná požární odolnost [min]	Neizolovaná spára						Izolovaná spára					
	Ocelový plech 1 (TČ1)		Ocelový plech 2 (TČ2)		Betonářská ocel (TČ3)		Ocelový plech 1 (TČ1)		Ocelový plech 2 (TČ2)		Betonářská ocel (TČ3)	
Redukční součinitel	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{s,\theta}$	$k_{Es,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{s,\theta}$	$k_{Es,\theta}$
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
15	1,000	0,908	1,000	0,922	0,997	0,996	1,000	0,926	1,000	0,935	1,000	0,999
30	1,000	0,725	1,000	0,743	0,856	0,803	1,000	0,751	1,000	0,763	0,863	0,814
45	0,690	0,519	0,756	0,578	0,716	0,586	0,789	0,604	0,817	0,617	0,726	0,601

Hodnoty redukčních součinitelů v závislosti na požadované požární odolnosti jsou uvedeny na Obrázku 54 a 55.



Obrázek 54 – Hodnota redukčních součinitelů v závislosti na požadované PO (neizolovaná spára v místě TČ1 – průměr hodnot z obou numerických modelů)

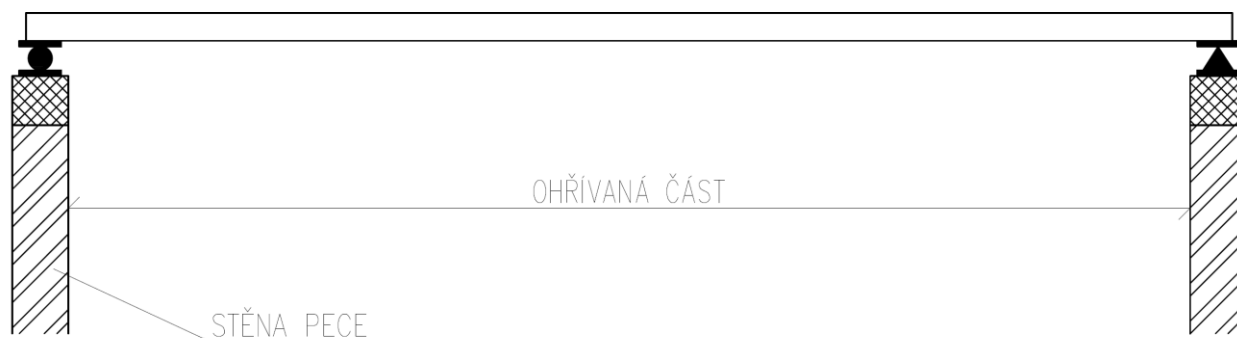


Obrázek 55 – Hodnota redukčních součinitelů v závislosti na požadované PO (izolovaná spára v místě TČ1 – průměr hodnot z obou numerických modelů)

### 5.3 Požární experiment

Jednou z možností ověření požární odolnosti je provedení požární zkoušky v akreditované požární laboratoři podle zkušebních norem. Při zkoušení požární odolnosti v požárních zkušebnách se posuzovaná konstrukce vystavuje požáru podle nominální normové křivky. Zkušební pece jsou obvykle vytápěny topnými oleji, naftou nebo směsí plynů. Vzhledem k tomu, že výpočtem nelze postihnout veškeré aspekty požární odolnosti – například celistvost, odpadávání částí konstrukce, trhliny apod., jsou požární zkoušky vždy pro stanovení požární odolnosti velice důležité [3]. Požární zkouška ale také nemusí zcela vystihnout chování konstrukce při skutečném požáru. Požární zkušebny mají jistá omezení, například velikost zkušebních pecí nebo možnost zatěžování zkušebního vzorků – z těchto důvodů může být při požární zkoušce konstrukce zmenšena, musí ale splňovat minimální rozměry (např. pro stropní a střešní konstrukce musí mít podle [30] minimální ohřívaný rozměr alespoň 3×4 m). Mohou také nastat jiné okrajové podmínky (vetknutí, pevný kloub, spojitý nosník apod.) než když je část konstrukce zabudována. Proto se v ojedinělých případech zkouší požární odolnost na skutečných stavebních objektech nebo jejich částech, kdy se požár simuluje hranolovým řezivem. Takto rozsáhlé požární zkoušky jsou ovlivněny okolním prostředím (teplota, vítr, vlhkost, tlak vzduchu atd.). Požární experimenty jsou oproti teoretickým výpočtům mnohonásobně nákladnější [3].

V požárních zkušebnách se požární odolnost zkouší ve zkušebních pecích (Obrázek 56). Tato zkušební zařízení se skládají ze samotné zkušební komory, zkušebního rámu, topného systému (hořáky), měřicích zařízení a zatěžovacího zařízení [32]. Během požární zkoušky je nutné dbát na teplotu, tlak a atmosféru v peci.



Obrázek 56 – Podélný řez zkušební pecí (příklad) podle [30]

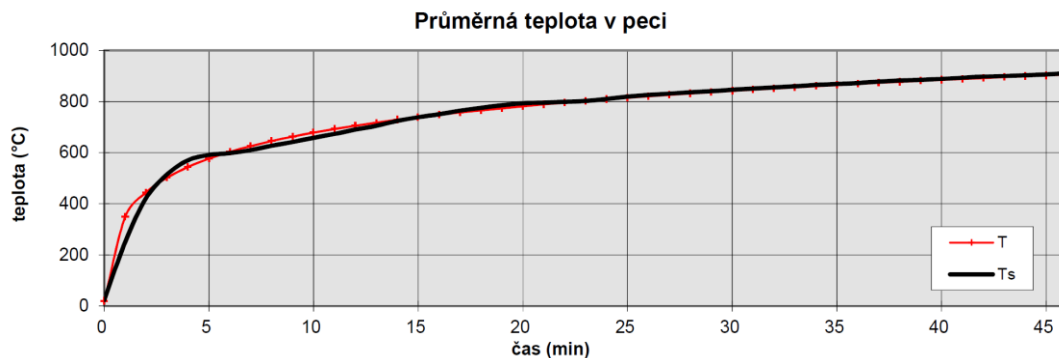
Při zkoušení požární odolnosti je třeba vycházet z platných evropských zkušebních a následně klasifikačních norem. Na základě klasifikačních norem se klasifikuje požární odolnost stavební konstrukce. Používají se následující písmenná označení: R, E, I, W, M, C, S atd. (viz kap. 2.2).

Cílem požárního experimentu v akreditované požární laboratoři PAVUS, a.s. ve Veselí nad Lužnicí bylo ověřit, jaká bude teplota na ocelovém spoji, který mezi sebou propojuje dva prefabrikované stropní panely. Předmětem požárního experimentu byly dvě varianty spojů – nechráněný spoj a spoj chráněný tepelnou izolací. Autor této práce se podílel na návrhu, přípravě, záznamu a vyhodnocení požárního experimentu. Veškerá data z průběhu experimentu byla poskytnuta akreditovanou požární laboratoří PAVUS, a.s.

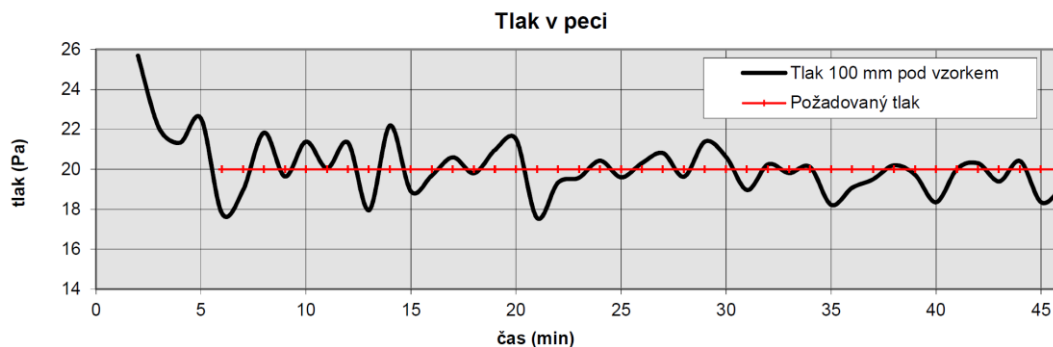
### 5.3.1 Zkušební pec

Experiment byl proveden v horizontální peci s vnitřními půdorysnými rozměry  $4,0 \times 3,0$  m a výškou 2,16 m. Zkušební pec je vytápěna osmi hořáky, čtyři po obou delších stranách. Jako palivo v peci slouží nafta. Teplota v peci je řízena pomocí osmi deskových termočlánků, které jsou umístěny 100 mm pod zkoušenou konstrukcí. Přetlak v peci je měřen diferenčním manometrem ve výšce 1,38 metru nad podlahou. Regulace tlaku probíhá přes otvor v podlaze, ve kterém je umístěn ventilátor, který odtahuje nežádoucí tlak potrubím mimo pec [31].

Během zkoušky, která trvala 47 minut se podle čl. 5.1.2 [32] smí pohybovat maximální odchylka teploty v ploše pod křivkou do 15 %. Maximální naměřená odchylka během experimentu byla v 5. minutě -2,5 %. Rozdíl tlaků během zkoušky je dán zkušební normou [32], která udává rozdíl tlaků 20 Pa. Maximální odchylka je dle čl. 5.2.1 [32]  $\pm 5$  Pa pro prvních 5 minut zkoušky a dále pak  $\pm 3$  Pa. Největší odchylka byla naměřena taktéž v 5. minutě experimentu +2,5 Pa.



Obrázek 57 – Průměrná teplota v peci

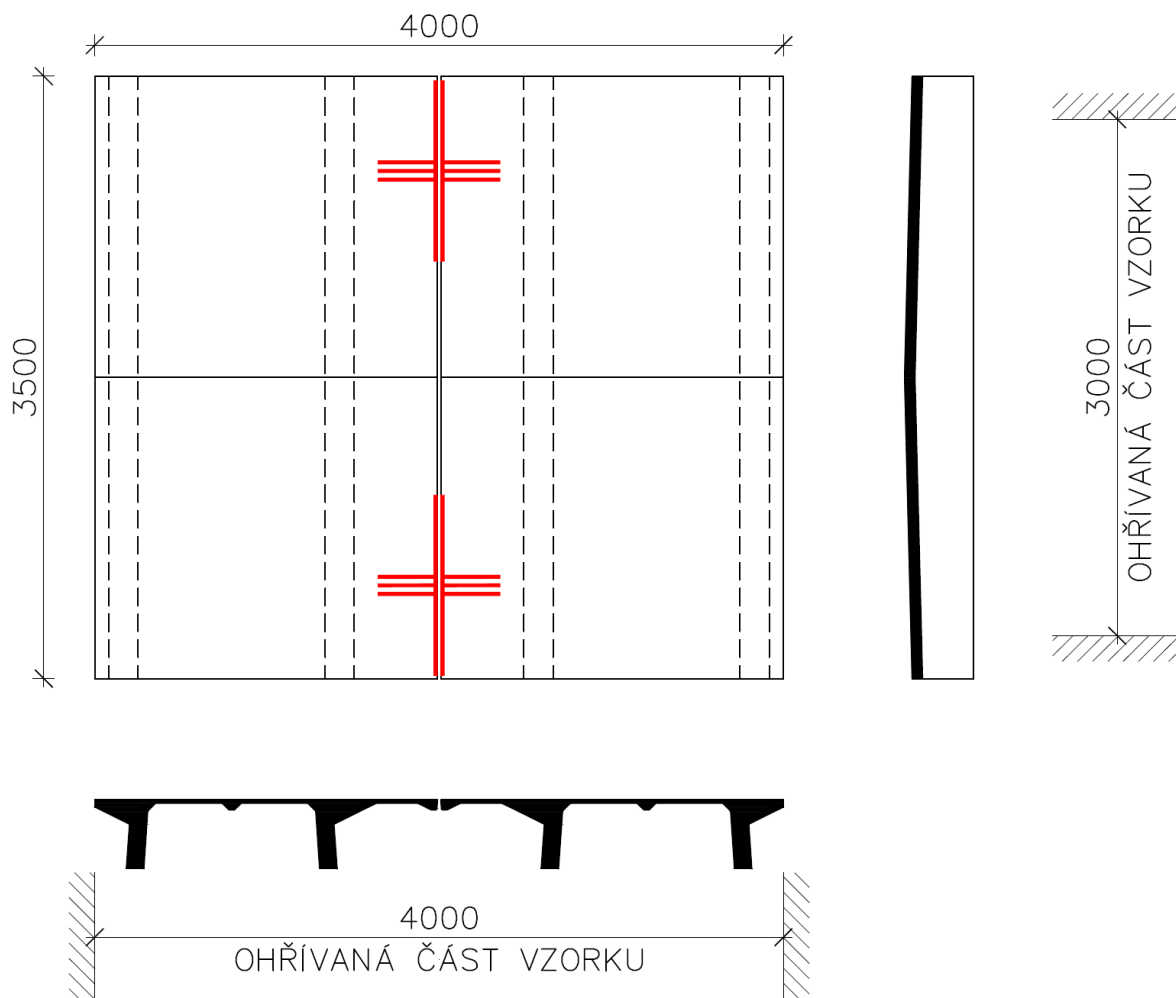


Obrázek 58 – Tlak v peci

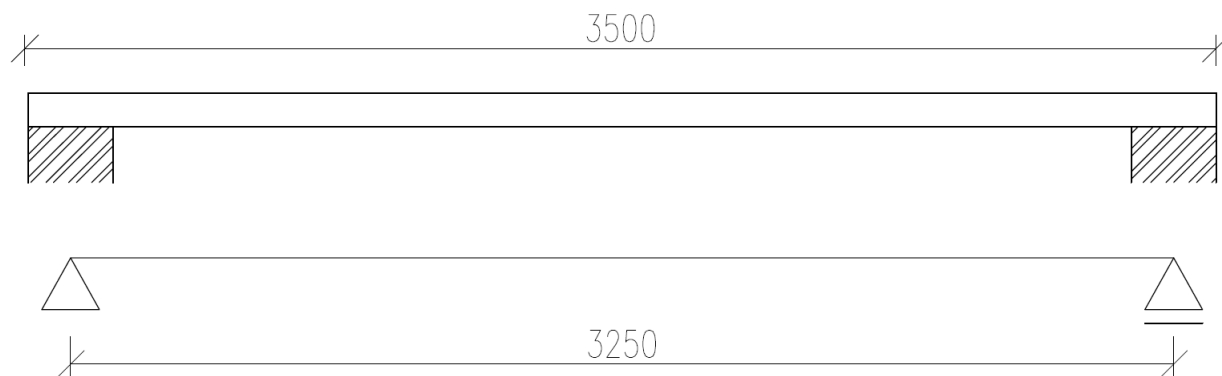
### 5.3.2 Zkouška požární odolnosti

Vzhledem k omezené velikosti vodorovné zkušební pece v požární zkušebně musely být běžně používané prefabrikované dílce upraveny na požadovaný rozměr. Cílem této zkoušky bylo ověření chování dvou variant ocelových spojů a také ověření dvou různých skladeb střešního pláště. Zkušební vzorek střešní konstrukce nebyl zkoušen jako vodorovná nosná konstrukce, vznikly proto atypicky vyztužené panely (viz Obrázek 59), které přenášejí pouze vlastní tíhu, tíhu střešního pláště a náhradní břemena, která stabilizovala střešní skladby. Toto přitížení mělo hodnotu přibližně  $0,45 \text{ kN/m}^2$ . Statické schéma experimentu, viz Obrázek 60.

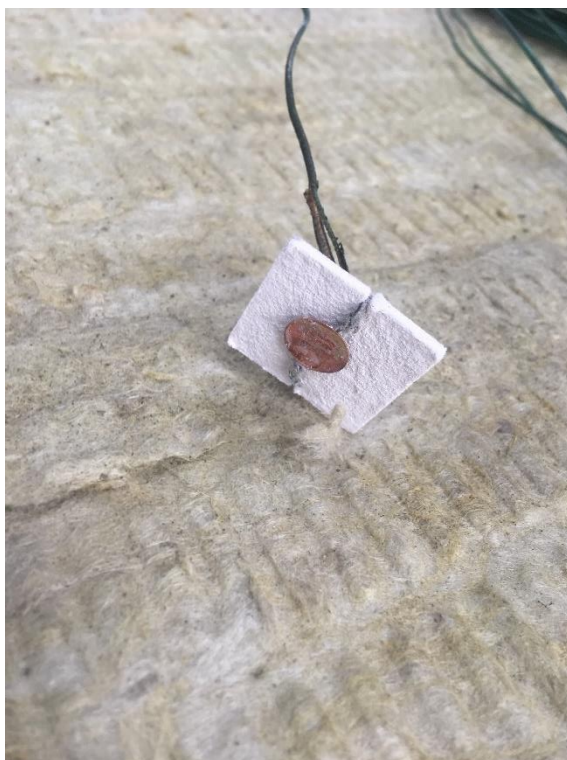
Na posuzovanou konstrukci bylo umístěno celkem 54 drátových termočlánků typu K. Měřicí spoje termočlánků byly připájeny k měděným terčům o tloušťce  $0,2 \text{ mm}$  a průměru  $12 \text{ mm}$ . Tyto termoelektrické články byly překryty izolační krytkou na bázi silikátových vláken o rozměrech  $30 \times 30 \times 2 \text{ mm}$ , podle čl. 4.5.1.2 [32] (Obrázek 61, Obrázek 62). Poloha termočlánků byla zkontrolována před zahájením zkoušky. Teplota okolí během zkoušky byla měřena jedním plášťovým termočlánkem typu K, který musí být z důvodu ochrany před sáláním a průvanem umístěn v soustavě dvou sousedních plastových trubek.



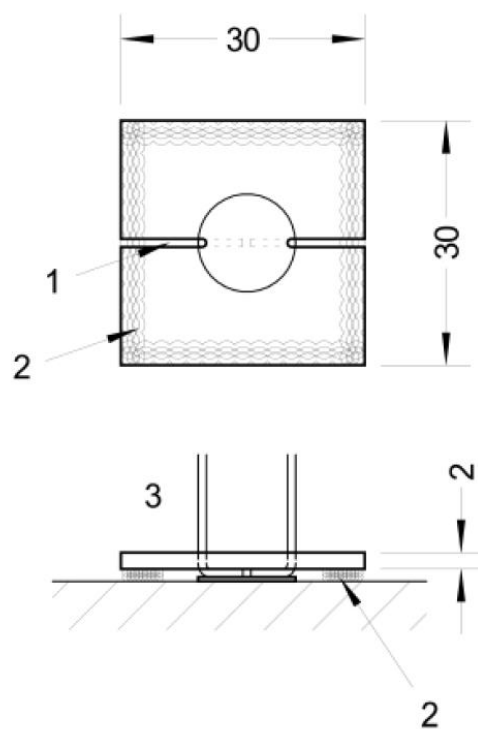
Obrázek 59 – Schéma požárního experimentu – půdorys a řezy (červeně označeny spoje)



Obrázek 60 – Statické schéma požárního experimentu



Obrázek 61 – Drátový termočlánek typu K s izolační krytkou



Obrázek 62 – Příklad termoelektrického článku podle [32]

Poznámka k Obrázku 62: 1 – nařínutí krytky; 2 – vložení pojiva; 3 – měděný disk a izolační krytka přilepená k povrchu vzorku

Termočláanky byly umístěny na horním povrchu střešního panelu, mezi vrstvami desek z minerální vlny a pěnového polystyrenu a na dvou ocelových spojích.



Obrázek 63 – Provádění svaru technikem zkušebny



Obrázek 64 – Spoj před provedením svaru



Obrázek 65 – Spoj po provedení svaru

Svar bylo z důvodu nadměrného tepelného namáhání celého spoje nutné svařovat ve dvou vrstvách. Provádění a detaily spoje – Obrázek 63, Obrázek 64 a Obrázek 65.





Po provaření obou ocelových spojů byl jeden z plechů izolován přířezem z minerální vlny, viz Obrázek 66. Blok tepelné izolace má rozměry  $160 \times 18 \times 30$  mm. K ocelovému plechu byla tepelná izolace přilepena pomocí žáruvzdorného tmelu VS–K 1200. Toto lepidlo se používá na lepení vysoce savých a pórovitých materiálů a dle výrobce může být používáno až do teploty  $1200$  °C. Tepelná izolace vydržela přilepená ke vzorku po celou dobu konání požární zkoušky.

Obrázek 66 – Tepelná izolace ocelového spoje

Níže je uveden časový průběh požárního experimentu:

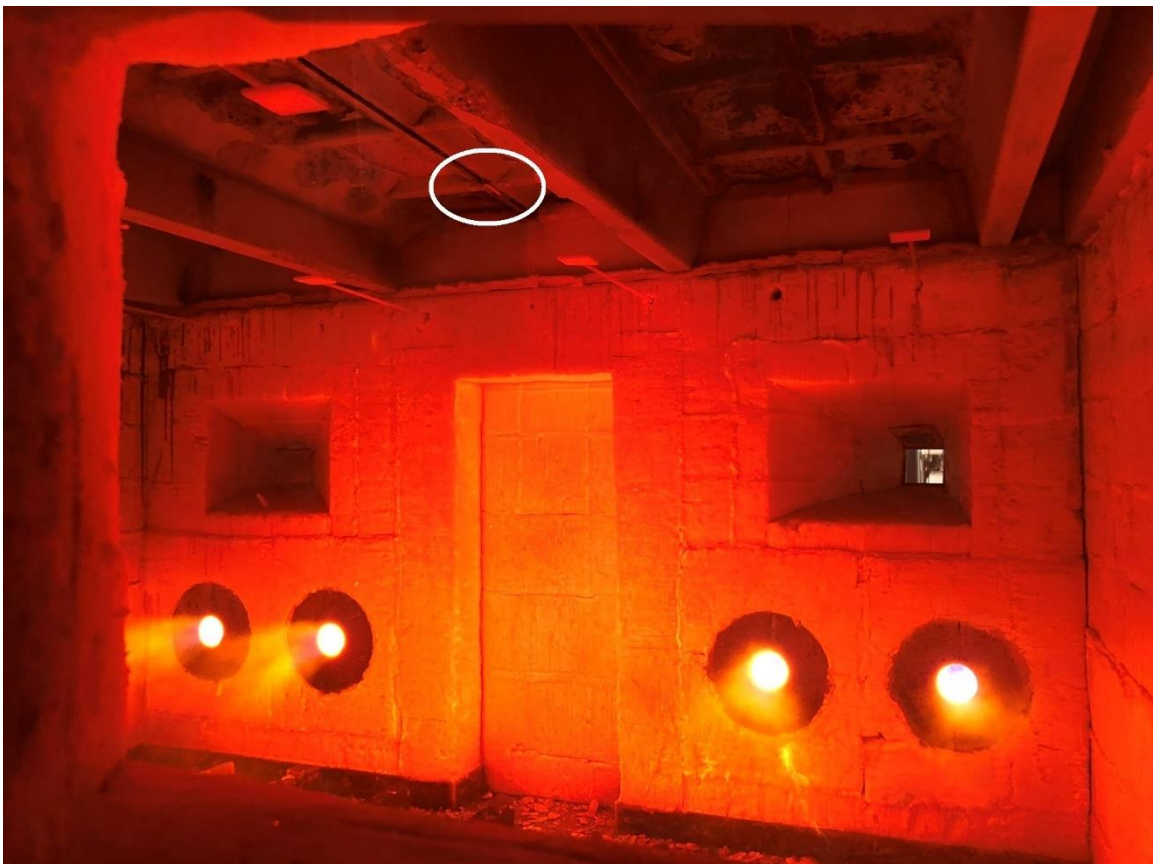
pozn. OS = ohříváná strana; NS = neohříváná strana

Čas [min]:	Pozorovaný jev:
5	OS – slyšitelné rány při odstřelování betonu
8	OS – intenzivní odstřelování betonu z kazet a hran žeber střešního panelu NS – únik dýmu po obvodu vzorku, měknutí PVC krytiny nad styčnou spárou panelů, uvolnění a nové přilepení některých termočlánků na PVC krytině
20	OS – v některých místech po odstřelení betonu kazet viditelný spodní povrch exponované minerální vlny skladeb
35	NS – postupné propadání zátěží do skladby č. 1 vlivem sublimace EPS, skladba č. 2 bez podstatných viditelných změn
38	NS – odpadnutí některých termočlánků vlivem zvlnění povrchu PVC kolem propadných zátěží, bez porušení PVC
42	NS – postupné propadání zátěží do skladby č. 2 vlivem sublimace EPS
45	NS – zvlněný povrch obou skladeb, bez porušení PVC krytiny
47	ukončení zkoušky





Obrázek 67 - Neohříváná strana vzorku před zahájením zkoušky



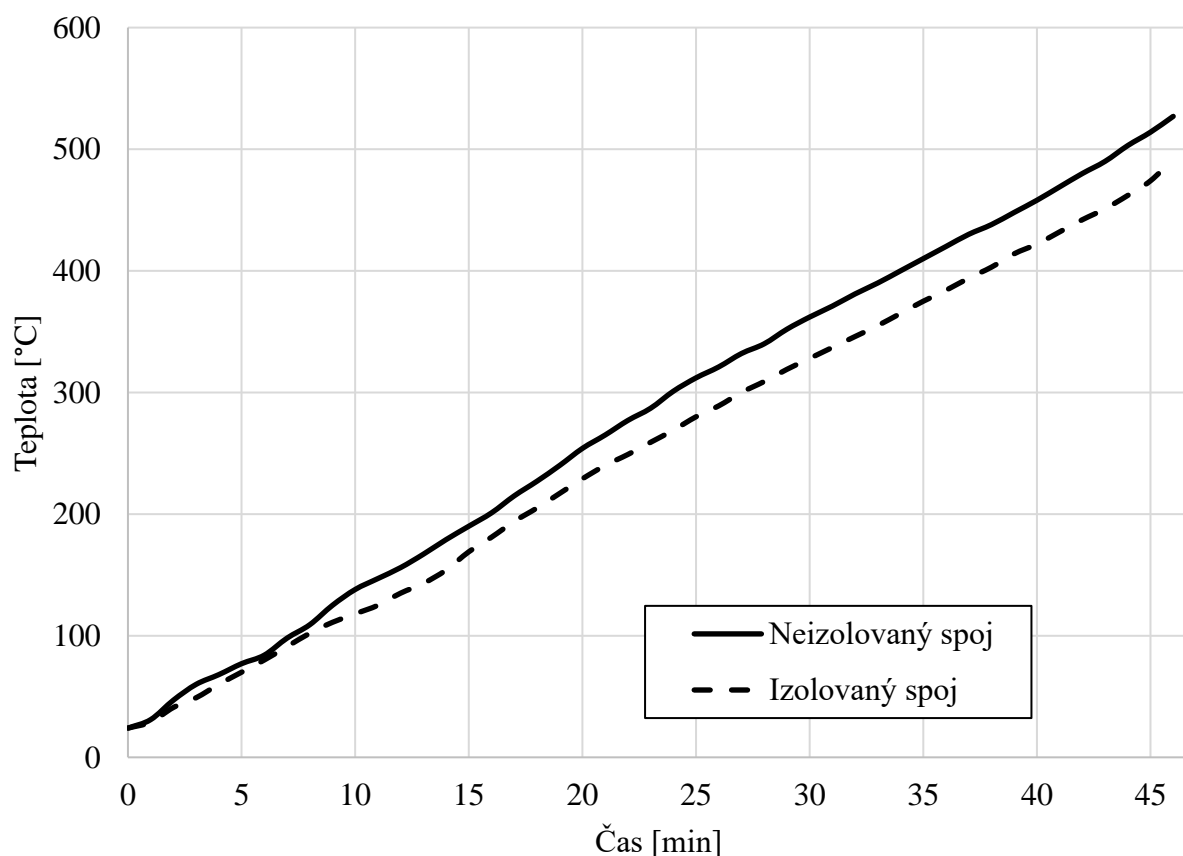
Obrázek 68 - Pohled do zkušební pece během zkoušky (bíle zvýrazněn izolovaný spoj)

### 5.3.3 Vyhodnocení

Výsledkem požárního experimentu je průběh teplot na celkem 54 termočláncích a také zjištění, jak se bude konstrukce jako celek chovat po 46 minutách působení normového požáru. Pro analýzu ocelových spojů byly zásadní termočlánci č. 25 a 45. Výsledky ukázaly, že průběh teplot na ocelových spojkách je poněkud příznivější, než se původně očekávalo. Experimentem se také potvrdilo, že tepelná izolace bude mít vliv na vývoj teploty. Rozdíl teplot mezi izolovaným a neizolovaným spojem je v 15. minutě 21 °C, ve 30. minutě 34 °C a ve 45. minutě 40 °C – rozdíl teplot má tedy vzestupnou tendenci a dá se předpokládat, že by se s časem nadále navyšoval.

Získané výsledky požárního experimentu byly použity pro validaci MKP modelů, pomocí kterých je možné měřit teplotu i v místech, kde při reálné zkoušce nebyly nebo nemohly být osazeny termočlánci. Pomocí numerických modelů je také možné počítat jiná variantní řešení, ať už z hlediska materiálu nebo geometrie prvků.

Průběh teplot, které byly naměřeny při požárním experimentu v akreditované požární laboratoři, je patrný z Obrázku 69.



Obrázek 69 - Průběh teplot (neizolovaná a izolovaná spára)

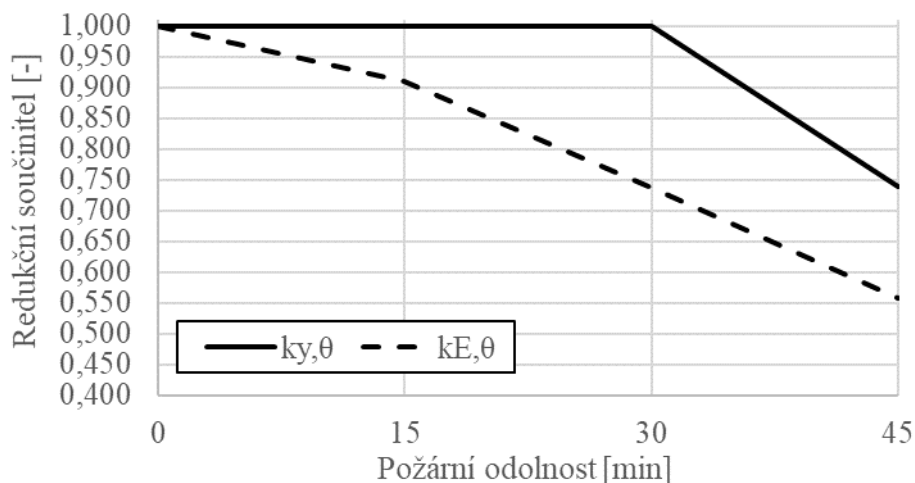
Tabulka 9 – Teploty naměřené při požárním experimentu PAVUS

Požární experiment PAVUS						
Čas	Neizolovaná spára			Izolovaná spára		
	TČ1	TČ2	TČ3	TČ1	TČ2	TČ3
[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	24	-	-	24	-	-
15	190	-	-	169	-	-
30	362	-	-	328	-	-
45	514	-	-	474	-	-
POZNÁMKA: teploty TČ2, TČ3 nebyly během experimentu měřeny						

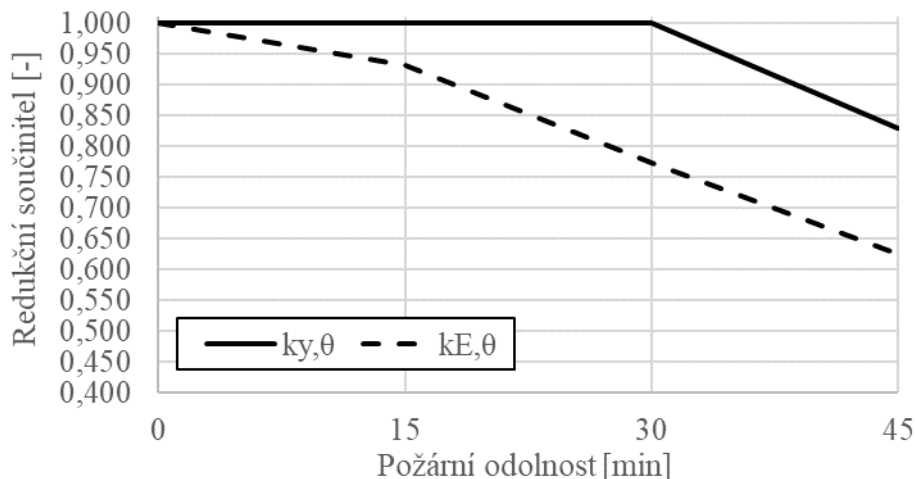
Jelikož při požárním experimentu byly osazeny termočlánky pouze na ocelovém plechu, který propojuje panely mezi sebou, může být uvažováno pouze s redukcí materiálových charakteristik ocelového plechu. Průběhy na ostatních částech konstrukce nejsou k dispozici. Redukční součinitele materiálových vlastností na základě teploty jsou znázorněny na Obrázku 70 a 71 a jejich hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 10.

Tabulka 10 – Redukční součinitele pro požární experiment PAVUS

Požární experiment PAVUS												
Požadovaná požární odolnost [min]	Neizolovaná spára						Izolovaná spára					
	Ocelový plech 1 (TČ1)		Ocelový plech 2 (TČ2)		Betónářská ocel (TČ3)		Ocelový plech 1 (TČ1)		Ocelový plech 2 (TČ2)		Betónářská ocel (TČ3)	
Redukční součinitel	$k_{y,0}$	$k_{E,0}$	$k_{y,0}$	$k_{E,0}$	$k_{s,0}$	$k_{Es,0}$	$k_{y,0}$	$k_{E,0}$	$k_{y,0}$	$k_{E,0}$	$k_{s,0}$	$k_{Es,0}$
0	1,000	1,000	-	-	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-
15	1,000	0,910	-	-	-	-	1,000	0,931	-	-	-	-
30	1,000	0,738	-	-	-	-	1,000	0,772	-	-	-	-
45	0,740	0,559	-	-	-	-	0,830	0,626	-	-	-	-
POZNÁMKA: hodnoty redukčních součinitelů TČ2, TČ3 nebyly stanoveny												



Obrázek 70 – Hodnoty redukčních součinitelů v závislosti na požadované požární odolnosti – neizolovaná spára



Obrázek 71 – Hodnoty redukčních součinitelů v závislosti na požadované požární odolnosti – izolovaná spára

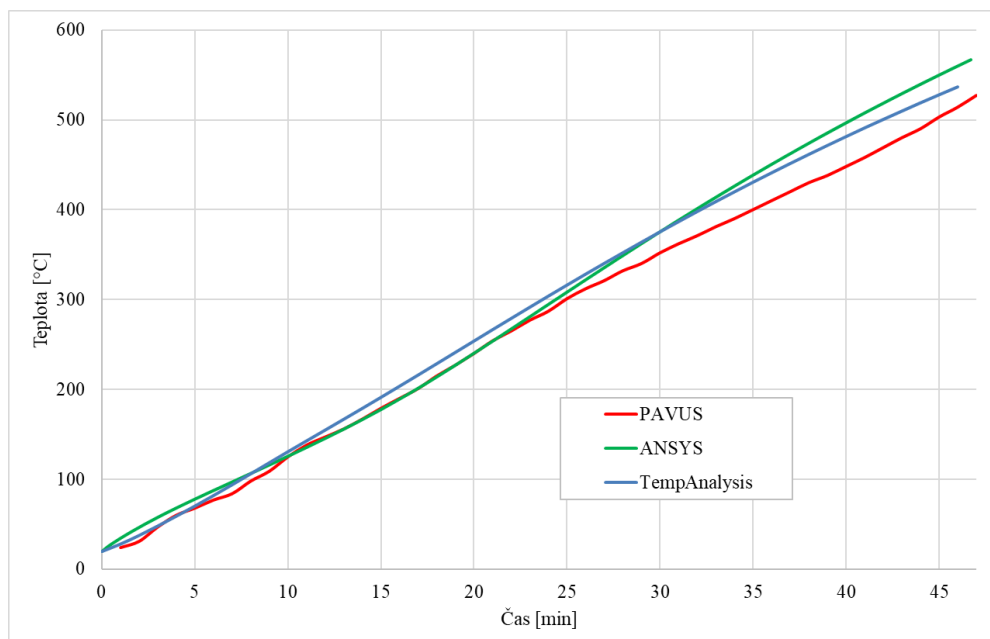
Podle čl. 5.1.3 [12] se dá tento konstrukční prvek klasifikovat jako část ocelové konstrukce, která zajišťuje stabilitu objektu, a proto lze bez dalšího průkazu porovnat teplotu konstrukce s kritickou teplotou, která je zmíněnou normou udávána jako 500 °C.

Požárním experimentem bylo mimo jiné ověření mezních stavů E – celistvost a I – izolační schopnost, kterými se zabývá diplomová práce [33]. Tyto mezní stavy byly po dobu 46 minut splněny a dá se tak konstatovat požární odolnost pro požárně dělící funkci **EI 45**.

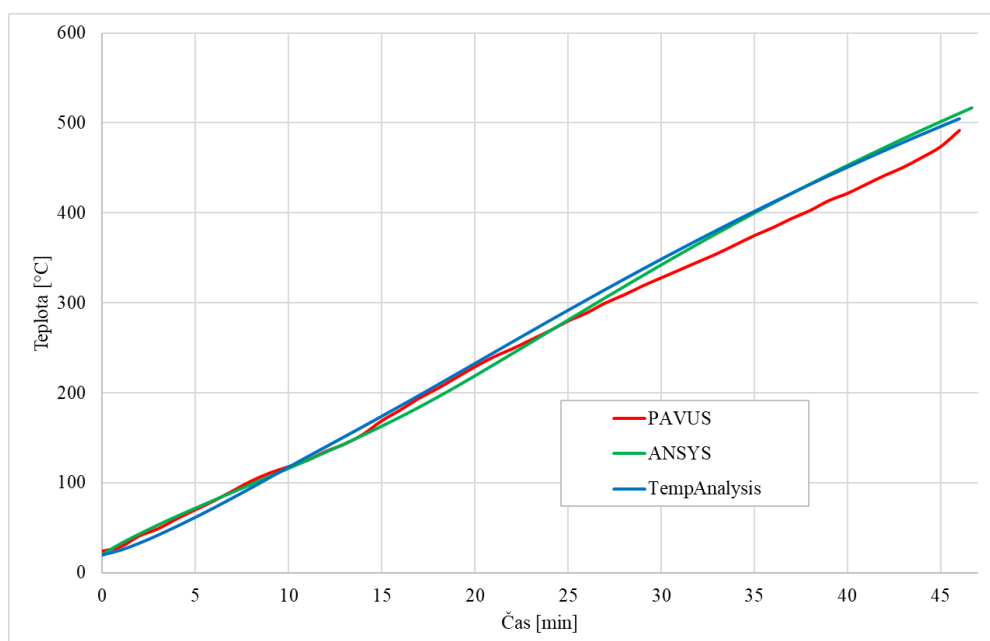
## 5.4 Porovnání numerických modelů s požárním experimentem

V této kapitole jsou porovnány hodnoty, které byly naměřeny jednotlivými numerickými modely a hodnoty naměřené během požárního experimentu.

Numerické modely byly vytvořeny s cílem předpovědět, jakým způsobem se bude chovat konstrukce vystavená požáru a jaké varianty spoje je vhodné zkoušet v akreditované laboratoři. Průběhy teplot jsou patrné z Obrázku 72 a Obrázku 73.



Obrázek 72 – Průběh teplot numerických modelů ve srovnání s požárním experimentem – neizolovaná spára



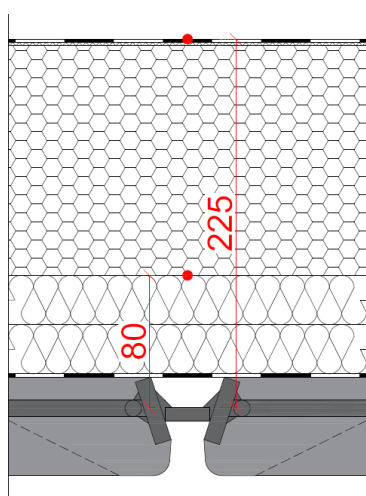
Obrázek 73 – Průběh teplot numerických modelů ve srovnání s požárním experimentem – izolovaná spára

Z uvedených grafů je patrné, že průběh teplot simulací MKP modelů je podobný skutečnému průběhu teplot z požární zkoušky a modely tak prokazují dobré výsledky. Průměrná teplota z obou numerických modelů téměř kopíruje teplotu z pece až přibližně do 25. minuty, kdy oba modely začnou dosahovat vyšších teplot než reálný experiment. V prvních 15 minutách je maximální odchylka modelů od experimentu  $+9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , od 15. do 30. minuty  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , od 30. minuty už maximální odchylka dosahuje hodnoty  $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

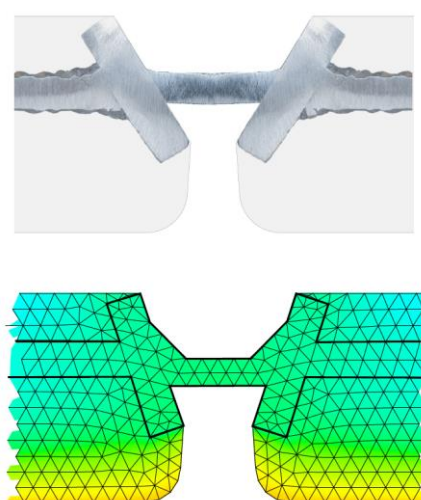
Tabulka 11 - Průměrná odchylka modelů od zkoušky

Čas [min]	Průměrná odchylka [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$0 \leq t < 15$	+1,3
$15 \leq t < 30$	-4,4
$30 \leq t \leq 45$	-26,8

Možné nesrovnalosti, které numerické modely vykazují, mohou být způsobeny například zadáním nepřesných materiálových charakteristik (nebyla známa přesná hodnota vlhkosti betonového vzorku). Nespolehlivou veličinou mohla být rovněž emisivita povrchů vystavených požáru, která byla uvažována dle [16] a [18]. Další možnou příčinou je zanedbání vrstev střešního pláště. Matematické modely uvažovaly, že nad spojem je nulový tepelný tok, tzn. dokonalá tepelná izolace. Ve 25. minutě ale byla teplota v místě rozhraní tepelné izolace z minerálních vláken a pěnového polystyrenu (tj. 80 mm nad spojem) přibližně  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  a na hydroizolační fólii z PVC (tj. 225 mm nad spojem) přibližně  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (viz Obrázek 74, červeně označeno). Evidentně se tedy o nulový tepelný tok nejedná a matematické modely lze považovat v tomto ohledu za konzervativní.



Obrázek 74 – Skladba střešního pláště



Obrázek 75 – Řez spárou

## 6 Závěr

V teoretické části byla popsána problematika prefabrikovaných konstrukcí z hlediska požární bezpečnosti staveb a také problematika spár, které mezi těmito prvky vznikají. V práci jsou dále obecně popsány materiály, které se v prefabrikované výstavbě běžně používají, je zde uvedeno i chování materiálů při zvýšené teplotě, včetně mechanických a fyzikálních vlastností. Práce se rovněž zabývá popisem metodiky navrhování konstrukcí za požáru a také matematickým popisem sdílení tepla do stavebních konstrukcí.

Hlavním cílem práce bylo provedení teplotní analýzy místa styků dvou střešních TT panelů, a to jak z hlediska teoretického (numerické modely), tak praktické přípravy požárního experimentu v akreditované požární laboratoři PAVUS, a.s., včetně vyhodnocení výsledků. Cílem práce bylo zjistit, do jaké míry budou ovlivněny vlastnosti ocelového spoje za vysokých teplot vyvolaných požárem. Ocelový prvek je navržen za běžné teploty na veškeré účinky zatížení (vítr, seizmicita atd.). Současný posudek konstrukce za požáru ovšem nepočítal se skutečnými teplotami, které pro určitý čas v konstrukci jsou. Konstrukce tedy byla navržena značně konzervativně a tudíž nevhodně. Ukázalo se, že ocelový spoj, jako jedno z nejnáchylnějších míst na vysoké teploty, nedosahuje takových teplot, jak se předpokládalo. Výsledky experimentu i numerických výpočtů totiž potvrdily, že na ocelový spoj mají značný vliv betonové konstrukce, mezi kterými je spoj umístěn. Tyto betonové konstrukce svou polohou a geometrií způsobují stínění radiačního tepla a v momentě, kdy v požární peci (ve 46. minutě) nastává průměrná okolní teplota 910 °C, nechráněný ocelový spoj má teplotu pouze 572 °C – tedy o 338 °C méně.

Z výsledků je zřejmé, že na teplotu spoje má vliv, pokud je spoj požárně chráněn. Tento vliv ale není nikterak zásadní. Může to být způsobeno vlastnostmi izolace, která byla použita, ale také nepřesnostmi, kterých mohlo být dopuštěno v rámci montáže zkoušky.

Součástí práce bylo vyhotovení numerického modelu, který bude simulovat požární experiment v požární laboratoři. Proto byly v rámci diplomové práce vytvořeny dva numerické modely v odlišných programech pro výpočet 2D teplotní analýzy. Průběhy teplot z obou modelů se dají považovat za uspokojivé pro celou dobu trvání požární zkoušky. Nejlepší shody bylo dosaženo přibližně do 25–30. minuty. Od 30. minuty jsou již výsledky teplot numerických modelů průměrně o 27 °C vyšší než výsledky experimentu. Tyto odchylky jsou možné z důvodu nepřesnosti materiálových charakteristik nebo z důvodu zanedbání vrstev střešního pláště, kterými v reálném experimentu mohlo unikat teplo mimo konstrukci.

Na základě analýzy provedené v rámci diplomové práce lze stanovit redukční součinitele, které by měly být zohledněny při posuzování stavební konstrukce na účinky požáru. Podle hodnot redukčních součinitelů z Eurokódů by nebylo nutné redukovat pevnostní charakteristiky až do 30. minuty požáru. V případě, že by byl použit čl. 5.1.3 [12] o kritické teplotě části konstrukce, která zajišťuje stabilitu objektu, bylo by možné spoj považovat ve 30. minutě požáru za vyhovující.



## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Požární odolnost jednostupňového a dvoustupňového styku mezi panely podle [13]	13
Obrázek 2 – Požární odolnost jednostupňového styku chráněného tepelnou izolací podle [13]	13
Obrázek 3 – Příklady uspořádání spáry podle [10]	16
Obrázek 4 – Matematický model pro pracovní diagram betonu při zvýšené teplotě, převzato z [16]	19
Obrázek 5 – Součinitel pro redukci charakteristické pevnosti betonu v tlaku při požáru podle [16]	19
Obrázek 6 – Teplotní roztažnost betonu podle [3]	21
Obrázek 7 – Objemová hmotnost betonu podle [16]	22
Obrázek 8 – Tepelná vodivost betonu podle [16]	23
Obrázek 9 – Měrná tepelná kapacita betonu podle [3]	24
Obrázek 10 – Matematický model pro pracovní diagram betonářské výztuže při zvýšené teplotě, převzato z [16]	25
Obrázek 11 – Délková teplotní roztažnost pro ocel a beton podle [16]	26
Obrázek 12 – Model pracovního diagramu oceli při zvýšených teplotách (bez zpevnění), převzato z [18]	28
Obrázek 13 – Redukční součinitele pro pracovní diagram uhlíkové oceli při zvýšených teplotách podle [18]	29
Obrázek 14 – Teplotní roztažnost oceli podle [18]	30
Obrázek 15 – Objemová hmotnost oceli podle [18]	31
Obrázek 16 – Tepelná vodivost oceli podle [18]	32
Obrázek 17 – Měrná tepelná kapacita oceli podle [18]	33
Obrázek 18 – Hustota izolace z minerální vlny podle [20]	35
Obrázek 19 – Tepelná vodivost izolace z minerální vlny podle [20]	36
Obrázek 20 – Měrná tepelná kapacita izolace z minerální vlny podle [20]	36
Obrázek 21 – Model teploty plynu v požárním úseku v závislosti na čase podle [3]	37
Obrázek 22 – Hlavní části návrhu konstrukce za požární situace podle [3]	38
Obrázek 23 – Návrh prvku a konstrukce za požární situace podle [3]	39
Obrázek 24 – Mechanická a tepelná odezva stavebních konstrukcí podle [7] a [15]	40
Obrázek 25 - Nominální teplotní křivky [3]	42



Obrázek 26 – Přenos sálavého tepla mezi dvěma plochami podle [7] .....	45
Obrázek 27 – Vizualizace střešního panelu .....	46
Obrázek 28 – Půdorys střešního panelu (červeně označeny spoje) .....	46
Obrázek 29 – Příčný řez střešními panelem (červeně označeny spoje).....	47
Obrázek 30 – Kotevní prvek .....	47
Obrázek 31 – 3D geometrie spoje – ocel .....	48
Obrázek 32 – Detail ocelového spoje (neizolováno) .....	48
Obrázek 33 – Detail ocelového spoje (izolováno) .....	48
Obrázek 34 – Element Type PLANE55 [29] .....	50
Obrázek 35 – Surface-to-surface radiation – neizolováno .....	50
Obrázek 36 – Surface-to-surface radiation – izolováno .....	51
Obrázek 37 – Poloha termočlánků .....	51
Obrázek 38 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – neizolovaná spára – program ANSYS .....	52
Obrázek 39 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – izolovaná spára – program ANSYS .....	52
Obrázek 40 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – neizolovaná spára – program ANSYS .....	53
Obrázek 41 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – izolovaná spára – program ANSYS .....	53
Obrázek 42 – Geometrie modelu + zatížení – neizolovaná spára .....	54
Obrázek 43 – Geometrie modelu + zatížení – izolovaná spára .....	54
Obrázek 44 – Diskretizace oblasti $\Omega_2$ , velikost prvku 2 mm .....	55
Obrázek 45 – Diskretizace oblasti $\Omega_2$ , velikost prvku 5 mm .....	55
Obrázek 46 – Diskretizace oblasti $\Omega_2$ , velikost prvku 10 mm .....	55
Obrázek 47 – Umístění termočlánků v numerickém modelu TempAnalysis .....	56
Obrázek 48 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – neizolovaná spára – program TempAnalysis .....	56
Obrázek 49 – Průběh teplot na TČ1, TČ2, TČ3 – izolovaná spára – program TempAnalysis .....	57
Obrázek 50 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – neizolovaná spára – program TempAnalysis .....	58
Obrázek 51 – Teplotní profily (izoplochy) pro čas 0; 30; 45 minut – izolovaná spára – program TempAnalysis .....	59
Obrázek 52 – Porovnání průběhu teplot (ANSYS čárkovaně, TempAnalysis plně) – neizolovaná spára .....	60

---

Obrázek 53 – Porovnání průběhu teplot (ANSYS čárkovane, TempAnalysis plně) – izolovaná spára.....	60
Obrázek 54 – Hodnota redukčních součinitelů v závislosti na požadované PO (neizolovaná spára v místě TČ1 – průměr hodnot z obou numerických modelů).....	62
Obrázek 55 – Hodnota redukčních součinitelů v závislosti na požadované PO (izolovaná spára v místě TČ1 – průměr hodnot z obou numerických modelů).....	62
Obrázek 56 – Podélný řez zkušební pecí (příklad) podle [30] .....	63
Obrázek 57 – Průměrná teplota v peci.....	64
Obrázek 58 – Tlak v peci.....	64
Obrázek 59 – Schéma požárního experimentu – půdorys a řezy (červeně označeny spoje) ....	65
Obrázek 60 – Statické schéma požárního experimentu .....	66
Obrázek 61 – Drátový termočlánek typu K s izolační krytkou .....	66
Obrázek 62 – Příklad termoelektrického článku podle [32].....	66
Obrázek 63 – Provádění svaru technikem zkušebny .....	67
Obrázek 64 – Spoj před provedením svaru.....	67
Obrázek 65 – Spoj po provedení svaru.....	67
Obrázek 66 – Tepelná izolace ocelového spoje.....	68
Obrázek 67 - Neohříváná strana vzorku před zahájením zkoušky .....	69
Obrázek 68 - Pohled do zkušební pece během zkoušky (bíle zvýrazněn izolovaný spoj) .....	69
Obrázek 69 - Průběh teplot (neizolovaná a izolovaná spára) .....	70
Obrázek 70 – Hodnoty redukčních součinitelů v závislosti na požadované požární odolnosti – neizolovaná spára.....	72
Obrázek 71 – Hodnoty redukčních součinitelů v závislosti na požadované požární odolnosti – izolovaná spára .....	72
Obrázek 72 – Průběh teplot numerických modelů ve srovnání s požárním experimentem – neizolovaná spára.....	73
Obrázek 73 – Průběh teplot numerických modelů ve srovnání s požárním experimentem – izolovaná spára .....	73
Obrázek 74 – Skladba střešního pláště .....	74
Obrázek 75 – Řez spárou.....	74

---

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Značení spár podle [2] .....	14
Tabulka 2 – Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu s křemičitým, nebo vápencovým kamenivem při zvýšených teplotách, podle [16] .....	20
Tabulka 3 – Hodnoty třídy N pro parametry pracovního diagramu betonářské výztuže válcované za tepla a tvářené za studena při zvýšených teplotách podle [16] .....	26
Tabulka 4 – Redukční součinitele pro účinnou mez kluzu, pro mez úměrnosti a pro modul pružnosti uhlíkové oceli, podle [18] .....	28
Tabulka 5 - Teploty v numerickém modelu ANSYS .....	54
Tabulka 6 – Teploty v numerické modelu TempAnalysis.....	59
Tabulka 7 – Redukční součinitele stanovené pro numerický model ANSYS .....	61
Tabulka 8 – Redukční součinitele stanovené pro numerický model TempAnalysis .....	61
Tabulka 9 – Teploty naměřené při požárním experimentu PAVUS.....	71
Tabulka 10 – Redukční součinitele pro požární experiment PAVUS .....	71
Tabulka 11 - Průměrná odchylka modelů od zkoušky .....	74

## Literatura

- [1] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 305/2011. In.: Úřední věstník Evropské unie, L88/5, 305/2011.
- [2] ČSN EN 13501-2. Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 68 s. Třídící znak 73 0860
- [3] WALD, František. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03157-5.
- [4] ČSN EN 1990. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 100 s. Třídící znak 73 0002
- [5] BACHMANN, Hubert a Alfred STEINLE. Precast concrete structures. Berlin: Ernst & Sohn : John Wiley & Sons, Inc, 2011. ISBN 978-3-433-02960-2.
- [6] WANG, Y. C. Steel and composite structures: behaviour and design for fire safety. London ; New York: Spon Press, 2002. ISBN 978-0-415-24436-7.
- [7] BUCHANAN, Andrew Hamilton a Anthony ABU. Structural design for fire safety. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc, 2017. ISBN 978-0-470-97289-2.
- [8] WITZANY, Jiří, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STAVEBNÍ FAKULTA. Konstrukce pozemních staveb 70: prefabrikované konstrukční systémy a části staveb. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 978-80-01-02656-4.
- [9] ČSN 73 0804. Požární bezpečnost staveb: Výrobní objekty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 156 s. Třídící znak 73 0804
- [10] ČSN EN 1366-4+A1. Zkoušení požární odolnosti provozních instalací - Část 4: Těsnění spár. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 34 s. Třídící znak 73 0857
- [11] GUSTAFERRO, A. H. a Leslie D. MARTIN. Design for fire resistance of precast prestressed concrete. 2nd ed. Chicago, Ill: Prestressed Concrete Institute, 1989. ISBN 978-0-937040-41-6.
- [12] ČSN 73 0810. Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Třídící znak 73 0810
- [13] ARMAND H. GUSTAFERRO, Melvin S. Abrams. Fire tests of joints between precast concrete wall panels: Effect of various joint treatment. PCI Journal. nedatováno, 1975(September-October), 44–64.
- [14] WANG, Yong C. a Ian W. BURGESS, ed. Performance-based fire engineering of structures. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Spon Press, 2013. ISBN 978-0-203-86871-3.

- 
- [15] KUČERA, Petr, Tereza ČESELKÁ a Pavlína MATEČKOVÁ. Požární odolnost stavebních konstrukcí. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-094-4.
- [16] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Český normalizační institut, 2006. 92 s. Třídící znak 73 1201
- [17] KUPILÍK, Václav. Stavební konstrukce z požárního hlediska. Praha: Grada, 2006. ISBN 978-80-247-1329-8.
- [18] ČSN EN 1993-1-2. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Český normalizační institut, 2006. 80 s. Třídící znak 73 1401
- [19] SAINT-GOBAIN Construction Products CZ a.s., Katalog výrobků: Čedičová vlna | Skelná vata | EPS | XPS | Doplňky. [online]. 2019. Dostupné z: [https://www.isover.cz/dokumenty/list?sorting\\_documentation=Popularity](https://www.isover.cz/dokumenty/list?sorting_documentation=Popularity)
- [20] DBI. Argos - Simulation software, version 5.9.96.421 [software online]. V Jernholmen: The Danish Institute of Fire and Security Technology, 2018.
- [21] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Český normalizační institut, 2004. 56 s. Třídící znak 73 0035
- [22] Požární scénáře [online]. Promat Praha. Dostupné z: [http://web.promatpraha.cz/admin/files\\_upl/1799.pdf](http://web.promatpraha.cz/admin/files_upl/1799.pdf)
- [23] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN, Jitka VAŠKOVÁ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STAVEBNÍ FAKULTA. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [24] ANSYS, Inc., ANSYS Mechanical ADPL R3 – Finite element analysis software used to simulate engineering models [software online]. 2019
- [25] ŠTEFAN R., PROCHÁZKA J. TempAnalysis – Computer Program for Temperature Analysis of Cross Sections Exposed to Fire [software online]. V Praze: České vysoké učení technické, 2009.
- [26] VUT Software: ANSYS. [www.vutbr.cz](http://www.vutbr.cz) [online]. Brno [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/intra/software/ansys-d110298>
- [27] WALD, František. Software ke stanovení požární odolnosti nosných konstrukcí. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04746-0.
- [28] ŠTEFAN, R. Transport Processes in Concrete at High Temperatures. Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling. [PhD thesis], CTU in Prague, 2015.
-

- 
- [29] ANSYS Mechanical APDL 2019 R3: Intoductory Tutorials. ANSYS Help [online]. Canonsburg, PA, 2019 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/ans\\_tut/Hlp\\_UI\\_Tutorials.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/ans_tut/Hlp_UI_Tutorials.html)
- [30] ČSN EN 1365-2. Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 2: Stropy a střechy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 28 s. Třídící znak 73 0854
- [31] ZEMAN, Filip, CÁBOVÁ, Kamila, WALD, František. Numerický model požární zkoušky v peci. In: TZB-info [online]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/18414-numericke-model-pozarni-zkousky-v-peci>
- [32] ČSN EN 1363-1. Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 45 s. Třídící znak 73 0851
- [33] PAŘÍZEK Š. Teplotní analýza střešních pláštěů prefabrikovaných předpjatých TT panelů vystavených požáru. [Diplomová práce], v Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2020 (v přípravě).