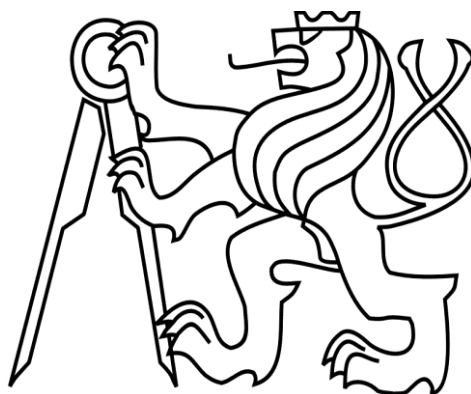


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

TEPLOTNÍ ANALÝZA STŘEŠNÍCH PLÁŠŤŮ PREFABRIKOVANÝCH PŘEDPJATÝCH TT PANELŮ VYSTAVENÝCH POŽÁRU

**THERMAL ANALYSIS OF ROOF STRUCTURES WITH PRECAST
PRESTRESSED DOUBLE T SHAPED PANEL EXPOSED TO FIRE**

Bc. Šimon Pařízek

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

2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pařízek Jméno: Šimon Osobní číslo: 438377

Zadávací katedra: K133

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Teplotní analýza střešních pláštů prefabrikovaných předpjatých TT panelů vystavených požáru

Název diplomové práce anglicky: Thermal Analysis of Roof Structures with Precast Prestressed Double T Shaped Panel Exposed to Fire

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury.

Popis materiálových charakteristik.

Teplotní analýza různých variant střešních pláštů.

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.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 18. 9. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30. 9. 2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

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

V Praze dne

.....

Bc. Šimon Pařízek

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a připomínky a ochotu při konzultacích, které mi pomohly při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za poskytnutí zázemí během celého studia a za maximální oporu, která pro mě velmi mnoho znamená.

Obsah

Čestné prohlášení.....	II
Poděkování	III
Abstrakt.....	VI
Abstract	VI
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	VII
1 Úvod	1
2 Požár	2
2.1 Chování skutečného požáru	2
2.2 Návrhový požár	3
2.2.1 Normová teplotní křivka.....	3
3 Hodnocení střech z požárního hlediska	4
3.1 Požární odolnost	4
3.1.1 Mezní stavy požární odolnosti.....	4
3.1.2 Druhy konstrukčních částí	6
4 Teplotní analýza konstrukce.....	8
4.1 Způsoby teplotní analýzy.....	8
4.1.1 Využití databáze dříve naměřených nebo vypočtených hodnot	8
4.1.2 Matematické modelování.....	8
4.1.3 Požární zkoušky	10
5 Zkoušky požární odolnosti.....	11
5.1 Zkušební zařízení.....	11
5.1.1 Měření teploty.....	11
5.1.2 Teplota v peci	12
5.2 Zkušební vzorky	12
5.2.1 Velikost a počet	12
5.2.2 Návrh, provedení a kondicionování.....	13
5.3 Zkušební postup.....	13
5.3.1 Měření a pozorování	13
5.3.2 Ukončení a vyhodnocování zkoušky	13
6 Příprava, realizace a vyhodnocení požárních experimentů.....	14
6.1 Varianty skladeb střešních plášťů.....	14
6.2 Přehled zkoušek	16
6.3 FireLAB, UCEEB ČVUT v Praze	16
6.3.1 Zkušební zařízení.....	16
6.3.2 Zkušební podmínky	17
6.3.3 Zkušební vzorky	18
6.3.4 Průběhy zkoušek	24
6.3.5 Výsledky zkoušek.....	26
6.3.6 Shrnutí výsledků zkoušek	35
6.4 PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí.....	37

6.4.1	Zkušební zařízení	37
6.4.2	Zkušební podmínky	38
6.4.3	Zkušební vzorek.....	39
6.4.4	Průběh zkoušky.....	42
6.4.5	Shrnutí výsledků zkoušky	42
7	Teplotní analýza různých variant střešních pláštů.....	46
7.1	Materiálové charakteristiky	46
7.1.1	Obecně	46
7.1.2	Obyčejný beton – normální beton.....	47
7.1.3	Minerální vlna.....	51
7.1.4	Expandovaný pěnový polystyren (EPS)	55
7.2	Numerická teplotní analýza	58
7.2.1	Software TempAnalysis.....	58
7.2.2	Výsledky a vyhodnocení.....	59
8	Vyhodnocení.....	64
9	Závěr	66
	Seznam obrázků.....	67
	Seznam tabulek.....	71
	Literatura	72

Abstrakt

Předmětem této práce je provedení teplotní numerické analýzy zvolených skladeb střešních pláštů s betonovou vylehčující kazetou. Z těchto vylehčujících kazet je provedena střešní deska prefabrikovaného předpjatého TT panelu. Z hlediska požární odolnosti, resp. požárně dělící funkce, představují tyto kazety nejkritičtější oblast střešní konstrukce. V první části je pojednáno o teoretickém základu ohledně konstrukcí střech za požáru a matematického modelu teplotní analýzy vycházející z Fourierova zákona. Následující část vysvětluje samotný postup teplotní analýzy pomocí softwaru TempAnalysis včetně zahrnutí materiálových charakteristik jednotlivých vrstev střešních pláštů. Následuje popsání přípravy, realizace a vyhodnocení požárních zkoušek, které byly provedeny v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze a v akreditované požární zkušebně PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí. Závěrem práce je porovnání a vyhodnocení teplotní analýzy s výsledky zkoušek včetně závěrečného shrnutí výstupů práce.

Klíčová slova

Teplotní analýza; požár; vysoká teplota; beton; minerální vlna; střecha; tepelné chování; materiálové vlastnosti; požární odolnost; teplotní profil; požární zkoušky

Abstract

The subject of this thesis is to perform thermal analysis of selected roof cladding compositions with a concrete lightweight cassette. A ribbed slab of prestressed precast double T shaped panel is made from these lightweight cassettes. In terms of fire resistance (fire separation function), these cassettes represent the most critical area of the roof structure. The first part of the paper deals with the theoretical basics of roof structures under the fire. A mathematical model of heat transfer based on Fourier's law is described herein. The second part describes the preparation, implementation, and evaluation of fire tests, which were carried out in the fire laboratory of UCEEB CTU in Prague and in the accredited fire test laboratory PAVUS, a. s. in Veselí nad Lužnicí. Following is an explanation of the thermal analysis procedure using the TempAnalysis software including the material properties of individual layers of roof cladding. The conclusion of the thesis is a comparison and evaluation of the thermal analysis with the test results, including the final summary of the outputs.

Keywords

Thermal analysis; fire; high temperature; concrete; mineral wool; roof; thermal behaviour; material properties; fire resistance; temperature profile; fire tests

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

c_p	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
t	Čas trvání požáru	min
I	Intenzita sálání tepla	W/m ²
Q	Vnitřní zdroj tepla	-
x	Polohová proměnná	-
\dot{h}_{net}	Čistý tepelný tok	W/m ²
$\dot{h}_{\text{net,c}}$	Složka čistého tepelného toku od proudění	W/m ²
$\dot{h}_{\text{net,r}}$	Složka čistého sálavého tepelného toku	W/m ²

Řecké symboly

θ	Teplota	°C
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
ρ	Objemová hmotnost	kg/m ³
ε	Emisivita povrchu tělesa	-
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/(m ² ·K ⁴)
Ω	Označení řešené oblasti	-
α_c	Součinitel přestupu tepla prouděním	W/(m ² ·K)
Φ	Polohový faktor	-
ε_f	Emisivita požáru	-
ε_m	Povrchová emisivita prvku	-

Zkratky

ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	Evropská norma
ČVUT	České vysoké učení technické
EPS	Expandovaný pěnový polystyren

ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro normalizaci)
PVC	Polyvinylchlorid
TA, TA_sL	Software TempAnalysis
TČ	Termoelektrický článek, termočlánek
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
VZT	Vzduchotechnická jednotka, zařízení apod.

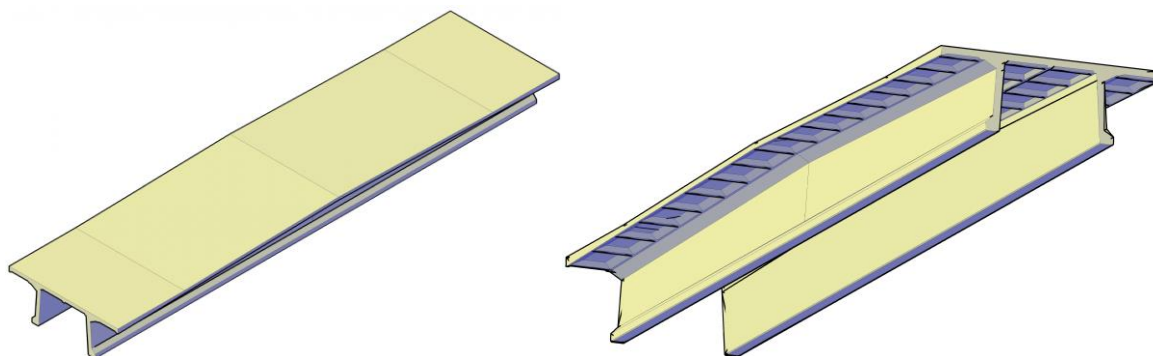
1 Úvod

Diplomová práce je zaměřena na teplotní analýzu zvolených variant střešních pláštů zahrnujících betonovou vylehčující kazetu. V případě požáru tvoří vylehčující kazety nejkritičtější oblast desky prefabrikovaného předpjatého TT panelu (Obr. 1) z hlediska požárně dělící funkce. Pro splnění požadavků, které mohou vyvstat z požárně bezpečnostního řešení stavby, musí střešní konstrukce objektu v určitých případech vykazovat požární odolnost. Varianty střešních pláštů jsou navrženy tak, aby celá střešní konstrukce co nejlépe odolávala účinkům požáru s přihlédnutím na technologické a ekonomické aspekty.

Požární odolnost nové stavební konstrukce lze prokázat především zkouškami požární odolnosti. Ty jsou svou povahou velice náročné z hlediska finančních prostředků, ale leckdy i samotným provedením. Motivací práce je proto sestavit model sdílení tepla, který dokáže simulovat průběhy teplot mezi vrstvami zvolených variant střešních pláštů. Simulace jsou následně porovnány s hodnotami z provedených požárních zkoušek.

Hlavním cílem práce je vytvoření matematického modelu sdílení tepla pro čtyři varianty střešních pláštů. Za tímto účelem bylo nutné shrnout současné teoretické poznatky ohledně chování požáru, hodnocení střech z požárního hlediska, způsobů teplotní analýzy konstrukce a zkoušení požární odolnosti. Následně je popsána příprava, realizace a vyhodnocení vykonaných požárních zkoušek. Navazující část popisuje numerickou teplotní analýzu variant střešních pláštů se zahrnutím průběhů vlastností materiálů v závislosti na zvýšené teplotě. Výstupy teplotní analýzy jsou reprezentovány průběhy teplot v úrovních mezi betonem a minerální vlnou, a mezi tepelnými izolacemi, tedy na rozhraní vrstev z minerální vlny a expandovaného pěnového polystyrenu.

Závěrem práce jsou výsledky numerické teplotní analýzy porovnány s reálnými průběhy teplot získaných z požárních zkoušek. Na základě tohoto porovnání je možné vyhodnotit dobu požární odolnosti jednotlivých variant střešních pláštů, která je stanovena jak výpočetní, tak zkušební metodou.



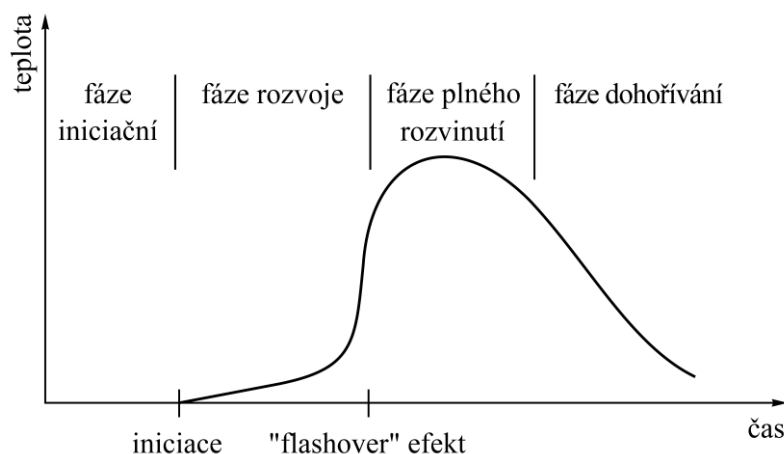
Obr. 1 Prefabrikovaný předpjatý TT panel; převzato z [1]

2 Požár

Vyhláška č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci) definuje požár jako „každé nežádoucí hoření, při kterém došlo k usmrcení nebo zranění osob či zvířat, ke škodám na materiálních hodnotách nebo životním prostředí a nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata, materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy“. [2]

2.1 Chování skutečného požáru

U skutečného požáru v místnosti dochází při iniciační fázi k ohřevu potenciálního paliva. Iniciace zapálením je počátkem přechodu do fáze rozvoje. Ve fázi rozvoje se většina požárů šíří pomalu, nejprve po povrchu hořlavé látky, následně rychleji s rostoucí intenzitou požáru, čímž dochází ke zpětné radiaci z plamenů a horkých plynů hoření na další části paliva. Horké zplodiny hoření stoupají a rozprostírají se pod úrovní stropní konstrukce, což vytváří horkou horní vrstvu, která vyzařuje teplo do okolí místnosti. Pokud teplota horní vrstvy dosáhne přibližně 500–600 °C, rychlost hoření se značně zvyšuje, což vede k „flashover“ efektu¹ a dochází k přechodu na plně rozvinutý požár. Rychlost hoření ve fázi rozhořívání je obecně závislá na třídě reakce na oheň materiálu, zatímco v době plného rozvinutí jsou teploty a sálavý tepelný tok v místnosti tak velké, že je rychlost uvolňování tepla obvykle řízena ventilací, tedy přístupem vzduchu pro proces hoření. Je-li zajištěn dostatečný přívod vzduchu do místa hoření, je požár řízen palivem, tedy rychlost uvolňování tepla závisí na množství požárního zatížení v požárním úseku. Na Obr. 2 je znázorněn typický průběh požáru v místnosti a jeho jednotlivé fáze. [3]



Obr. 2 Charakteristický průběh teplot požáru v místnosti; převzato z [3]

¹ Jako „flashover“ efekt se označuje jev, při kterém téměř současně dochází k prostorovému (celkovému) vzplanutí všech hořlavých látek v místě požáru [3].

2.2 Návrhový požár

Pro návrh konstrukcí odolávajících účinkům požáru je požadováno jejich vystavení pravděpodobným teplotám plynu, které na ně mohou po dobu jejich životnosti působit. K tomuto je vyžadována znalost chování požáru, tedy určení požárního scénáře, který může nastat v řešeném požárním úseku. Za tímto účelem byly stanoveny zjednodušené vztahy, a tím získán použitelný základ závislosti teploty plynu na čase. Tyto vztahy jsou použity jako teplotní okrajové podmínky v požárních výpočtech a v pecích při zkouškách požární odolnosti. [4]

2.2.1 Normová teplotní křivka

Normová teplotní křivka, často také označována jako křivka ISO 834, je nejznámější a nejpoužívanější metodou odhadu teplot plynu při požárech v budovách. Předpokládá se rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku, která se časově zvyšuje podle logaritmického vztahu. Normová teplotní křivka byla začleněna do řady návrhových norem po celém světě. [4]

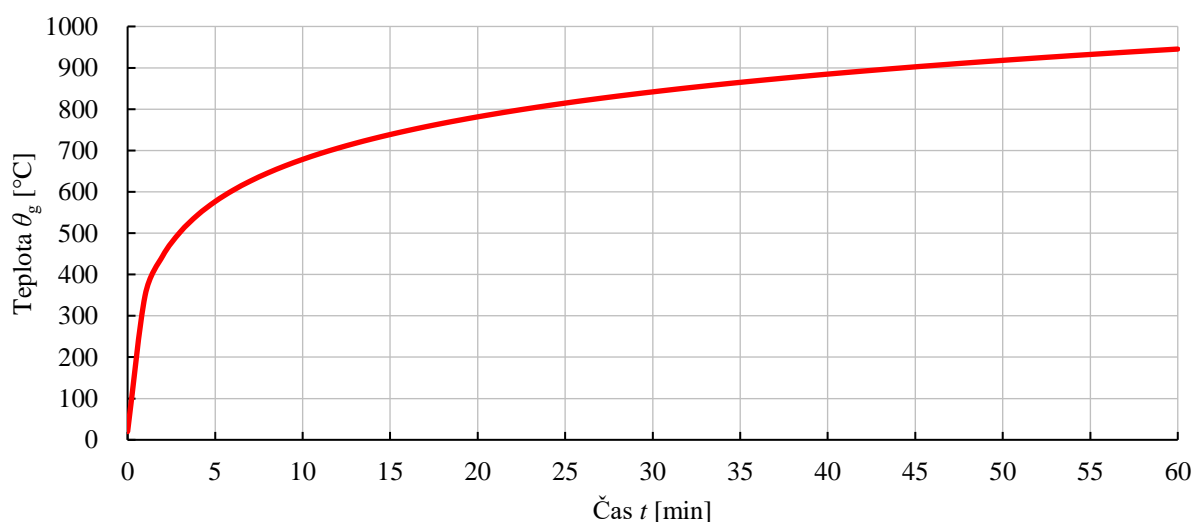
Křivka spadá do nominálních teplotních křivek, jako jsou např. křivka vnějšího požáru, uhlovodíková křivka a křivka pomalého zahřívání. Tyto křivky jsou nejjednodušším přístupem stanovení teplotní analýzy plynu v požárním úseku, neboť popisují pouze fázi celkového vzplanutí („flashover“ efekt) a fázi plného rozvinutí požáru. Nezahrnují například vliv otvorů místnosti, typ paliva, rychlost odhořívání aj. [5].

Nominální normová teplotní křivka popisuje takzvané celulózové hoření (hoření dřeva, papíru, oděvu apod.) a používá se pro zkoušky požární odolnosti konstrukčních prvků ve zkušebních pecích. [5, 6]

Tato křivka (viz Obr. 3) je popsána vztahem

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

kde θ_g je teplota plynu v požárním úseku ve $^{\circ}\text{C}$ a t je čas trvání požáru v minutách [6, 7].



Obr. 3 Nominální normová teplotní křivka ISO 834 v čase 60 minut; podle [7]

3 Hodnocení střech z požárního hlediska

V současnosti se v České republice střechy klasifikují podle řady evropských norem. Hodnocení střech z požárního hlediska je prováděno ze spodní či vrchní strany, dále podle směru působení a intenzity požáru. [8]

V této kapitole bude hodnocení střech z požárního hlediska věnováno především požární odolnosti střešních pláštů a konstrukcí střech.

3.1 Požární odolnost

Součástí požárně bezpečnostního řešení každé stavby je návrh takové stavební konstrukce, která je schopna zabránit šíření požáru a odolávat vysokým teplotám vznikajících při požáru. Tyto konstrukce tvoří pasivní ochranu celého objektu a rozdělují jej na jednotlivé požární úseky. Jelikož při požáru stoupá kouř a teplo směrem vzhůru, může být střešní konstrukce značně ovlivněna negativními účinky od těchto vlivů. [9]

Požární odolnost stavebních konstrukcí je schopnost konstrukcí odolávat účinkům plně rozvinutého požáru při zachování své funkce, jako je například únosnost (označována písmenem R), celistvost (označována E), izolační schopnost (označována I) či radiace (značena W) – viz Obr. 4. Jedná se o takzvané mezní stavy. Tyto stavy se považují za splněné, pokud nepřesahují určitá kritéria dle [10, 11] a dalších příslušných technických předpisů. Nosná nebo požárně dělicí konstrukce může mít funkcí několik, může mít tedy požadavek na jeden i více mezních stavů, které jsou doplněny požadovanou dobou požární odolnosti a druhem konstrukční části. [12]

Skutečnou požární odolnost lze stanovit výpočtem nebo zkouškami požární odolnosti. V případech, kdy nelze postihnout veškeré rozhodující faktory ovlivňující požární odolnost, je možné užití kombinace zkoušek s výpočty. [5]

3.1.1 Mezní stavy požární odolnosti

Únosnost R

Kritérium únosnosti je doba, po kterou je zkušební vzorek schopen přenést při zkoušce zkušební zatížení. Schopnost přenášet zkušební zatížení je stanovena z velikostí a rychlostí deformace. Kritérium rychlosti deformace je měřeno po uběhnutí 10 minut od začátku požární zkoušky z důvodu dosažení ustáleného stavu. [10]

a) u ohýbaných zatížených prvků

$$\text{mezní průhyb } D = \frac{L^2}{400 d} \text{ [mm] nebo} \quad (2)$$

$$\text{mezní rychlost průhybu } \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 d} \text{ [mm/min]} \quad (3)$$

kde:

L je světlé rozpětí zkušební vzorku v mm;

d je vzdálenost krajních vláken tlačené zóny ke krajním vláknům tažené zóny posuzovaného průřezu v mm v nezahřátém stavu;

b) u svisle zatížených prvků

mezní svislé smrštění (negativní prodloužení) $C = \frac{h}{100}$ [mm]; nebo (4)

mezní rychlost smrštění (negativní prodloužení) $\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000}$ [mm/min] (5)

kde h je původní výška v mm zkušební vzorku. [10, 13]

Celistvost E

Kritérium celistvosti je doba uběhnutého času, po kterou si zkušební vzorek zachová svou dělicí funkci, aniž by došlo k následujícím okolnostem:

- vznícení bavlňného polštářku přikládaného v rámečku k povrchu zkušební vzorku po dobu max. 30 s, nebo pokud nedojde k jeho vznícení; nebo
- umožnění průchodu měřky spár; nebo
- souvislému plamennému hoření [10, 13].

Celistvost nelze tedy prokázat jiným způsobem než postupem při požární zkoušce uvedeným výše.

Izolační schopnost I

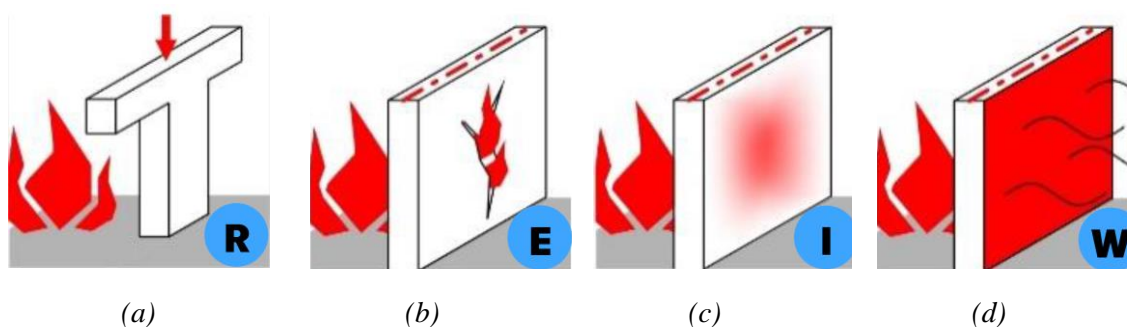
Kritériem izolační schopnosti je doba uběhnutého času, po kterou zkušební vzorek zachovává při zkoušce svou dělicí funkci, aniž by na neohříváné straně byly dosaženy teploty, které způsobí nárůst průměrné teploty nad počáteční hodnotu o 140 K, či vzrůst teploty v kterémkoliv místě nad počáteční hodnotu o 180 K. [10, 13]

Radiace W

Konstrukce s mezním stavem radiace W není schopna zabránit nárůstu teplot, pouze do určité míry omezuje sálavý tepelný tok ze strany konstrukce odvrácené od požáru. Tento sálavý tepelný tok však nesmí způsobit rozšíření požáru, je proto omezen na hodnotu 15 kW/m². Přípustná hodnota radiace, která neohrožuje unikající osoby je 10 kW/m² po dobu 5 vteřin. [12, 14]

Snížení požadavku mezního stavu I na benevolentnější mezní stav W může být použito v případě požárních uzávěrů (např. dveří) mezi běžnými požárními úseky, kde se před a za dveřmi počítá s volným prostorem, nebo u obvodových konstrukcí, kde tepelný tok může volně sálat do exteriéru. [12]

Z hlediska stanovení mezního stavu radiace W se měření sálavého tepelného toku nepožaduje z povrchu s teplotou nižší než 300 °C, neboť radiace z takového povrchu je nízká – obvykle do 6 kW/m² i při emisivitě 1,0. [14]



Obr. 4 Mezní stavy požární odolnosti: (a) únosnost; (b) celistvost; (c) izolační schopnost; (d) radiace; převzato z [15]

3.1.2 Druhy konstrukčních částí

V České republice se v rámci českých technických norem doplňuje požadovaná požární odolnost konstrukce o druh konstrukční části. Jedná se o konstrukční části druhu DP1, DP2 a DP3. Tato klasifikace zohledňuje, z jakých stavebních materiálů a výrobků se stavební konstrukce sestávají, resp. jakou třídu reakce na oheň vykazují. Smyslem klasifikace je stanovit chování stavebních konstrukcí jako celku a posléze určit konstrukční systém budovy. [16, 17]

Stavební konstrukce mají z hlediska druhu konstrukční části dvě základní kritéria pro rozdělení (Tab. 1). První kritérium zohledňuje, zda hořlavé stavební výrobky použité v konstrukci přispívají k zvyšování intenzity požáru. Druhé kritérium hodnotí, zda použité materiály mají vliv na únosnost a stabilitu konstrukčních částí. [17]

Tab. 1 Základní kritéria rozdělení druhů konstrukčních částí; podle [11]

Kritérium	DP1	DP2	DP3
1) Zvýšení intenzity požáru v požadované době požární odolnosti konstrukční části	NE	NE	ANO
2) Vliv použitých materiálů na únosnost a stabilitu	NE	ANO	ANO

Druh konstrukční části DP1

Konstrukce druhu DP1 nezvyšují v požadované době intenzitu požáru a sestávají se především z nehořlavých materiálů, tedy třídy reakce na oheň A1 nebo A2. Konstrukce DP1 mohou obsahovat i hořlavé výrobky, třídy reakce na oheň B až F, pokud jsou tyto prvky ohraničené uvnitř konstrukce. Podstatné je, že na nich nesmí záviset únosnost a stabilita konstrukce a nesmí dojít v požadované době k jejich vzplanutí. [16]

Střešní pláště mohou být hodnoceny jako konstrukční část druhu DP1, když spodní vrstva zajišťující stabilitu střešního pláště je provedena z výrobků třídy reakce na oheň A1 nebo A2, v tloušťce alespoň 40 mm. Pokud tloušťka spodní vrstvy je menší než 40 mm, musí být nad touto

vrstvou výrobky třídy reakce na oheň A1 nebo A2 v tloušťce nejméně 40 mm. V případě použití deskových materiálů se musí provést nejméně dvě vrstvy s celkovou tloušťkou 40 mm s navzájem překrývajícími se spárami. V případě použití výrobků třídy reakce na oheň C až E nad spodní vrstvou definovanou výše, musí střešní plášť jako celek vykazovat klasifikaci $B_{ROOF}(t3)$ a zároveň je nutné prokázat, že na rozhraní spodní nehořlavé vrstvy a horní hořlavé vrstvy teplota nepřesáhne hodnotu 140 °C. [11]

Druh konstrukční části DP2

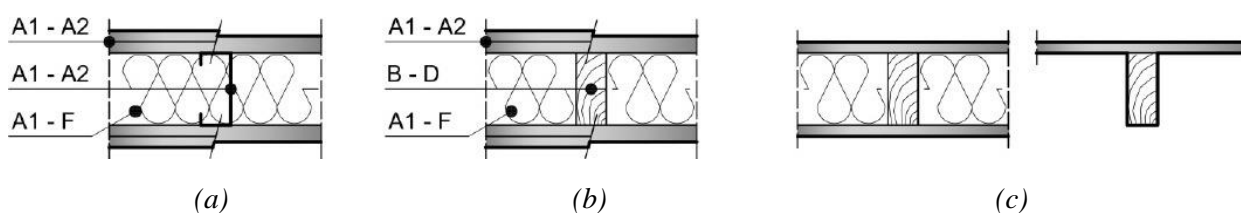
Konstrukce druhu DP2 mohou být sestaveny z nosných částí třídy reakce na oheň B až D nebo i třídy reakce na oheň B až E, pokud na nich nezávisí stabilita konstrukce např. izolace. Podmínkou je, že se tyto hořlavé výrobky musí nacházet uvnitř konstrukce, tedy že povrchové vrstvy konstrukčních částí jsou tvořeny nehořlavými výrobky třídy reakce na oheň A1 nebo A2. Tyto nehořlavé povrchové vrstvy mají v požadované době zabránit vzplanutí a odhořívání nosných či izolačních vnitřních částí konstrukce. [11, 16]

Za konstrukce druhu DP2 se považují rovněž hořlavé konstrukce střeš zesponu kontaktně upevněné nebo s uzavřením dutiny obložené požárním obkladem (podhledem) s příslušnou požární odolností, za předpokladu, že střešní plášť vyhovuje klasifikaci $B_{ROOF}(t3)$. [11]

Druh konstrukční části DP3

Konstrukční části druhu DP3 mohou v požadované době požární odolnosti zvyšovat intenzitu požáru a nejsou na ně vztažena žádná materiálová omezení, resp. se jedná o všechny stavební konstrukce, které nesplňují požadavky na zatřídění do druhu konstrukční části DP1 či DP2. [10, 15]

Příklady konstrukcí dle druhů konstrukčních částí jsou uvedeny na Obr. 5.



Obr. 5 Příklady konstrukcí dle druhů konstrukčních částí: (a) DP1; (b) DP2; (c) DP3; převzato z [16]

4 Teplotní analýza konstrukce

Analýza požární odolnosti konstrukcí je složitý proces, protože zahrnuje mnoho proměnných, jako je průběh požáru, rozložení teploty v konstrukcích příp. prvcích, interakce konstrukčních prvků, změny vlastností materiálů a vliv zatížení na konstrukční systém. [13]

Primárním cílem teplotní analýzy je zvoleným způsobem stanovit rozložení teploty v posuzované konstrukci.

4.1 Způsoby teplotní analýzy

Při záměru provedení teplotní analýzy konstrukce lze postupovat několika způsoby [18]:

- Využití databáze dříve naměřených nebo vypočtených hodnot.
- Matematické modelování pomocí počítačových softwarů.
- Požární zkoušky.

4.1.1 Využití databáze dříve naměřených nebo vypočtených hodnot

Jedná se o nejjednodušší a nejrychlejší přístup stanovení rozložení teploty v konstrukci nebo její části, která je vystavena požáru. Databáze může být dostupná ve formě tabulek případně grafů. Nevýhodou využití databázových údajů je omezení jejich použitelnosti, neboť údaje platí pro konkrétní parametry (rozměry průřezu, vlastnosti materiálů, požární scénář, dobu požární expozice), pro které byly stanoveny. [19]

4.1.2 Matematické modelování

Stanovení rozložení teploty v konstrukci nebo její části spočívá ve vyřešení úlohy sdílení tepla, jež je popsáno diferenciální rovnicí vedení tepla a odpovídajícími okrajovými a počátečními podmínkami, které zohledňují sdílení tepla prouděním (přestupem) a radiací. [6, 18, 19]

Úloha sdílení tepla (šíření tepla, přenos tepla, transport tepla) je definována jako přenos energie ve formě tepla, jež má tyto tři složky [6]:

- Vedení (kondukce).
- Proudění (konvekce).
- Sálání (radiace).

Vedení tepla probíhá především v pevných látkách. Při tomto jevu předávají částice s vyšší kinetickou energií část této energie částicím s energií nižší. Tímto způsobem sdílení tepla se přenáší pouze energie, nikoliv hmota [6]. Z výše uvedeného tvrzení vyplývá, že materiály s dobrou elektrickou vodivostí jsou obvykle dobrými vodiči tepla. U materiálů se špatnou vodivostí dochází k vedení tepla chvěním molekulární mřížky. Vedení tepla je důležitým faktorem požární odolnosti konstrukcí. [3]

Proudění je přenos tepla pohybem tekutin – plynů a kapalin. Sdílení tepla prouděním je důležitým faktorem při šíření plamene a při stoupání kouře a horkých plynů ke stropní konstrukci či okny ven z požárního úseku. Výpočty transportu tepla prouděním obvykle zahrnují přenos tepla mezi povrchem pevné látky a okolní tekutinou, která tuto pevnou látku ohřívá nebo ochlazuje. [3, 6]

Sálání je přenos tepla elektromagnetickými vlnami, který probíhá i bez přítomnosti látkového prostředí. Může tedy probíhat i ve vakuu. Sálání je nesmírně důležité v případě požáru, neboť je hlavním mechanismem pro přenos tepla mezi plameny a povrchem potenciálního paliva, mezi horkými plyny a stavebními objekty a mezi hořící budovou a sousedními objekty. Pro stanovení hustoty tepelného toku od sálání se vychází ze Stefan-Boltzmannova zákona, který je popsán vztahem

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta + 273,15)^4, \quad (6)$$

kde I je intenzita sálání v W/m^2 , ε je emisivita povrchu, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ a θ je teplota tělesa ve $^\circ\text{C}$. [3] (7)

Řídící rovnice vedení tepla

Rovnice jednorozměrného neustáleného vedení tepla vychází z Fourierova zákona a je dána následujícím vztahem,

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = Q \text{ pro } x \in \Omega \quad (8)$$

kde θ je teplota (neznámá veličina), ρ je objemová hmotnost materiálu, c_p je měrná tepelná kapacita materiálu, λ je součinitel tepelné vodivosti materiálu, Q je vnitřní zdroj tepla, x je polohová proměnná a Ω označuje řešenou oblast. [6, 18]

Jako počáteční podmínka se obvykle uvažuje předpoklad, že před vystavením konstrukce zvýšeným teplotám je rozložení teploty v konstrukci konstantní o hodnotě 20°C . Počáteční podmínka má tedy podobu

$$\theta(x, t) = \theta_0(x) = \theta_0 = 20^\circ\text{C} \text{ pro } t = 0. \quad [6, 18] \quad (9)$$

Okrajové podmínky – proudění a sálání

Tepelná zatížení od proudění a sálání jsou dle [7] dána čistým tepelným tokem \dot{h}_{net} [W/m^2] dopadajícím na hranici řešené oblasti, tedy na líc průřezu, povrch konstrukce apod. Při navrhování stavební konstrukcí podle nominálních teplotních křivek se čistý tepelný tok na jednotku plochy stanoví jako

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}, \quad (10)$$

kde $\dot{h}_{net,c}$ je složka čistého tepelného toku od proudění na jednotku plochy [W/m^2] a $\dot{h}_{net,r}$ je složka čistého sálavého tepelného toku na jednotku plochy [W/m^2]. [6, 9, 18]

Složka tepelného toku sdílená prouděním $\dot{h}_{net,c}$ se stanoví ze vztahu

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m), \quad (11)$$

kde α_c [W/(m²·K)] je součinitel přestupu tepla prouděním, θ_g [°C] je teplota plynů v blízkosti konstrukce vystavené požáru a θ_m [°C] je povrchová teplota konstrukce. Součinitel α_c je závislý na geometrii povrchu, parametrech proudění, tloušťce povrchových vrstev apod. [3]. Norma [7] udává reprezentativní hodnoty α_c pro jednotlivé teplotní křivky a modely požáru. Pro normovou teplotní křivku platí $\alpha_c = 25$ W/(m²·K). [6, 9, 18]

Složka tepelného sálavého toku $\dot{h}_{net,r}$ je popsána rovnicí

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma[(\theta_r + 273,15)^4 - (\theta_m + 273,15)^4], \quad (12)$$

kde Φ je polohový faktor – blíže popsán v [7] (konzervativně lze uvažovat $\Phi = 1,0$), ε_m je povrchová emisivita prvku (pro beton $\varepsilon_m = 0,7$, pro ostatní materiály $\varepsilon_m = 0,8$), ε_f je emisivita požáru (obvykle rovna 1,0), σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)), θ_r [°C] je účinná teplota sálání prostředí požáru (lze uvažovat $\theta_r = \theta_g$) a θ_m [°C] je povrchová teplota konstrukce. [5, 6, 9]

Na straně odvrácené požáru lze čistý tepelný tok stanovit pomocí vztahu (10) při uvažování koeficientu $\alpha_c = 4$ W/(m²·K), přičemž sdílení tepla sáláním je počítáno samostatně. V případě výpočtu včetně zahrnutí vlivu sdílení tepla sáláním do tepelného toku od přestupu tepla se ve vztahu (11) uvažuje $\alpha_c = 9$ W/(m²·K). [5, 6]

Závěrem lze poznamenat, že řídicí rovnice (8) i okrajové podmínky (9) jsou nelineární. Z tohoto důvodu je nutné rovnici (8) s počáteční podmínkou (9) a příslušnými okrajovými podmínkami vyjádřenými vztahem (10) řešit numericky. Za tímto účelem lze využít řadu dostupných výpočetních aplikací využívající metody konečných prvků. [6, 13]

4.1.3 Požární zkoušky

Požární zkoušky jsou z hlediska teplotní analýzy konstrukce nejvíce vypovídající a přibližující se k reálné situaci, na druhou stranu bývají velice nákladné. Využívají se zejména pro analýzu netypických konstrukcí, pro ověření výpočetních modelů a postupů, pro certifikaci stavebních výrobků apod. [19]

Jelikož se významná část této práce zabývá návrhem, přípravou, průběhem a vyhodnocením zkoušek požární odolnosti, bude této problematice věnována následující samostatná kapitola.

5 Zkoušky požární odolnosti

Zkoušky požární odolnosti mají za cíl stanovit chování vzorku stavební konstrukce, který je vystaven definovaným podmínkám ohřívání a tlaku. Stanovuje se schopnost prvku odolat působení vysokým teplotám. Metoda spočívá ve stanovení kritérií, pomocí nichž lze vyhodnotit jednotlivé mezní stavy požární odolnosti, jakožto únosnost, zabránění průniku ohně (celistvost) a prostup tepla (izolace, popř. radiace), mimo jiných vlastností, jež je možné hodnotit. [10]

Vzhledem k faktu, že matematickým výpočetním modelem nelze postihnout veškerá rozhodující kritéria požární odolnosti, zvláště celistvost plošné konstrukce, odpadávání jednotlivých vrstev zkoušeného vzorku, či časové průběhy tvorby trhlin, budou vždy požární zkoušky základem prokázání požární odolnosti stavebních konstrukcí. [5]

5.1 Zkušební zařízení

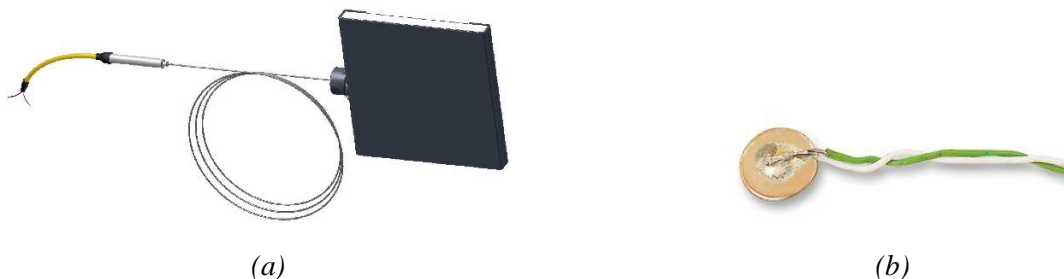
Pro vykonání požárních zkoušek je nutné zkušební zařízení, ve kterém bude zkušební vzorek vystaven definovaným účinkům teploty. Zařízení pro provádění zkoušek se mimo jiné skládá z:

- a) speciálně konstruované pece, kde dochází k vystavení zkušebnímu vzorku zkušebním podmínkám
- b) zařízení pro měření teploty v peci, na neohřívané straně vzorku a v případě potřeby uvnitř zkušebnímu vzorku
- c) zařízení pro hodnocení celistvosti a pro zajištění shody s kritérii chování uvedených v kapitole 3.1.1. [10]

V současnosti se pro vědu a výzkum v požárním inženýrství používají malorozměrové a středněrozměrové požární zkoušky. Středněrozměrové pece ($1,0\text{--}2,5\text{ m}^2$) se standardně používají pro zkoušení malých prvků. I když je dodržena stejná teplotní křivka, nemusí být intenzita požáru totožná s pecí velkého měřítka, neboť rozdílná geometrie může vést ke změnám koeficientů přestupu tepla ze stěn a horkých plynů z pece do zkušebnímu vzorku. Zkoušky malých a středních měřítek nemusí zaznamenat potenciální problémy, jako je smrštění, vychýlení nebo chování při spojení dílčích částí konstrukce. Přes tyto obtíže mohou ovšem poskytnout užitečné informace v mnoha situacích, zejména pokud jde o proces sdílení tepla v konstrukci. [3]

5.1.1 Měření teploty

Teploty v peci se měří termoelektrickými články v provedení deskových snímačů teploty. Jejich počet a poloha jsou uvedeny pro každý typ vzorku v příslušné zkušební normě. U plošných vzorků se měří teploty na neohřívané straně diskovými termoelektrickými články v předepsaných místech pro vyhodnocení průměrné a nejvyšší teploty. Termoelektrické články nesmějí být umístěny blíže než 100 mm od konce plochy posuzované na kritérium izolace [5, 10]. Další požadavky na počet, umístění, upevnění, údržbu apod. jsou uvedeny v [10]. Zmíněné termoelektrické články jsou zobrazeny na Obr. 6.

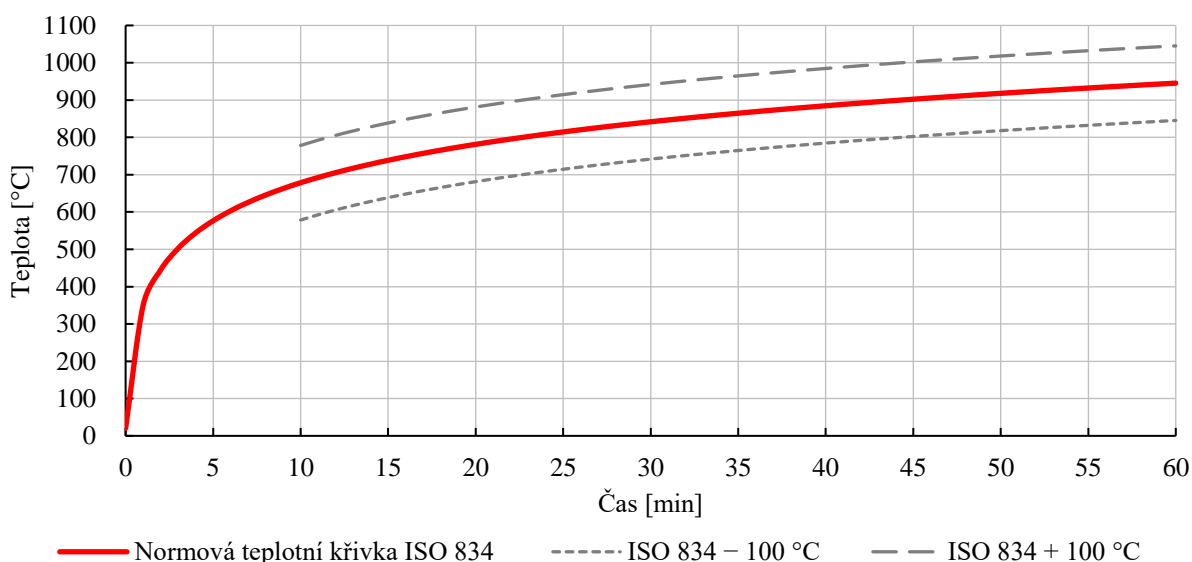


Obr. 6 Termoelektrické články: (a) deskový snímač teploty [20]; (b) diskový termoelektrický článek [21]

5.1.2 Teplota v peci

Průměrná teplota v peci neboli křivka ohřívání se u většiny požárních zkoušek řídí normovou teplotní křivkou, viz kapitolu 2.2.1. Ve skutečnosti je teplota plynu v peci nerovnoměrná přes objem pece. Nerovnoměrnost nastává z důvodu přítomnosti zkušebních vzorků a také vznikem turbulentního proudění, které může odvrátit horký plyn mimo testovaný vzorek. [13]

V [10] jsou specifikovány povolené odchylky od průměrné teploty uvnitř pece viz Obr. 7.



Obr. 7 Mezní odchylky po prvních 10 minutách zkoušky pro průměrnou teplotu uvnitř pece; podle [10]

Předpokládá se, že v prvních minutách zkoušky, kdy nejsou stanoveny žádné tolerance pro soulad s teplotní křivkou, se požární zkušebna bude během této doby snažit maximálně dodržet předepsaný vztah, aby rozdíly mezi průběhy požadované a dosažené křivky byly udrženy na minimu. [10]

5.2 Zkušební vzorky

5.2.1 Velikost a počet

Požaduje se, aby zkušební vzorek byl ve skutečné velikosti. V případech, kdy prvek nemůže být odzkoušen v reálné velikosti, musí být jeho velikost v souladu se specifickou zkušební metodou.

Tyto metody jsou předepsány řadou zkušebních norem. Například nosná či nenosná stěna musí mít velikost 3×3 m, stropní či střešní deska velikost 4×3 m, sloup výšku 3 m, nosník délku 4 m apod. [5, 10]

Při zkoušení dělicích prvků, u nichž se vyžaduje požární odolnost pouze z jedné strany, se zkouší jeden vzorek. Ohřívaná strana je strana, která bude v praxi vystavena účinkům požáru. [10]

5.2.2 Návrh, provedení a kondicionování

Zkušební vzorek musí být vyroben z materiálů, které reprezentují použití v praxi. Podstatné je uvažovat všechny povrchové úpravy a upevňovací prostředky, které jsou podstatnou součástí vzorku a které mohou ovlivnit jeho chování při zkoušce. [10]

V době zkoušky se musí pevnost a obsah vlhkosti vzorku blížit podmínkám v praxi. Betonové prvky a vzorky obsahující betonové části se mohou zkoušet v případech, kdy jsou kondicionovány po dobu alespoň 3 měsíců nebo pokud jejich relativní vlhkost v stanovených místech dosáhne 75 %. [10]

5.3 Zkušební postup

5.3.1 Měření a pozorování

Počátkem zkoušky se podle okolností provádí konkrétní měření a pozorování. Po celou dobu ohřívání zkušebního vzorku se zaznamenávají teploty z termoelektrických článků a tlak v peci, přičemž interval měření nepřesahuje jednu minutu. Dále se v průběhu celé zkoušky měří a zaznamenávají příslušné deformace. Při zkoušce požárně dělicích prvků se hodnotí mezní stav celistvosti v souladu s kritérii uvedených v kapitole 3.1.1. V případě výskytu plamenného hoření na odvrácené straně od ohřívaného povrchu vzorku, se zaznamená vznik a doba trvání tohoto hoření. [10]

Nezbytné je v průběhu celé zkoušky zapisovat jevy, jako např. vývin kouře, trhliny, měknutí, odlupování nebo uhelnatění apod. jednotlivých materiálů zkušebního vzorku. [10]

5.3.2 Ukončení a vyhodnocování zkoušky

Zkouška je považována za ukončenou, pokud je ohrožena bezpečnost personálu nebo hrozí poškození zařízení, jsou dosažena vybraná kritéria mezních stavů požární odolnosti, či na žádost objednavatele zkoušky. [10]

Výsledek zkoušky je vyjádřen časem (v minutách) uplynulým mezi zahájením ohřívání a okamžikem porušení konkrétního kritéria. Tato získaná doba je měřítkem pro vyhodnocení, zda konstrukce vyhovuje při požáru, avšak nemá přímý vztah k trvání skutečného požáru. [10]

6 Příprava, realizace a vyhodnocení požárních experimentů

V roce 2019 proběhly čtyři požární zkoušky, z čehož první tři byly provedeny v požární laboratoři FireLAB, UCEEB ČVUT v Praze a jedna v akreditované zkušebně PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí. Předmětem těchto zkoušek bylo stanovení časového vývoje teplot v konkrétních místech skladeb střešních pláštů, které jsou popsány v kapitole 6.1.

Tato kapitola v první části pojednává o přípravě těchto zkoušek, tedy o použitém zkušebním zařízení, zkušebních podmínkách a zkušebních vzorcích. Následující částí hovoří o průběhu jednotlivých zkoušek a o výstupních hodnotách, které jsou navzájem porovnány a vyhodnoceny.

6.1 Varianty skladeb střešních pláštů

Následující varianty skladeb střešních pláštů jsou zvoleny a navrženy tak, aby pořadí, tloušťka a materiálové provedení jednotlivých vrstev nejlépe odolávalo účinkům požáru a vedlo k dosažení nejvyšší možné požární odolnosti celé střešní konstrukce s přihlédnutím na ekonomické náklady pro zhotovení konstrukce střechy. Varianty skladeb střešních pláštů jsou popsány v Tab. 2 a na Obr. 8.

Součástí každé skladby je betonová vylehčující kazeta, na které je vždy umístěno dané souvrství střešního pláště. V případě požáru tvoří kazeta nejkritičtější oblast střešní konstrukce pro mezní stavy požárně dělicí funkce, tedy kombinaci mezních stavů E, I popř. W. Kazety jsou pro snížení pórových tlaků v betonu vyztuženy polypropylenovými vlákny.

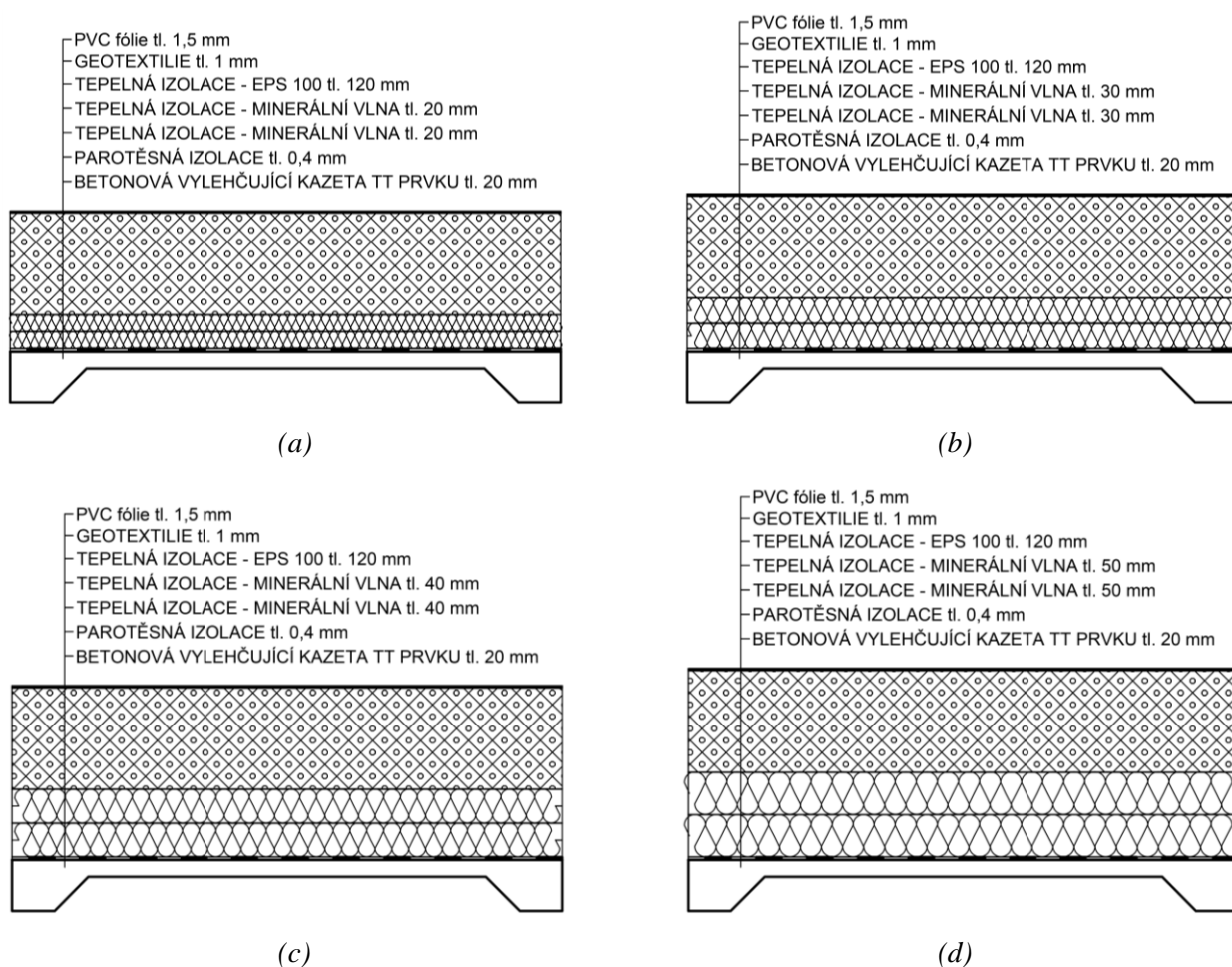
Tab. 2 Varianty skladeb střešních pláštů

Skladba střešního pláště	S1	S2	S3	S4
PVC fólie [mm]	1,5	1,5	1,5	1,5
Geotextilie [mm]	1	1	1	1
Tepelná izolace – expandovaný pěnový polystyren EPS [mm]	120	120	120	120
Tepelná izolace – minerální vlna [mm]	40 (2×20)	60 (2×30)	80 (2×40)	100 (2×50)
Parotěsná izolace [mm]	0,4	0,4	0,4	0,4
Betonová vylehčující kazeta v poli kazety (v žeburu kazety) [mm]	20 (60)	20 (60)	20 (60)	20 (60)
Celková tloušťka v poli kazety (v žeburu kazety) [mm]	182,9 (222,9)	202,9 (242,9)	222,9 (262,9)	242,9 (282,9)

Jednotlivé skladby střešních pláštů jsou tvořeny především tepelně izolačním souvrstvím v kombinaci minerální kamenné vlny a expandovaného pěnového polystyrenu (EPS). Minerální vlna je od kazety oddělena parotěsnou izolací ve formě modifikovaného samolepícího asfaltového pásu s nízkou požární zátěží. Hydroizolační vrstva je provedena z PVC fólie tloušťky 1,5 mm uložené na geotextilii.

V kapitole 3.1.2 je uvedeno, že střešní pláště mohou být hodnoceny jako konstrukční část druhu DP1 v případech, kdy spodní vrstva zajišťující stabilitu střešního pláště je z výrobků třídy reakce na oheň A1 nebo A2, v tloušťce alespoň 40 mm. Tento požadavek není u navržených variant skladeb splněn, neboť vylehčující kazeta má v poli tloušťku pouze 20 mm. Dále je v téže článku poznamenáno, že pokud je tloušťka spodní vrstvy zajišťující stabilitu střešního pláště menší než 40 mm, musí být nad touto vrstvou použity výrobky v tloušťce alespoň 40 mm, třídy reakce na oheň A1 nebo A2. Z tohoto důvodu je u první skladby S1 navržena minerální vlna v nejmenší možné tloušťce 40 mm, tedy 20 mm ve dvou vrstvách s navzájem se překrývajícími spárami.

Skladby S2, S3 a S4 jsou navrženy obdobně jako skladba S1 s rozdílem použití větší tloušťky izolantu z minerální vlny. Stejně jako u skladby S1 i zde platí nutnost vzájemného překrytí spar. Tato řešení byla zvolena za účelem docílení vyšší požární odolnosti z hlediska požárně dělící funkce střešní konstrukce.



Obr. 8 Varianty skladeb střešních pláštů: (a) skladba S1; (b) skladba S2; (c) skladba S3; (d) skladba S4

6.2 Přehled zkoušek

Provedené požární zkoušky následovaly v tomto pořadí:

- 1) Malorozměrová zkouška vysušených betonových vylehčujících kazet s upravenými skladbami S1 a S2. Vzorky skladeb nesou označení A1 a A2.
- 2) Malorozměrová zkouška nevysušených betonových vylehčujících kazet s upravenými skladbami S1 a S2. Vzorky skladeb jsou označeny B1 a B2.
- 3) Malorozměrová zkouška vysušených betonových vylehčujících kazet s upravenými skladbami S3 a S4. Vzorky skladeb nesou označení A a B.
- 4) Velkorozměrová zkouška střešních předpjatých TT panelů se skladbami S2 a S3.

Úprava skladeb u zkoušek 1–3 spočívá v odebrání horní hydroizolační vrstvy, tedy PVC fólie uložené na geotextilii. Tato úprava nemá výrazný vliv na výsledky těchto zkoušek, neboť z hlediska sdílení tepla jsou takto tenké vrstvy zanedbatelné.

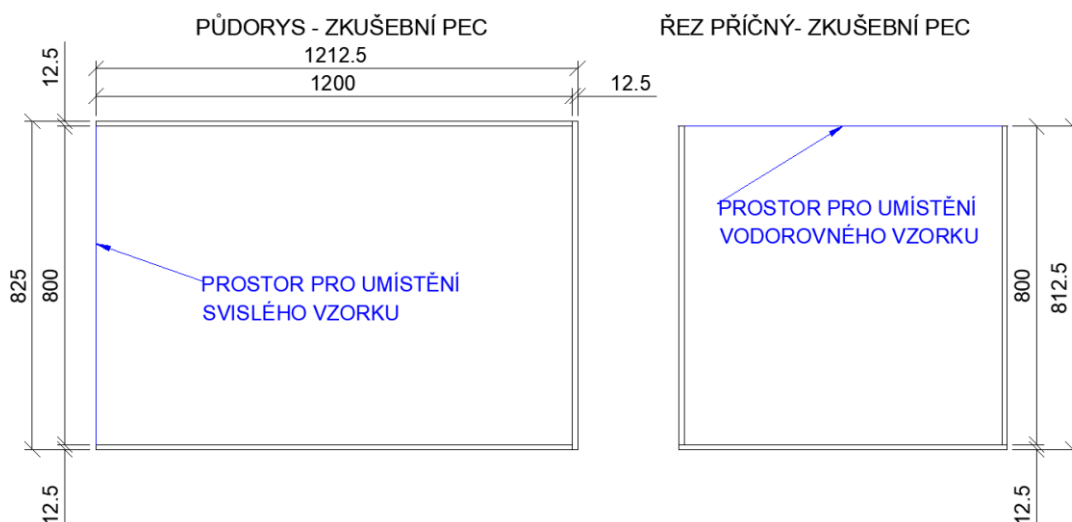
6.3 FireLAB, UCEEB ČVUT v Praze

V této kapitole jsou prezentovány data a výsledky zkoušek poskytnuté požární laboratoří FireLAB, UCEEB ČVUT v Praze. Autor této práce se podílel na návrhu zkoušek, přípravě experimentů, dokumentace průběhu zkoušek a jejich vyhodnocení.

6.3.1 Zkušební zařízení

V rámci diplomové práce [22] byla navržena a sestavena mobilní požární pec pro předběžné ověřování požární odolnosti svislých či vodorovných prvků v malém měřítku.

Pec pro malorozměrové zkoušky má vnitřní rozměry $1,2 \times 0,8 \times 0,8$ m (délka \times šířka \times hloubka). Tyto rozměry odpovídají 1/3 velikosti zkušebního zařízení Room Corner Test. Rozměry pece jsou znázorněny na Obr. 9. V této peci lze testovat svislé prvky na požární odolnost o rozměrech exponované části šířky 0,8 m a výšky 0,8 m, což přibližně odpovídá 5 % plochy při zkoušce v akreditované zkušebně. [22]



Obr. 9 Rozměry mobilní požární pece UCEEB ČVUT v Praze; převzato z [22]

Konstrukce pece musí být sestavena z nehořlavých materiálů. Z tohoto důvodu je pec navržena z cementem pojené betonové desky se sendvičovou strukturou a povrchovými vrstvami oboustranně vyztuženými skelnou tkaninou. Desky jsou tloušťky 12,5 mm s třídou reakce na oheň A1. Pro vhodné ventilační podmínky jsou v delších stěnách pece otvory pro přirozený přívod vzduchu a odvod tepla a kouře s rozměry 300×100 mm. Uprostřed pece se nachází pískový hořák o rozměrech $300 \times 100 \times 100$ mm. Jako spalovaný plyn je použit propan s čistou výhřevností 46,4 MJ/kg.

Pro provedení zkoušky byl v požární laboratoři vymezen prostor před požární komorou pod odtahovým zvonem Room Corner Testu. Do tohoto prostoru byla umístěna výše zmíněná mobilní požární pec v sestavě pro zkoušení chování stropních či střešních prvků při požáru (Obr. 10).



Obr. 10 Mobilní požární pec v sestavení pro zkoušení vodorovných prvků; převzato z [23]

6.3.2 Zkušební podmínky

Teplota v peci byla simulována výkonem pískového hořáku (Tab. 3), který byl po dobu průběhu zkoušky automaticky zvyšován podle předem stanoveného programu. Program má uvnitř pece zajistit teploty blízké normové teplotní křivce dle ISO 834 popsané v kapitole 2.2.1.

Teplota, která je porovnávána s normovou teplotní křivkou, se stanovuje aritmetickým průměrem ze čtyř termočlánků (1–4) v horní části pece:

- termočlánky 1–4 jsou umístěny ve vzdálenosti 200 mm od delších i kratších stěn, a to ve výšce 100 mm pod horním povrchem pece;
- termočlánky 5–8 jsou umístěny ve vzdálenosti 200 mm od delších i kratších stěn, a to ve výšce 200 mm nad podlahou pece.

Měřenými veličinami jsou povrchové teploty na rozhraní materiálů zkoušeného vzorku. Zkouška je ukončena po 45 minutách, případně dříve, pokud dojde k porušení vzorku (plamennému hoření na neohřívané straně).

Tab. 3 Výkon pískového hořáku v čase; převzato z [22]

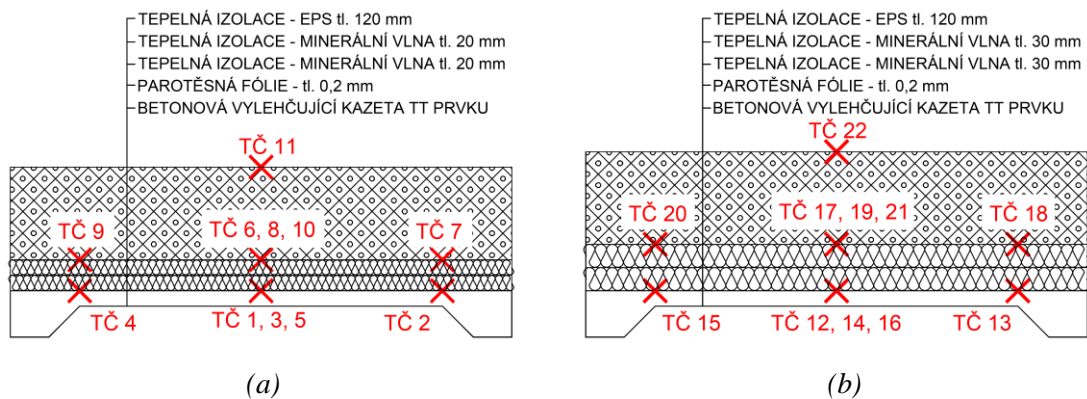
Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)	Čas (s)	Výkon (kW)
0	0,0	150	88,0	570	117,0	990	127,6	1410	136,0
10	60,0	180	90,0	600	117,4	1020	128,0	1440	137,0
15	61,0	210	92,0	630	118,0	1050	128,4	1470	137,2
20	62,0	240	96,0	660	119,0	1080	128,6	1500	137,4
25	63,0	270	100,0	690	119,6	1110	128,8	1530	137,6
30	64,0	300	104,0	720	120,0	1140	128,84	1560	138,0
35	66,0	330	106,0	750	121,0	1170	128,90	1590	140,0
40	70,0	360	110,0	780	122,0	1200	129,0	1620	140,2
45	72,0	390	112,0	810	123,0	1230	130,0	1650	140,4
50	74,0	420	112,0	840	124,0	1260	132,4	1680	140,6
55	76,0	450	113,0	870	125,0	1290	133,0	1710	140,8
60	78,0	480	114,0	900	126,0	1320	133,1	1740	141,0
90	80,0	510	115,0	930	126,6	1350	133,4	1770	142,2
120	86,0	540	116,0	960	127,0	1380	134,0	1800	142,4

6.3.3 Zkušební vzorky

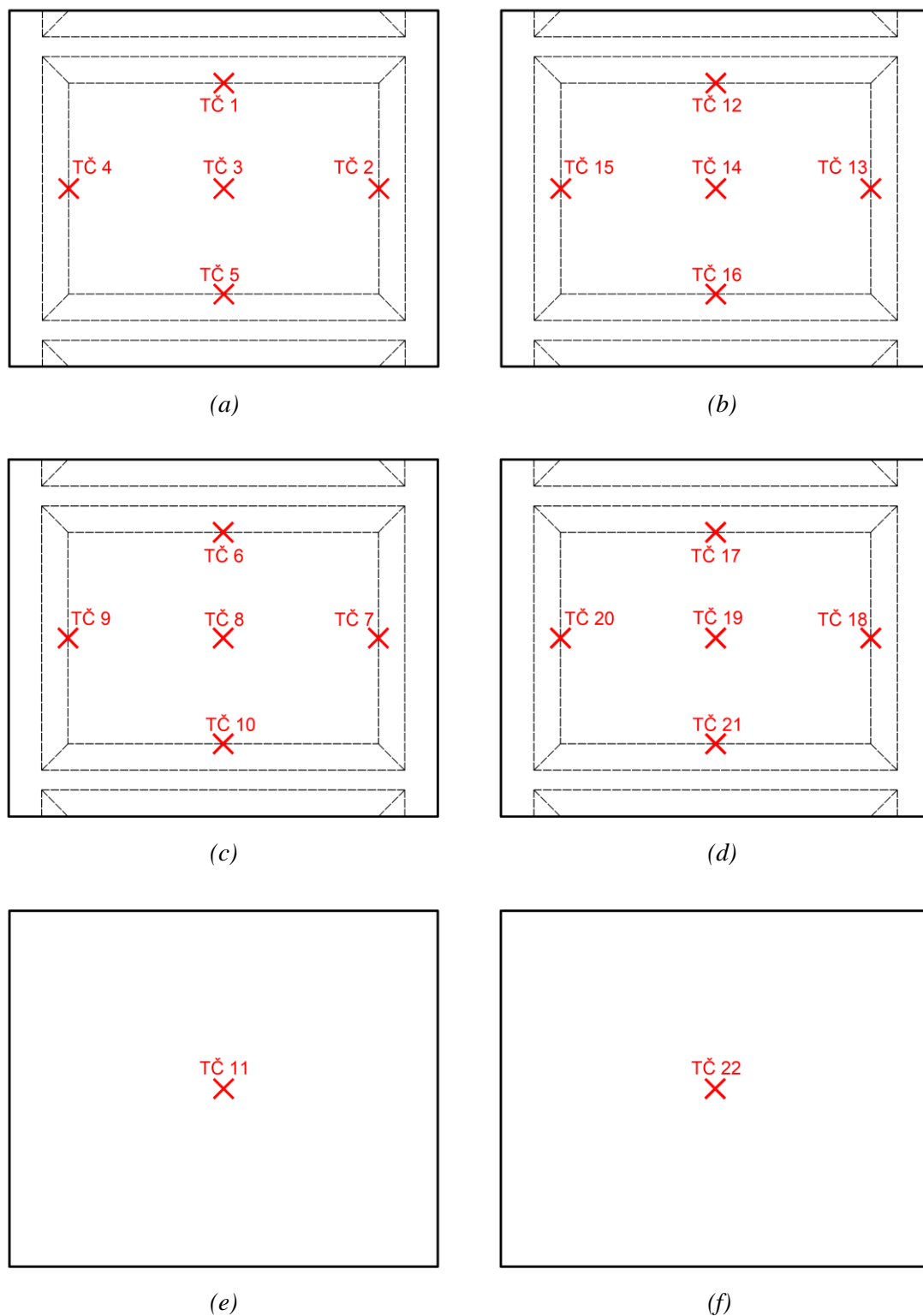
Vzorky byly umístěny do ocelového rámu nahrazující stropní díl mobilní požární pece s vnitřními rozměry 1200 × 800 mm. Ocelový rám je s konstrukcí pece pevně spojen závitovými tyčemi, na který jsou následně prostě uloženy zkušební vzorky. Veškeré spáry kolem vzorků jsou vyplněny minerální vlnou, zároveň jsou vzorky od sebe odděleny cementovláknitou deskou tloušťky 15 mm po celé šířce pece.

Na horní líc expandovaného pěnového polystyrenu bylo umístěno zatížení o celkové hmotnosti 14,7 kg pro vzorky A1, B1 a 14,58 kg pro vzorky A2, B2. Zatížení na každém vzorku tvořily dvě pórobetonové tvárnice YTONG tloušťky 100 mm, které byly položeny na podložky z minerální vlny, a to z důvodu vytvoření mezery po osazení termočlánku na vnější líc zkušební vzorku.

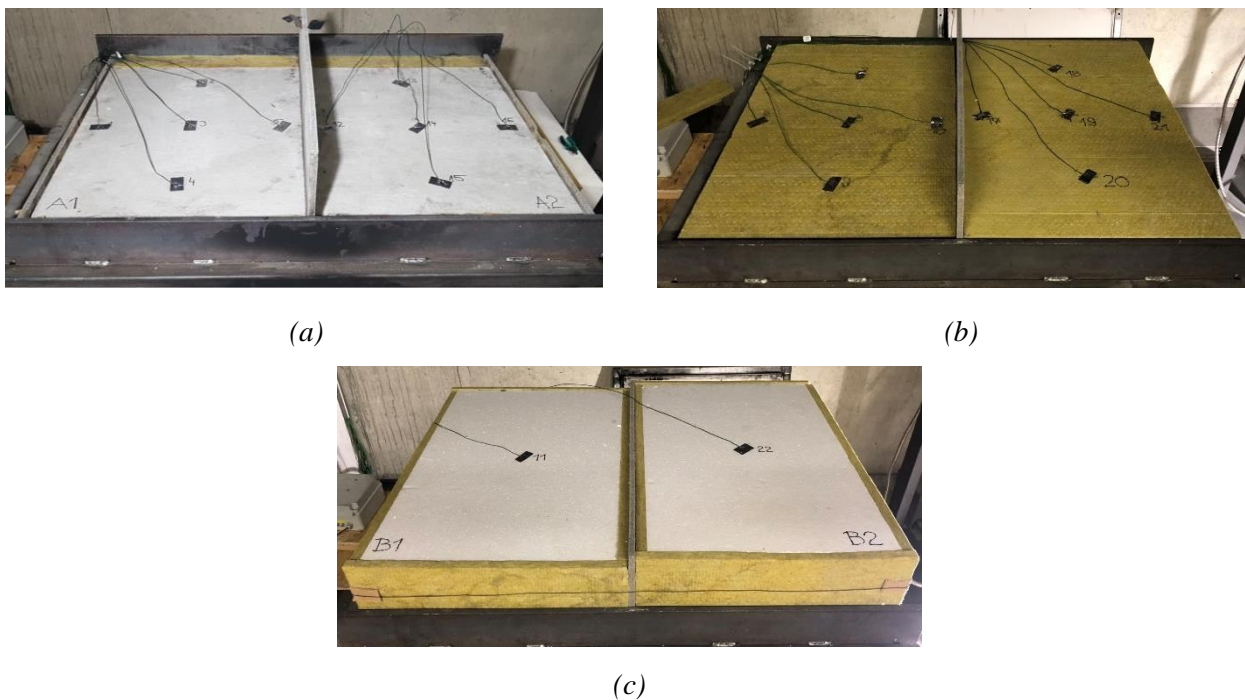
Každý vzorek byl sledován celkem jedenácti termočlánky umístěnými v rastru nad žebry betonové kazety a v geometrickém středu vzorku, tedy pěti termočlánky na rozhraní betonová kazeta / minerální vlna, dalšími pěti termočlánky na rozhraní minerální vlna / EPS a jedním termočlánkem na horním líci EPS (Obr. 11–13). Uchyceny byly k povrchu kovovými sponkami a přelepeny hliníkovou folií.



Obr. 11 Rozmístění termočlánků v řezu: (a) vzorek A1, B1; (b) vzorek A2, B2



Obr. 12 Půdorysné rozmístění termočlánků vzorků A1, A2 a B1, B2: (a), (b) mezi betonovou kazetou a minerální vlnou; (c), (d) mezi minerální vlnou a EPS; (e), (f) na EPS – vnější líc



Obr. 13 Vzorky A1, B1 a A2, B2 při montáži: (a) umístění termočlánků na betonových kazetách; (b) umístění termočlánků mezi minerální vlnu a EPS; (c) umístění termočlánků na EPS před osazením zatížení²

U zkušebních vzorků s označením A1, A2 proběhlo vysoušení v UCEEB ČVUT v Praze. Před umístěním do teplovzdušné sušárny (Obr. 14) byly tyto vzorky zváženy, pro možnost sledování úbytku vody, a tedy i hmotnosti (Tab. 4). Zaznamenávány byly průběžné hodnoty hmotnosti do chvíle, kdy se hmotnost prvku ustálila a bylo možné konstatovat vysušení vzorku. Teplota sušení byla po celou dobu nastavena na 70 °C. Vzorky B1, B2 byly sušeny přirozeně po dobu jednoho měsíce od jejich výroby.



Obr. 14 Umístění vzorků A1, A2 v teplovzdušné sušárně

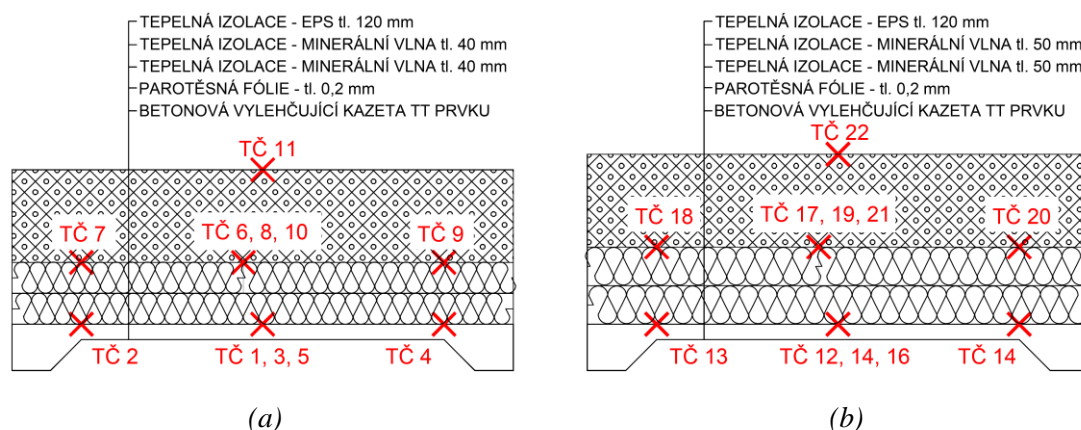
² Fotografie jsou oproti Obr. 12 otočeny o 90° směrem doleva (proti směru hodinových ručiček).

Tab. 4 Sledování úbytku hmotnosti vzorků A1, A2 během sušení

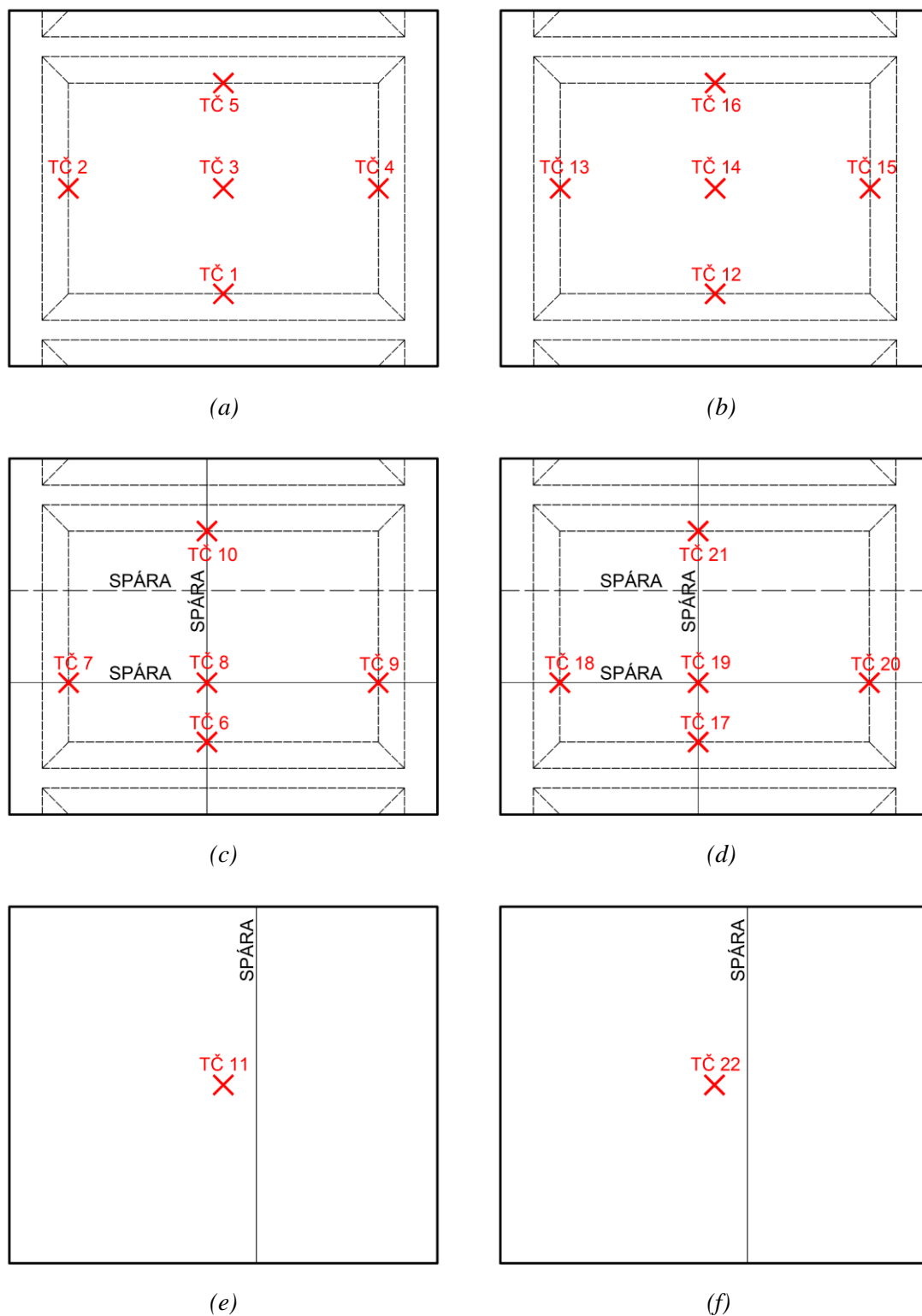
Datum	Čas	Vzorek	Hmotnost [kg]
25. 4. 2019	16:05	A1	28,335
25. 4. 2019	16:05	A2	28,528
2. 5. 2019	7:30	A1	27,643
2. 5. 2019	7:30	A2	27,787
2. 5. 2019	11:05	A1	27,640
2. 5. 2019	11:05	A2	27,779

Tab. 4 poukazuje, že během doby sušení došlo k významnému úbytku hmotnosti způsobené odpařením vody ze zkušebních vzorků. Po výsledném zvážení byl úbytek hmotnosti vzorku A1 0,695 kg a u vzorku A2 0,749 kg.

Navazující zkouška vzorků A, B proběhla za účelem zhodnocení umístění termočlánků v místě spar minerální vlny či mimo ně. Předpokládalo se, že termočlánky v místě spar minerální vlny naměří vyšší teploty oproti termočlánkům mimo tyto spáry. Rozmístění termočlánků je patrné z Obr. 15–17.



Obr. 15 Rozmístění termočlánků v řezu: (a) vzorek A; (b) vzorek B



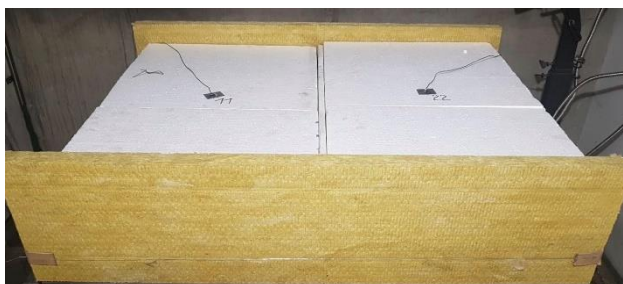
Obr. 16 Půdorysné rozmístění termočlánků vzorků A, B: (a), (b) mezi betonovou kazetou a minerální vlnou; (c), (d) mezi minerální vlnou a EPS; (e), (f) na EPS – vnější líc



(a)



(b)



(c)

Obr. 17 Vzorky A a B při montáži: (a) umístění termočlánků na betonových kazetách; (b) umístění termočlánků mezi minerální vlnu a EPS (c) umístění termočlánků na EPS před osazením zatížení³

6.3.4 Průběhy zkoušek

V průběhu zkoušek byla teplota okolního prostředí přibližně 20 °C, relativní vlhkost vzduchu 28 %. Počáteční výkon VZT zvonu byl nastaven na 30 %. Průběhy jednotlivých zkoušek jsou pro přehlednost znázorněny pomocí následujících tabulek 5–7.

Tab. 5 Průběh zkoušky vzorků A1, A2

Čas [s]	Čas [min]	Vzorek	Pozorování
360	6	-	syčení ze spalovacího prostoru
1500	25	A1	termočlánek č. 8 překročil teplotu 140 °C
1665	27,75	-	výkon VZT se zvyšuje na 40 %
2295	38,25	A2	termočlánek č. 19 překročil 140 °C
2700	45	-	ukončení zkoušky
3600	60	-	ukončení záznamu hodnot

³ Fotografie jsou oproti Obr. 16 otočeny o 90° směrem doprava (po směru hodinových ručiček).

Tab. 6 Průběh zkoušky vzorků B1, B2

Čas [s]	Čas [min]	Vzorek	Pozorování
170	2,8	B1	počátek odštěpování z betonové kazety
235	3,9	B2	počátek odštěpování z betonové kazety
350	5,8	B1	výrazné odštěpení betonové kazety
380	6,3	B2	masivní odštěpení žebra betonové kazety
500	8,3	B1, B2	kontinuální odštěpování betonových kazet
550	9,1	B1	odštěpení žebra betonové kazety
1250	20,8	B1	hlasité zapraskání ve vzorku betonové kazety
1320	22	B1	termočlánek č. 8 překročil 140 °C
1550	25,8	-	výkon VZT se zvyšuje na 40 %
2300	38,3	B1	termočlánek č. 11 překročil 160 °C
2365	39,4	B2	termočlánek č. 19 překročil 140 °C
2415	40,2	B1	vychýlení ztížení (propad jedné z podložek, na kterých bylo umístěno zatížení)
2535	42,2	B1	samovolné vycentrování zatížení (propad druhé podložky podpírající zatížení)
2700	45	-	ukončení zkoušky
3600	60	-	ukončení záznamu hodnot

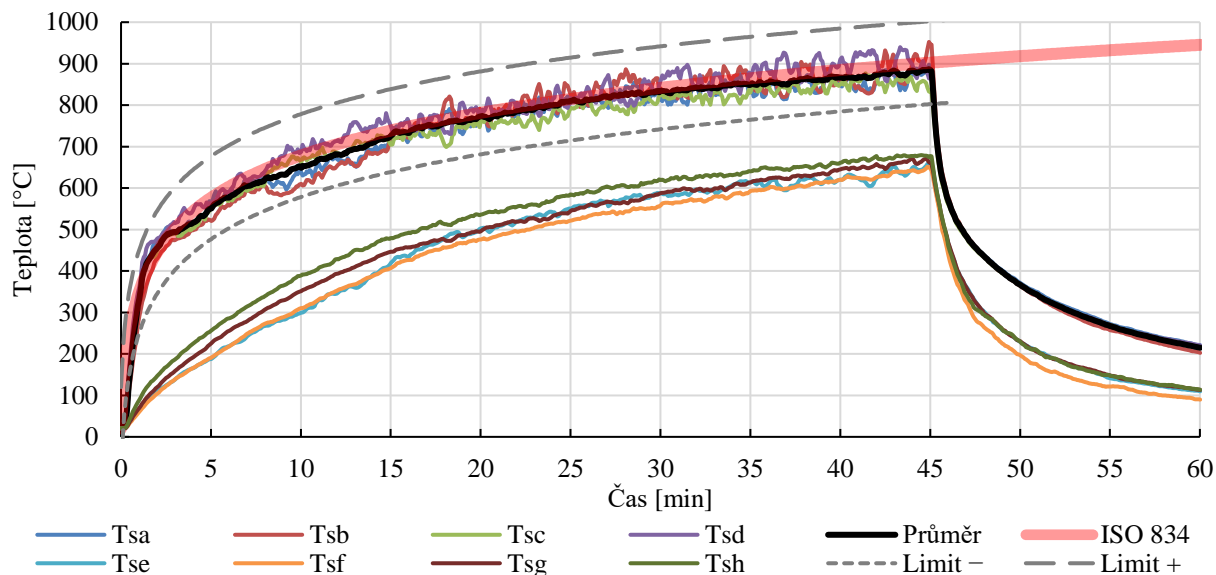
Tab. 7 Průběh zkoušky vzorků A, B

Čas [s]	Čas [min]	Vzorek	Pozorování
320	5,33	A	počátek odštěpování z betonové kazety
420	7	B	počátek odštěpování uprostřed betonové kazety
480	8	B	odštěpování uprostřed betonové kazety
530	8,83	B	výrazné odštěpení betonové kazety
1120	18,67	A	odštěpení betonové kazety
1960	32,67	A	termočlánek č. 8 překročil teplotu 100 °C
2360	39,33	A	na termočlánek č. 8 dosažena teplota 180 °C
2550	42,5	A	termočlánek č. 10 překročil teplotu 100 °C
2600	43,33	B	termočlánek č. 19 překročil teplotu 100 °C
2700	45	A, B	ukončení zkoušky, vypnutí hořáku, vrstva EPS bez porušení
3200	53,33	A	protavení vrstvy EPS
3400	56,67	A	propad zatížení
3530	58,83	A	celkový propad zatížení
4500	75	-	ukončení záznamu hodnot

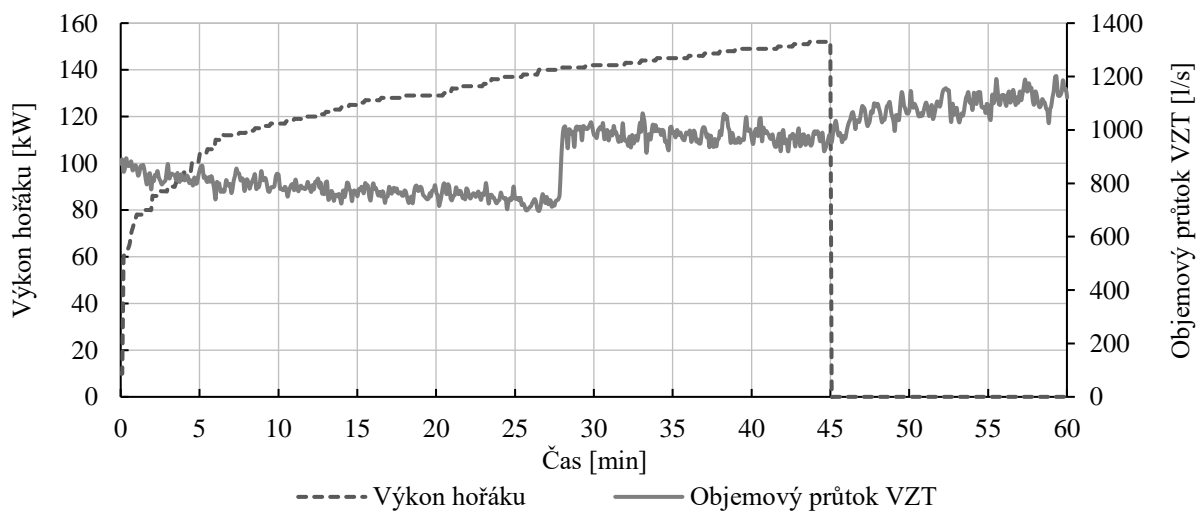
6.3.5 Výsledky zkoušek

Grafické výstupy jednotlivých zkoušek jsou vyobrazeny na Obr. 18–41.

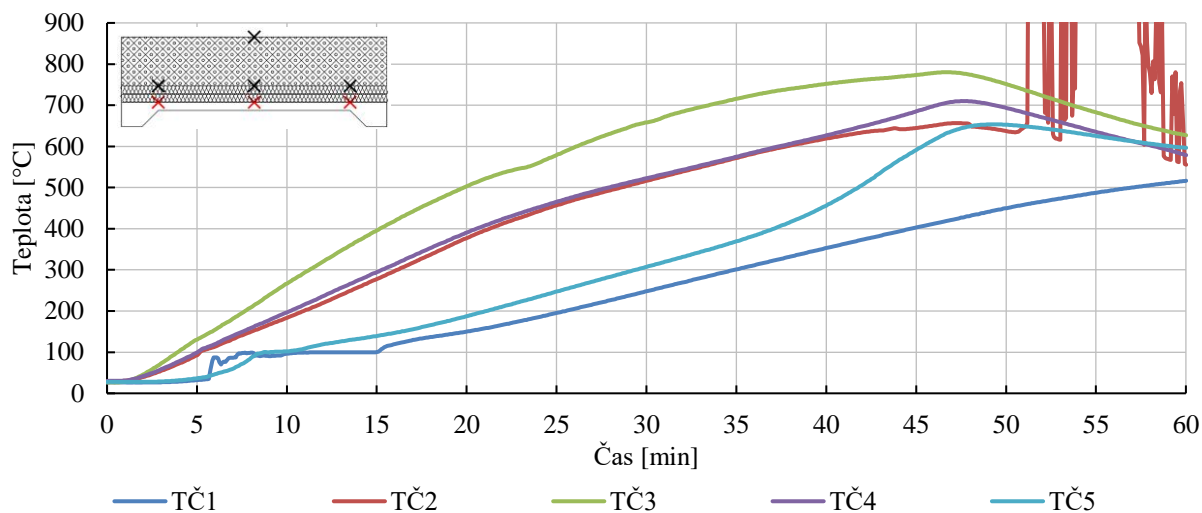
Zkouška vzorků A1, A2



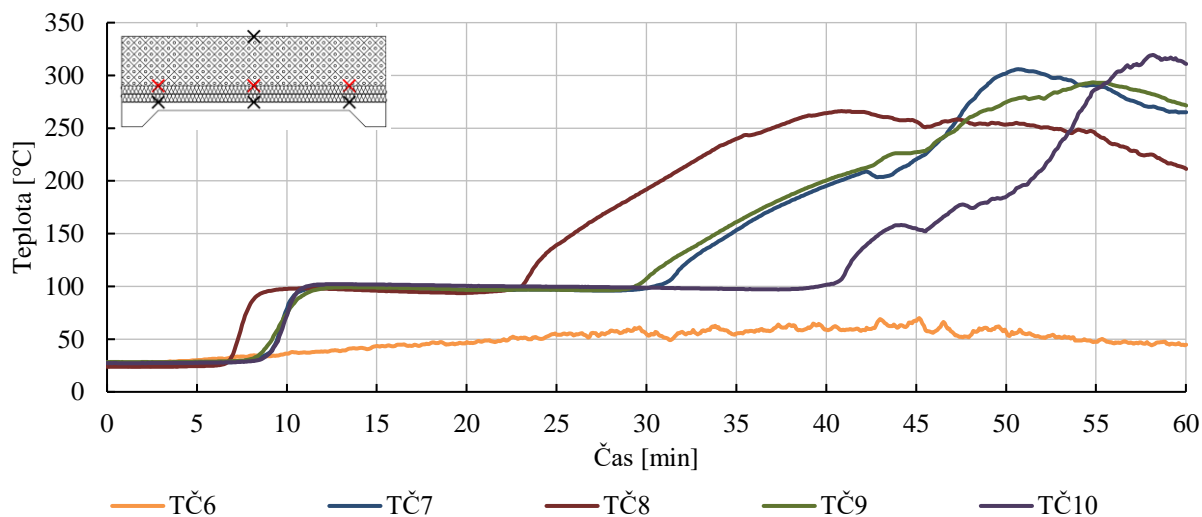
Obr. 18 Průběh teplot uvnitř pece při zkoušce A1, A2



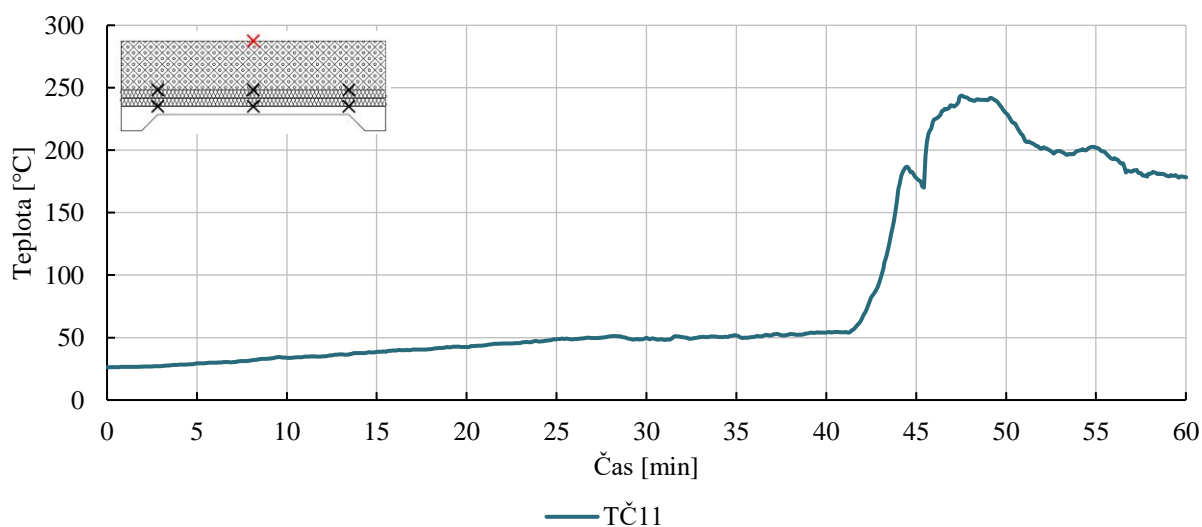
Obr. 19 Okrajové podmínky zkoušky A1, A2 – objemový průtok VZT a výkon hořáku



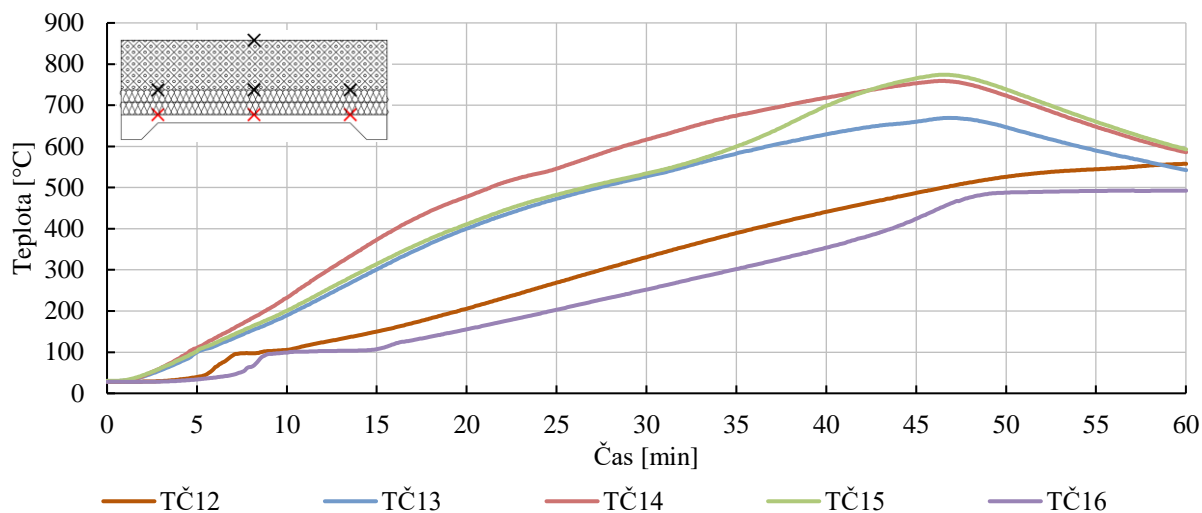
Obr. 20 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A1 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou



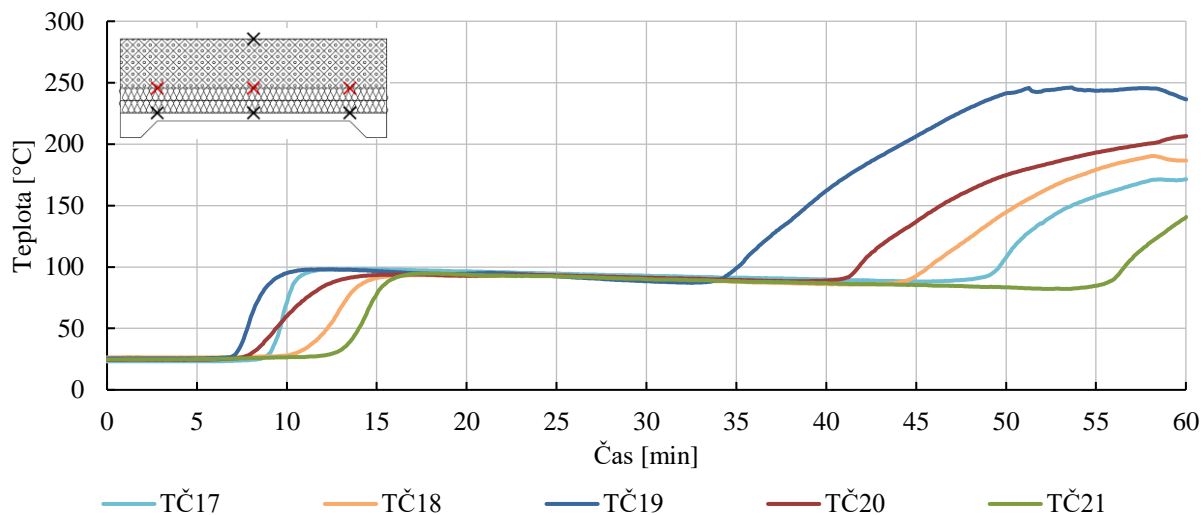
Obr. 21 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A1 – mezi minerální vlnou a EPS



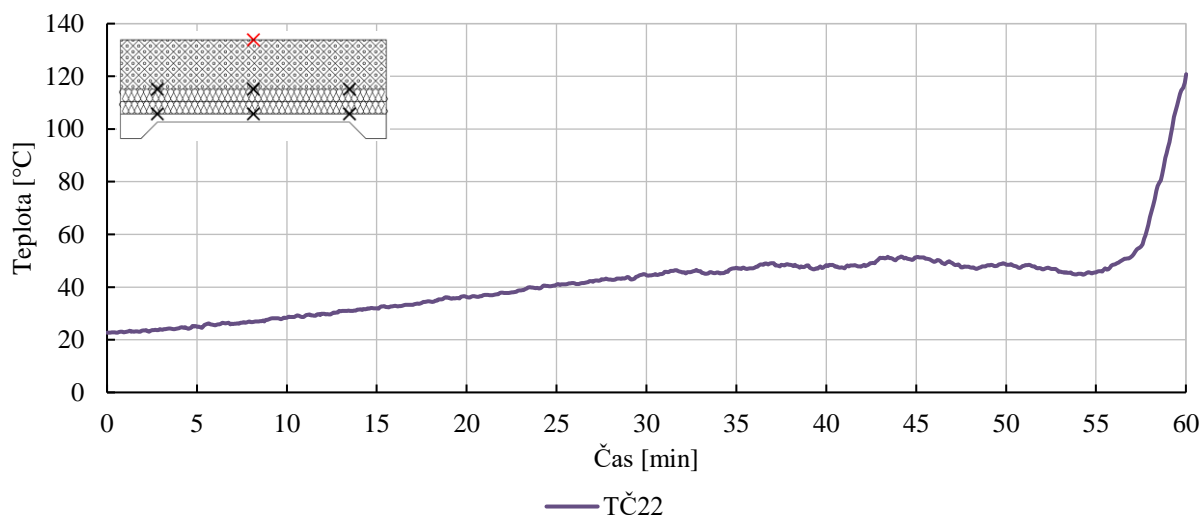
Obr. 22 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A1 – na horním líci EPS



Obr. 23 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A2 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou

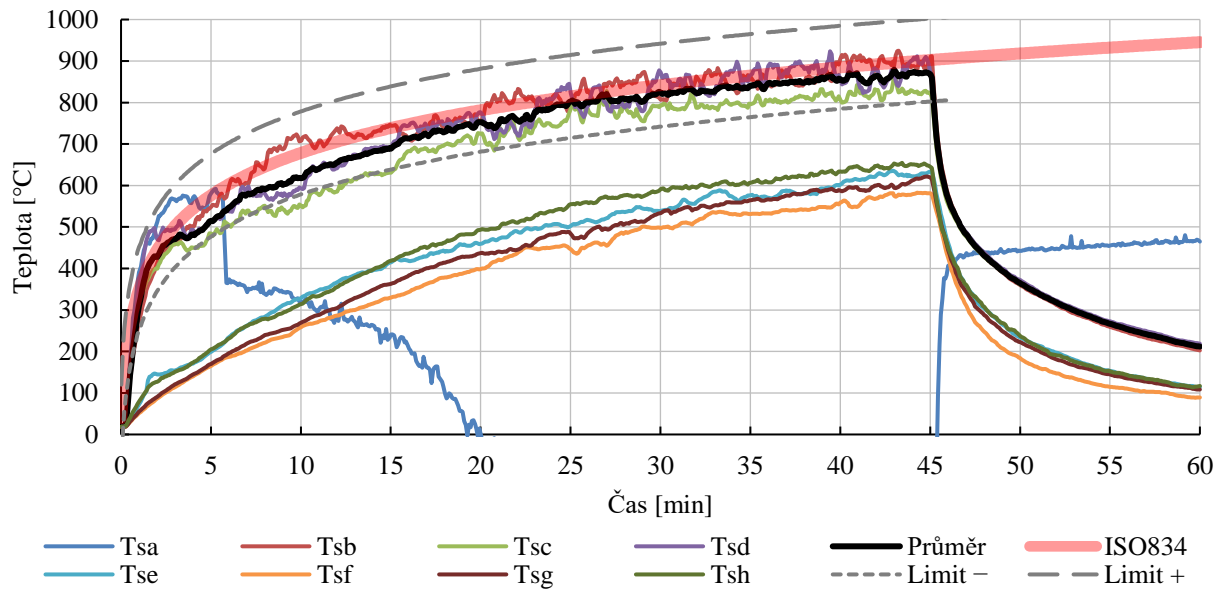


Obr. 24 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A2 – mezi minerální vlnou a EPS



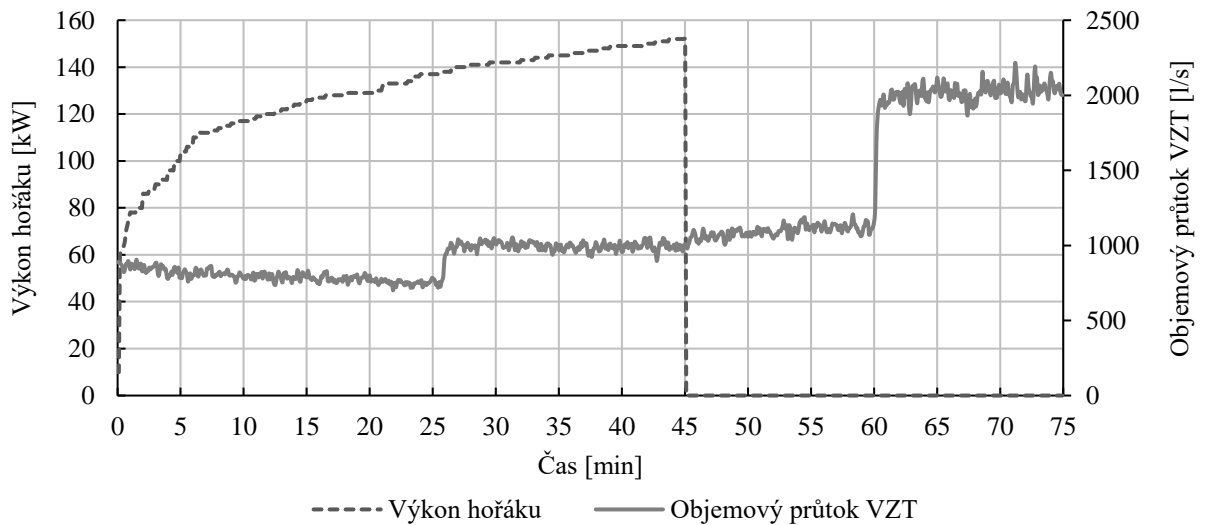
Obr. 25 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A2 – na horním líci EPS

Zkouška vzorků B1, B2

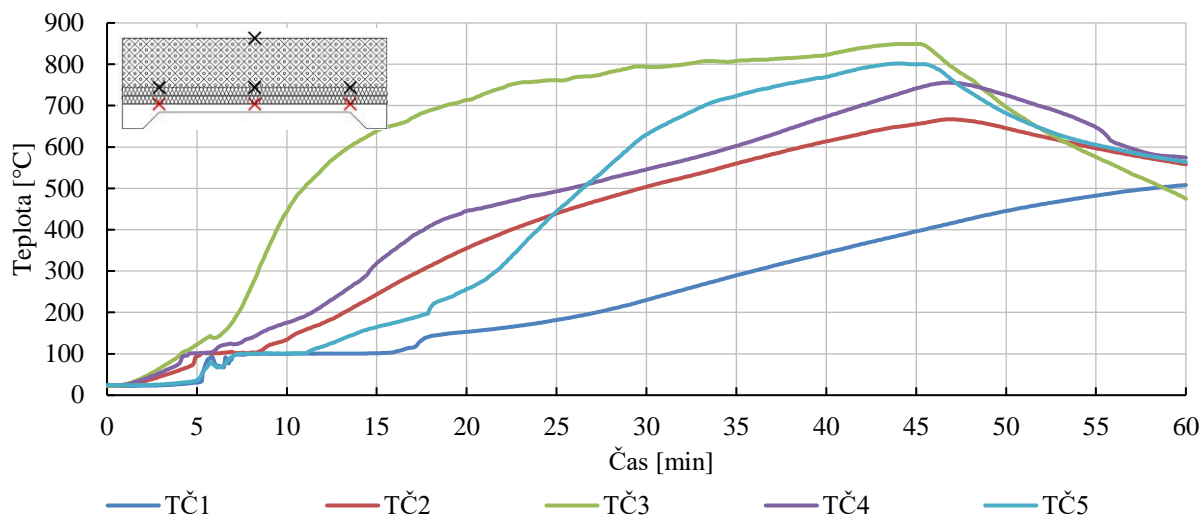


Obr. 26 Průběh teplot uvnitř pece při zkoušce B1, B2 vč. porovnání s normovou teplotní křivkou ISO 834

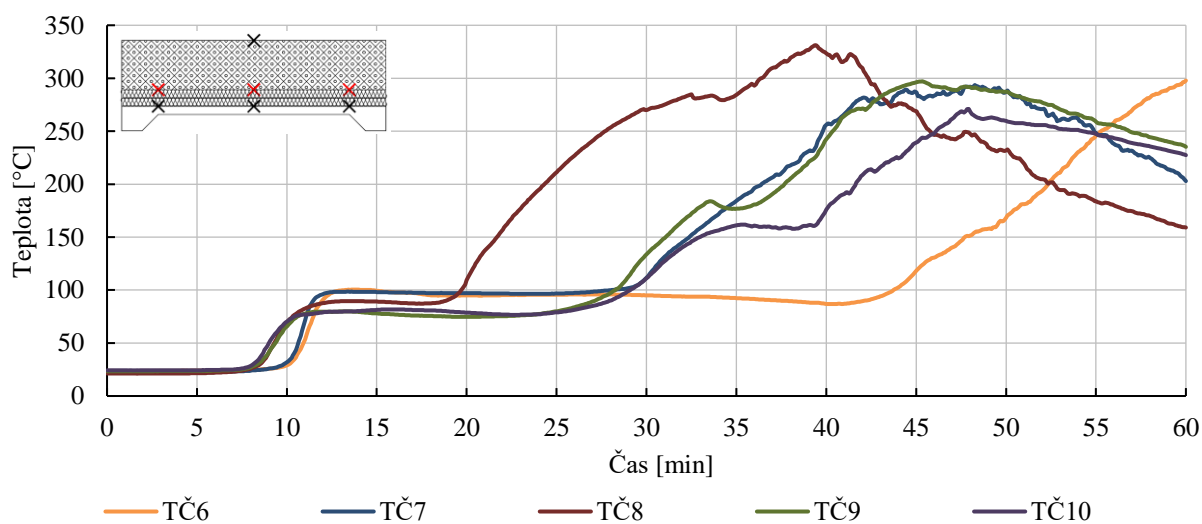
V důsledku odštěpování betonových kazet došlo k porušení termočláčku T_{sa} . Z tohoto důvodu je průběh průměrné teploty určen pouze z termočlámků T_{sb} – T_{sd} .



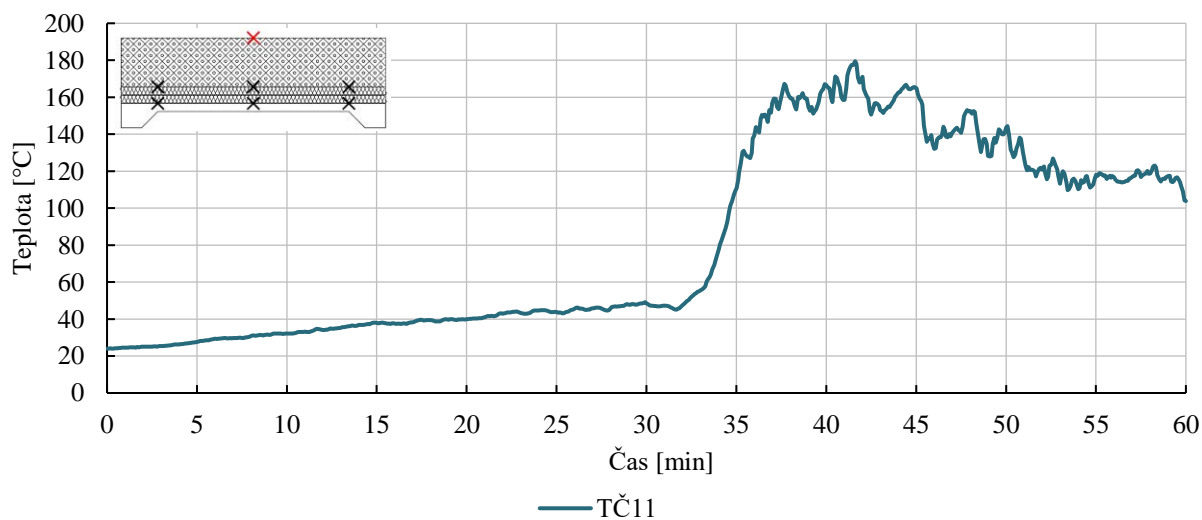
Obr. 27 Okrajové podmínky zkoušky B1, B2 – objemový průtok VZT a výkon hořáku



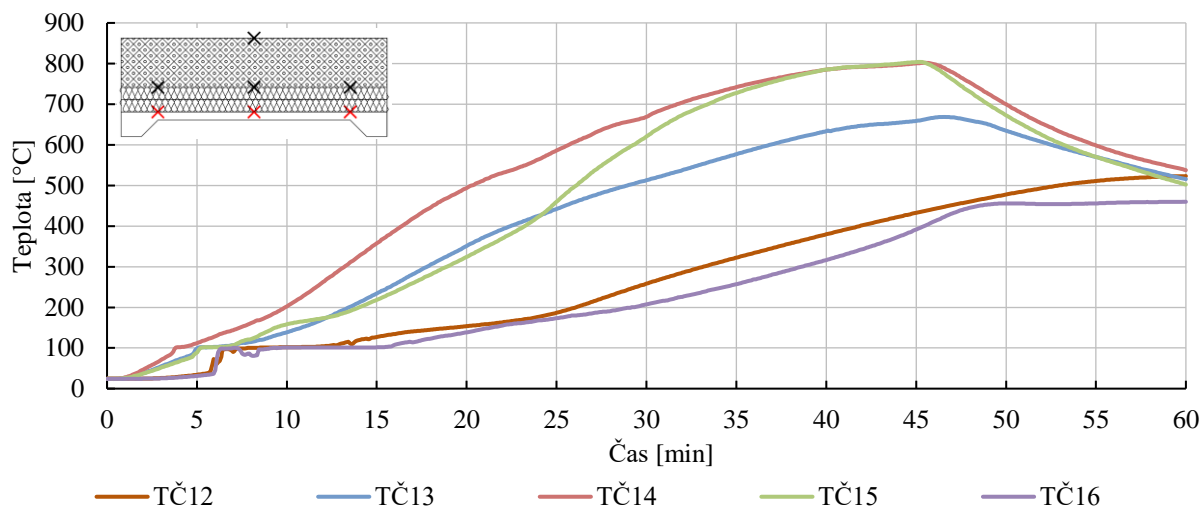
Obr. 28 Průběh teplot na neohříváné straně vzorku B1 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou



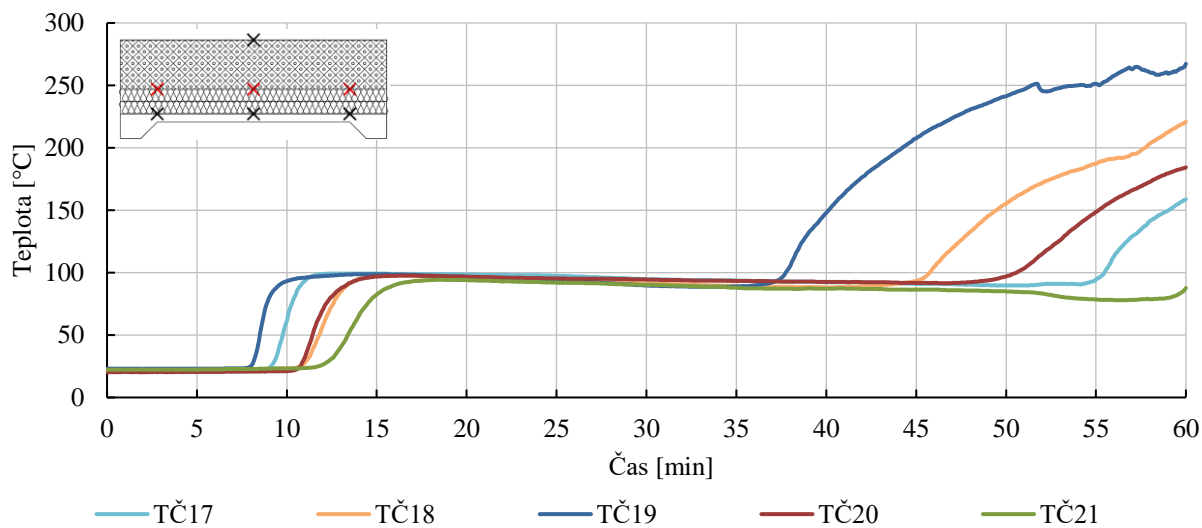
Obr. 29 Průběh teplot na neohříváné straně vzorku B1 – mezi minerální vlnou a EPS



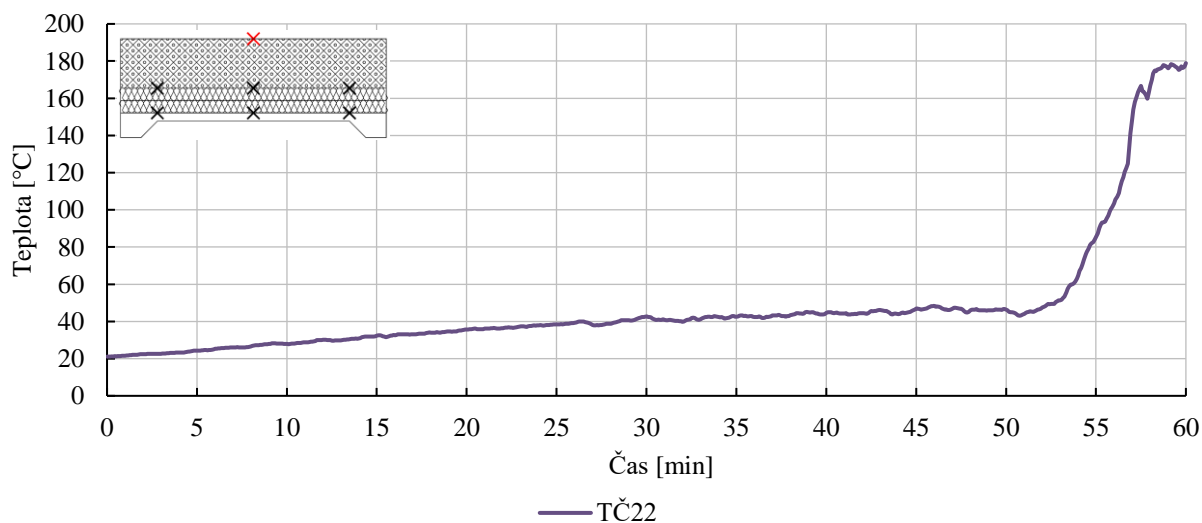
Obr. 30 Průběh teplot na neohříváné straně vzorku B1 – na horním líci EPS



Obr. 31 Průběh teplot na neohříváné straně vzorku B2 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou

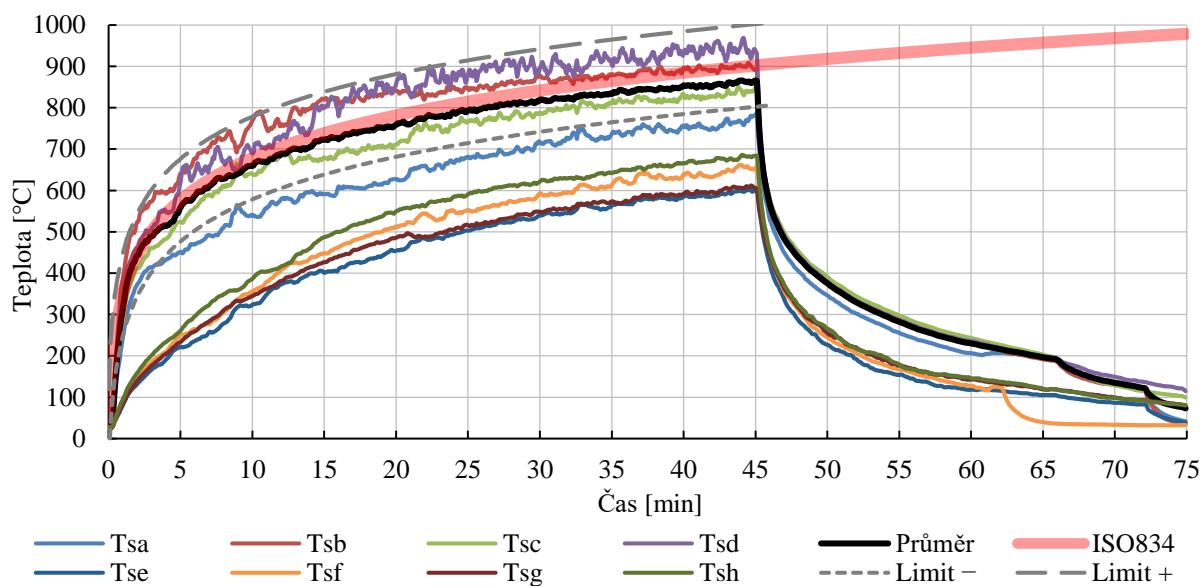


Obr. 32 Průběh teplot na neohříváné straně vzorku B2 – mezi minerální vlnou a EPS

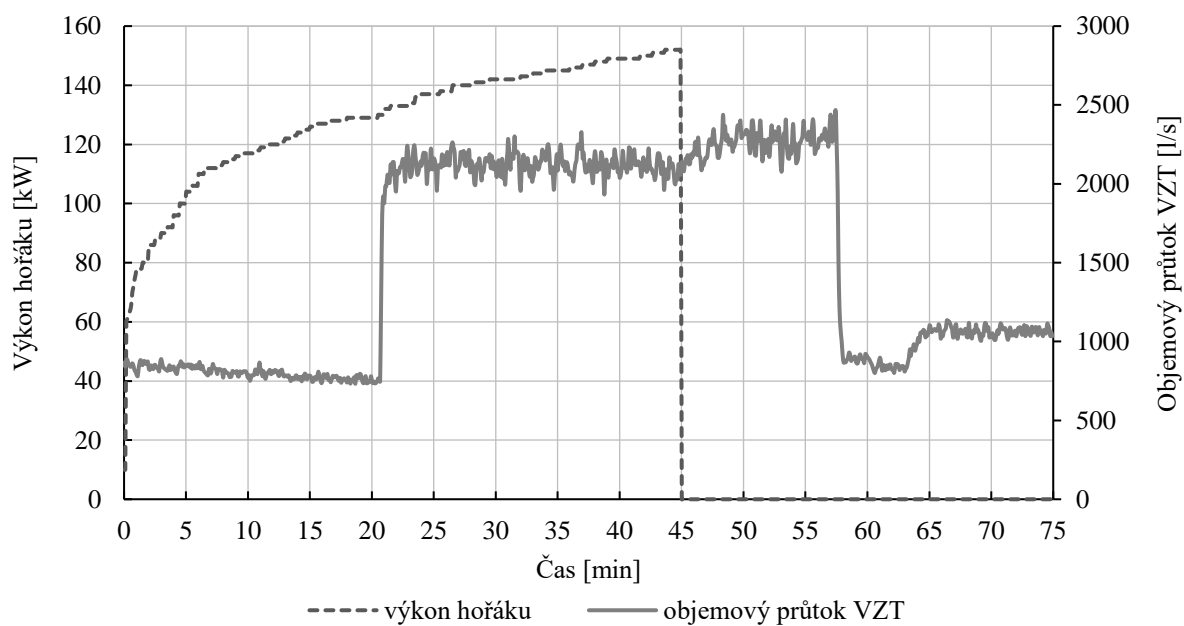


Obr. 33 Průběh teplot na neohříváné straně vzorku B2 – na horním líci EPS

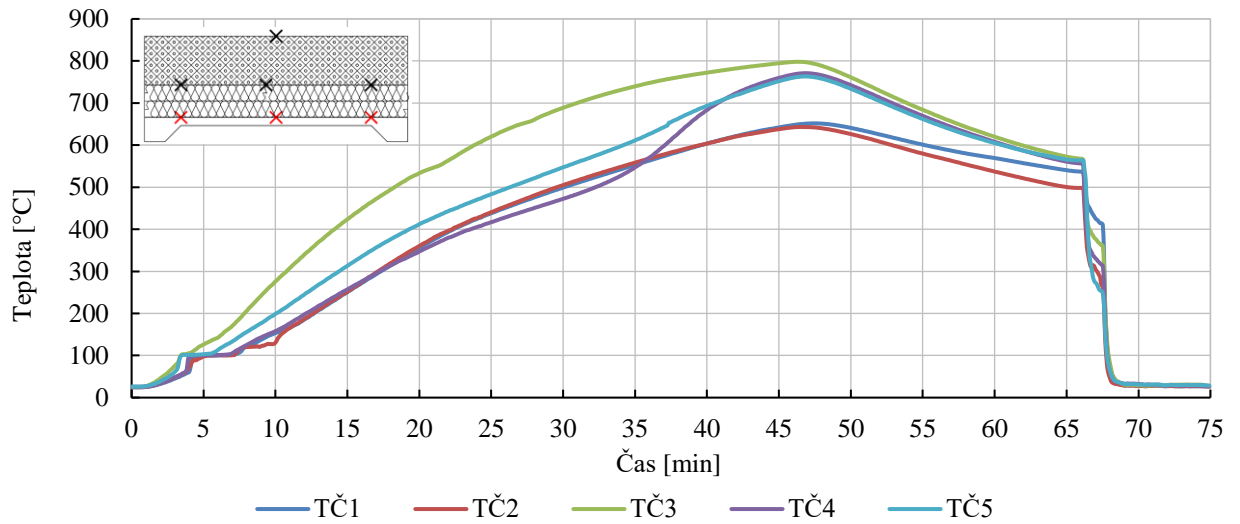
Zkouška vzorků A, B



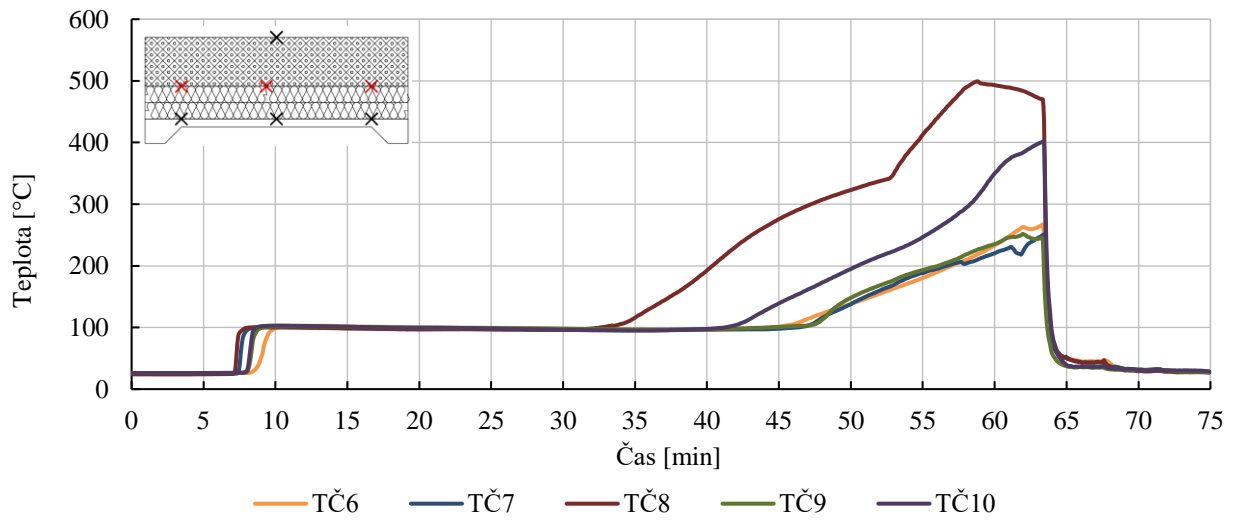
Obr. 34 Průběh teplot uvnitř pece při zkoušce A, B vč. porovnání s normovou teplotní křivkou ISO 834



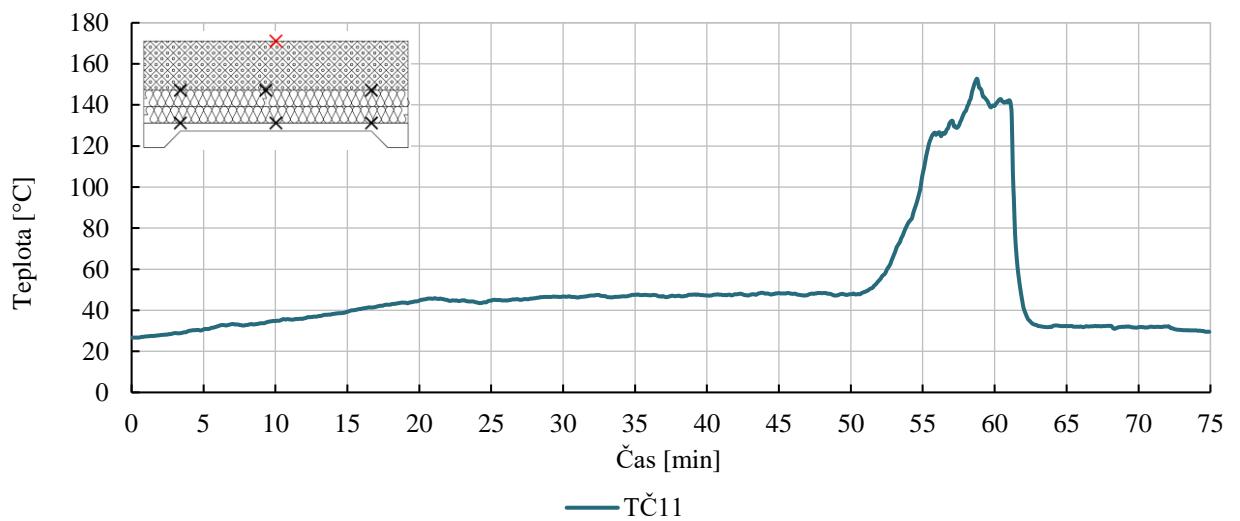
Obr. 35 Okrajové podmínky zkoušky A, B – objemový průtok VZT a výkon hořáku



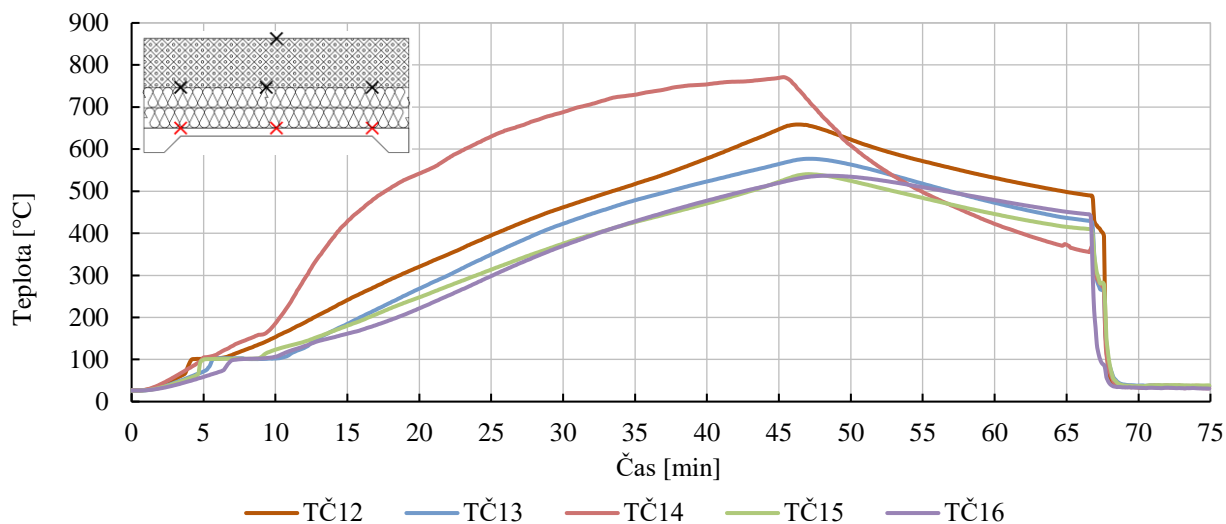
Obr. 36 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou



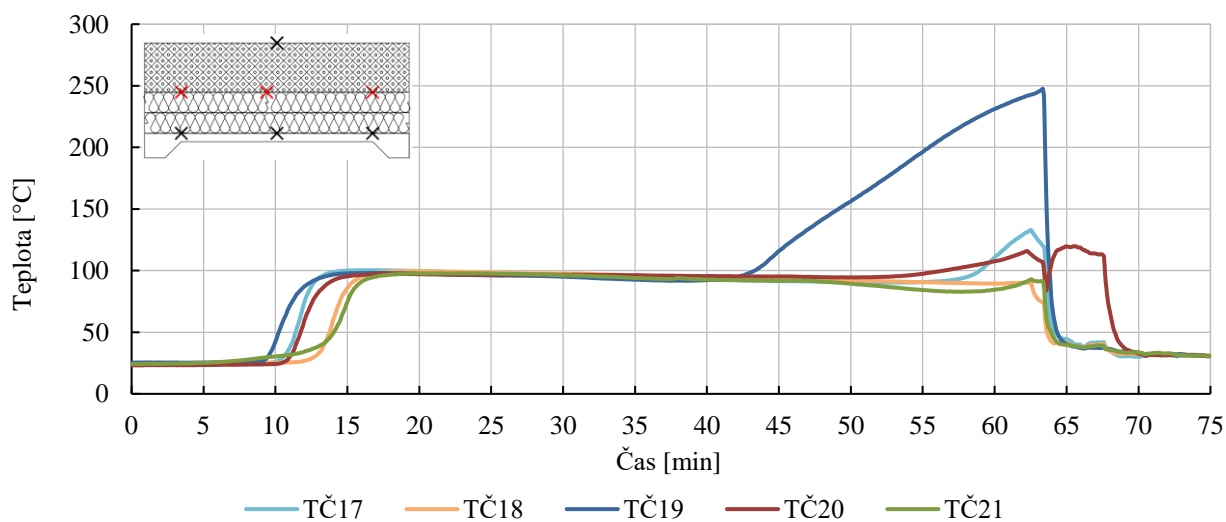
Obr. 37 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A – mezi minerální vlnou a EPS



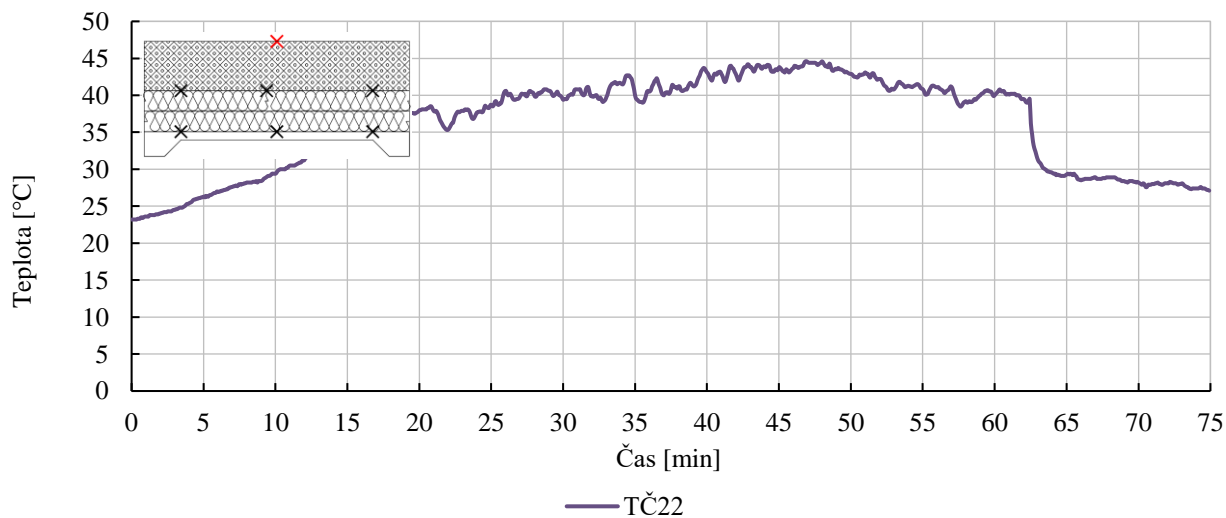
Obr. 38 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A – na horním líci EPS



Obr. 39 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou



Obr. 40 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B –minerální vlnou a EPS



Obr. 41 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B – na horním líci EPS

6.3.6 Shrnutí výsledků zkoušek

Zkouška vzorků A1, A2

Chování vzorků A1 a A2 bylo po celou dobu požární zkoušky podobné. Během zkoušky nedošlo k odštěpení betonových kazet (Obr. 42). Zásadní vliv na tuto skutečnost má nízký obsah vlhkosti v posuzovaných vzorcích. Proces odštěpování vrstev betonu je detailněji popsán v kapitole 7.1.2. Zajímavým faktem je ustálení teplot u obou vzorků na termočláncích umístěných mezi minerální vlnou a EPS v časovém intervalu cca 12–22 minut u vzorku A1 (Obr. 21) a 17–36 minut u vzorku A2 (Obr. 24).



(a)



(b)



(c)



(d)

Obr. 42 Vzorky A1, A2 po požární zkoušce: (a) výsledné vytavení EPS; (b) horní povrch minerální vlny po odejmutí EPS; (c) horní povrch betonových kazet; (d) spodní povrch betonových kazet

Zkouška vzorků B1, B2

Chování vzorků B1 a B2 bylo po celou dobu požární zkoušky podobné. Během zkoušky došlo k významnému odštěpení betonových kazet zapříčiněné vyšším množstvím vody v betonu (Obr. 43). Obdobně jako u předešlé zkoušky A1, A2 došlo k ustálení teplot u obou vzorků na termočláncích umístěných mezi minerální vlnou a EPS v časovém intervalu cca 12–20 minut u vzorku B1 (Obr. 29) a 17–38 minut u vzorku B2 (Obr. 32). Tato skutečnost je s největší pravděpodobností způsobena absorpcí vody z betonu do izolace z minerální vlny. Tím se výrazně mění její tepelné vlastnosti, což způsobuje prudký nárůst teploty okolo 10. minuty. Následuje ustálení teploty kolem hodnoty 100 °C. Ustálení je způsobeno značným spotřebováním energie (tepla) na vypaření uvolněné vody z betonu. Po vypaření dochází opět k nárůstu teploty, který je

především ovlivňován tloušťkou vrstvy z minerální vlny a její tepelnou vodivostí. Zkouška byla ukončena v plánovaném čase 45 minut s přerušením záznamu dat v 60. minutě.



(a)



(b)



(c)

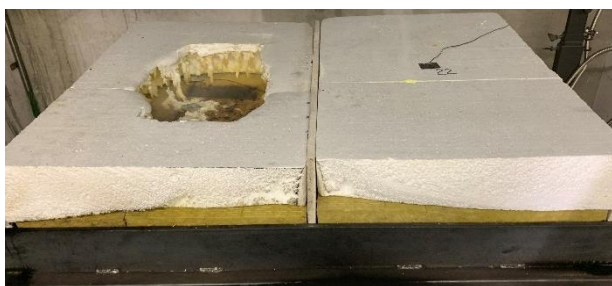


(d)

Obr. 43 Vzorky B1, B2 po požární zkoušce: (a) výsledné vytavení EPS; (b) horní povrch minerální vlny po odejmutí EPS; (c) horní povrch betonových kazet; (d) spodní povrch betonových kazet

Zkouška vzorků A, B

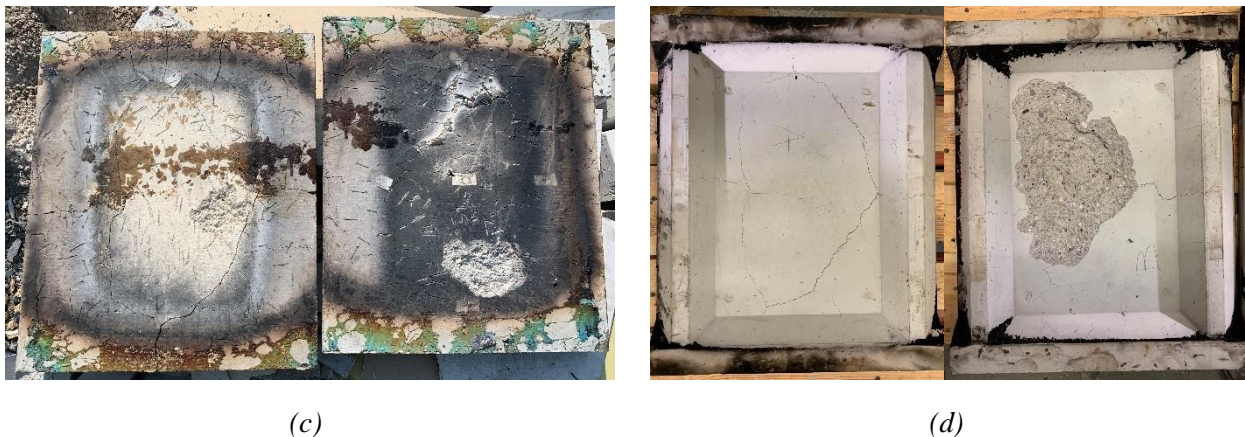
Zkouška byla ukončena v plánovaném čase 45 minut s ukončením záznamu dat v čase 75 minut, pro sledování vzorku ve fázi chladnutí. Během požární zkoušky došlo k částečnému odštěpení exponovaného betonového povrchu pouze u vzorku B. U vzorku A došlo k vytavení EPS až okolo 53. minuty, tj. ve fázi chladnutí po ukončení vlastní zkoušky – při vypnutém hořáku (Obr. 44).



(a)



(b)



Obr. 44 Vzorky A, B po požární zkoušce: (a) výsledné vytavení EPS; (b) horní povrch minerální vlny po odejmutí EPS; (c) horní povrch betonových kazet; (d) spodní povrch betonových kazet

6.4 PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí

Předmětem zkoušky bylo měření teplot mezi jednotlivými vrstvami střešních souvrství a sledování teplot ocelových styků, jež se nacházejí v průběžné spáře mezi střešními TT panely. Tato kapitola se zabývá popsáním průběhů měření a vyhodnocení zkoušky z hlediska navržených střešních plášťů. Data z požární zkoušky jsou obdrženy od akreditované zkušebny PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí. Autor této práce se podílel na návrhu zkoušky a jejím vyhodnocení včetně porovnání s numerickými simulacemi.

Výsledky a vyhodnocení teplotní analýzy ocelových styků vystavených požáru jsou popsány v diplomové práci [24].

6.4.1 Zkušební zařízení

Zkouška byla realizována v horizontální peci (Obr. 45). Pec má vnitřní půdorysné rozměry 3,0 m × 4,0 m a světlou výšku 2,16 m. Stropní pec je vytápěna osmi naftovými hořáky, z čehož jsou vždy čtyři umístěny po delších stranách. [25]



Obr. 45 Horizontální pec ve zkušebně PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí; převzato z [25]

Měření teplot na neohřívaném povrchu vzorku bylo provedeno diskovými termoelektrickými články, viz Obr. 6 v kapitole 5.1.1. Teploty byly zaznamenávány v minutových intervalech. Měřicí spoje termoelektrických článků jsou připájeny ke středu měděného terče o průměru 12 mm a tloušťce 0,2 mm. Dále jsou překryty destičkou s rozměry 30 × 30 mm, tloušťkou 2 mm. Teplota okolí byla během zkoušky sledována jedním plášťovým termoelektrickým článkem.

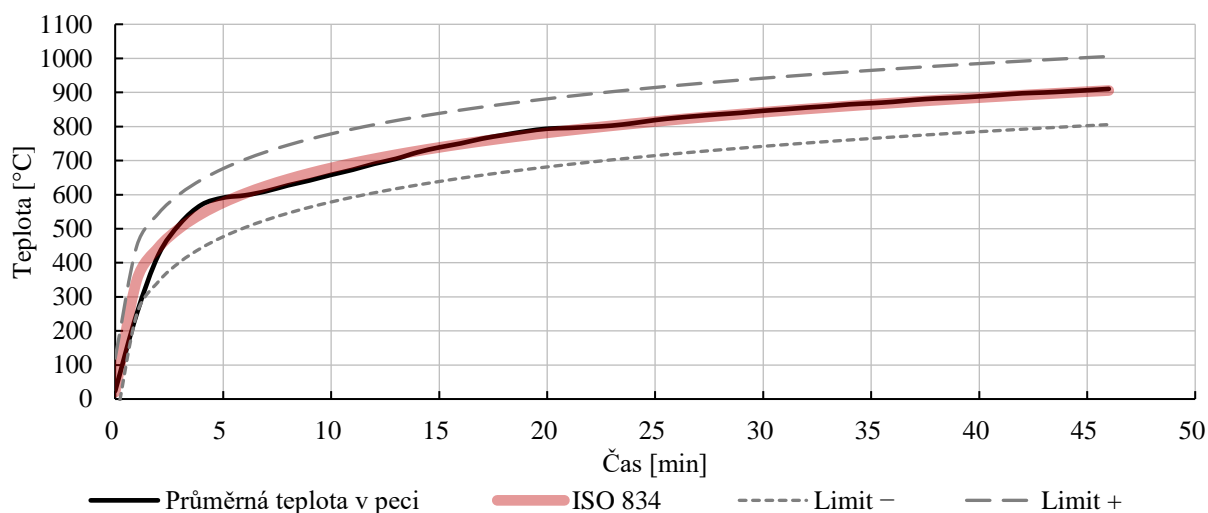
Teploty neohřívaného povrchu byly měřeny v následujících vrstvách:

- Na horním povrchu betonového TT panelu v místě žebek a kazet – 20 ks TČ.
- Na ocelových spojích mezi TT panely – 2 ks TČ.
- Mezi vrstvami izolace z minerální vlny a EPS – 8 ks TČ v každé skladbě, celkem 16 ks.

Grafické znázornění rozmístění termoelektrických článků popisuje Obr. 48.

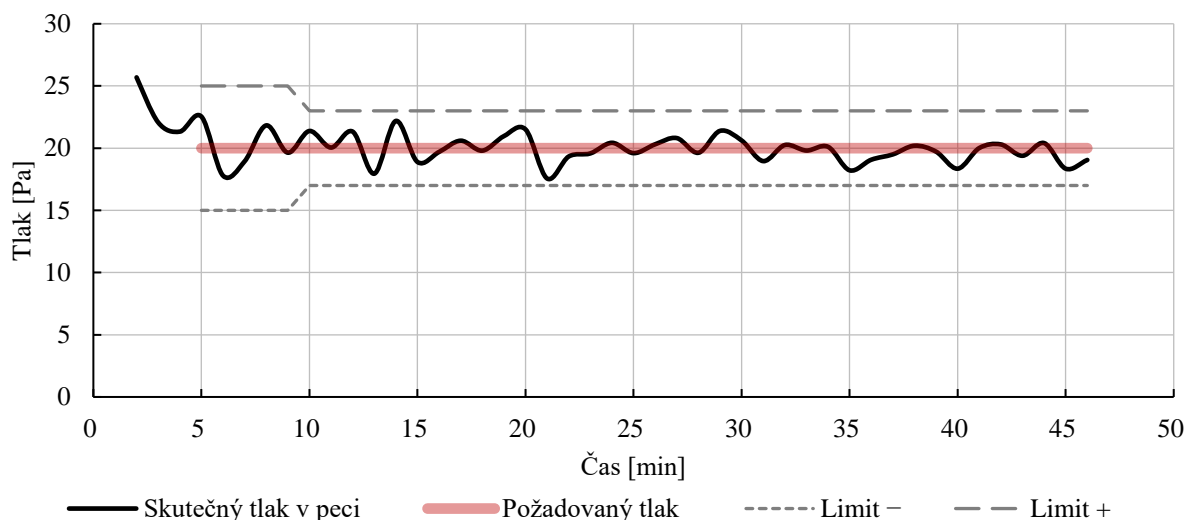
6.4.2 Zkušební podmínky

Regulace teploty uvnitř pece byla zajištěna soustavou naftových hořáků a to tak, aby byla v rozmezí tolerancí uvedených v kapitole 5.1.2. Teploty v peci byly měřeny deskovými snímači teploty a zaznamenávány v minutových intervalech. Deskové snímače teploty byly rovnoměrně rozmístěny 100 mm pod exponovaným povrchem zkušebního vzorku. Průměrnou teplotu v peci s vyznačením tolerancí a křivky ISO 834 zobrazuje Obr. 46.



Obr. 46 Průběh teplot uvnitř zkušební pece

Přetlak uvnitř zkušební pece byl měřen diferenčním manometrem. Regulace hodnot přetlaku odpovídá kritériím popsaných v [10]. Průběh přetlaku uvnitř pece je zobrazen na Obr. 47.



Obr. 47 Přetlak uvnitř zkušební pece

6.4.3 Zkušební vzorek

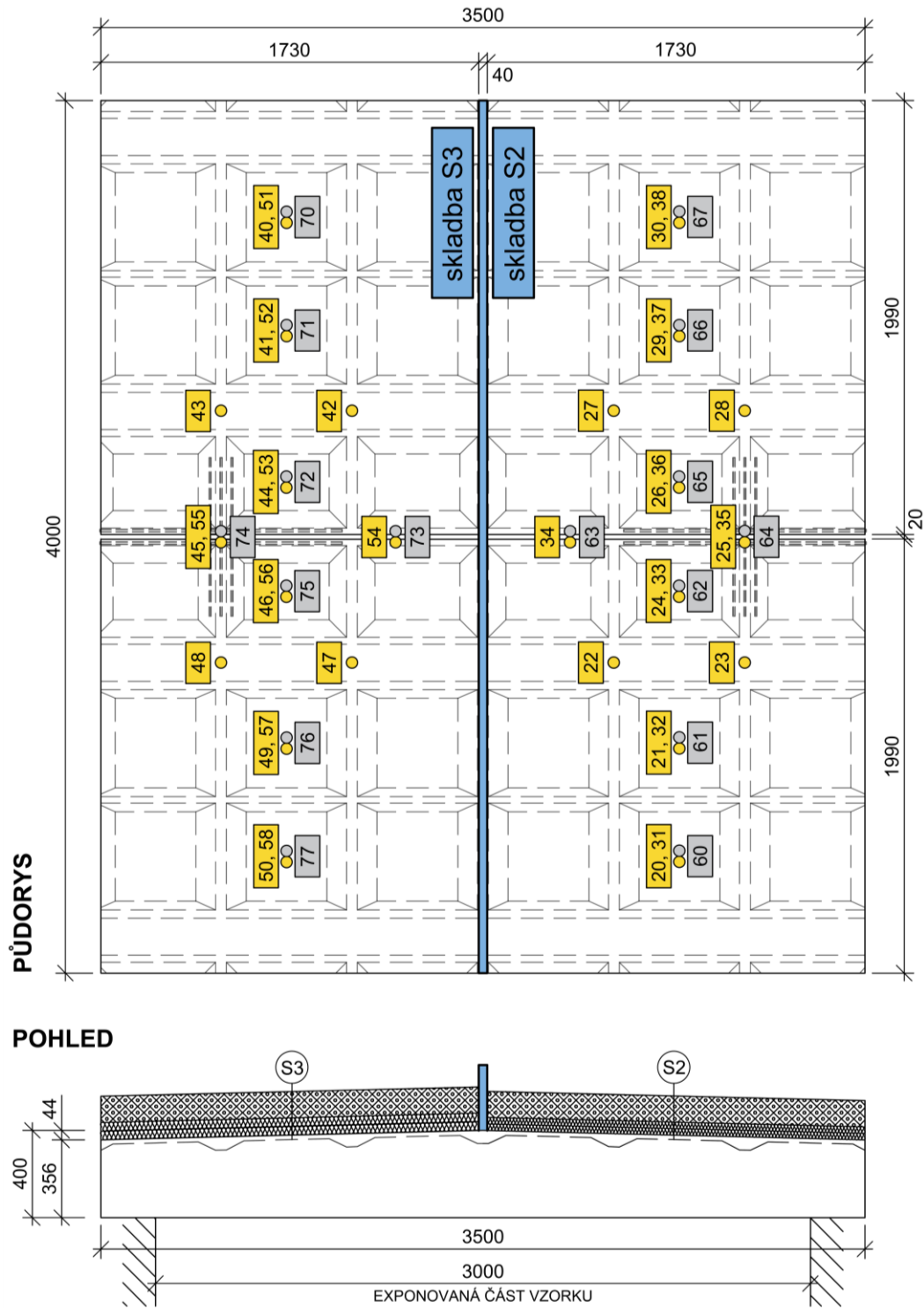
Pro potřeby zkoušky byl zhotoven jeden vzorek střešní konstrukce, skládající se z nosné části, na které byl proveden střešní plášť ve dvou variantách. Nosná část střešní konstrukce je tvořena dvěma atypicky upravenými a vyztuženými výseky betonových střešních TT panelů, jejichž délka je 3500 mm, šířka 1990 mm a výška 400 mm. Střešní desku panelu tvoří betonové vylehčující kazety, jež mají v nejslabším místě tloušťku 20 mm. Panel byl vyroben z betonu C50/60 s betonářskou výztuží B500B. Panely byly do horizontální pece osazeny vedle sebe tak, aby mezi nimi vznikla průběžná spára šířky 20 mm. V této spáře byly panely vzájemně spojeny pomocí dvou svařovaných příložek. Spára nebyla nikterak vyplněna, pouze v místě jedné příložky byl zdola vložen přířez minerální vlny délky přibližně 100 mm.

Na horní ploše panelů byl vyhotoven střešní plášť v provedení skladeb S2 a S3, viz kapitolu 6.1. Tyto skladby byly orientovány kolmo k rozpětí panelů, aby pod každou procházela výše zmíněná spára. Vzájemné oddělení skladeb bylo zajištěno svislou přepážkou ze dvou vrstev minerální vlny v celkové tloušťce 40 mm. Střešní skladby nebyly kotveny k nosné části střešní konstrukce. Průběh montáže zkušební vzorku je zobrazen na Obr. 49.

Vzorek, zkompletovaný ve zkušebně, byl po dobu cca jednoho týdne kondicionován. Během této doby byly zapisovány změřené hodnoty vlhkosti a teploty prostředí (Tab. 8).

Tab. 8 Změřené hodnoty vlhkosti a teploty prostředí před požární zkouškou

Parametr	Minimální	Maximální
Relativní vlhkost [%]	48	50
Teplota [°C]	17,8	25,8



LEGENDA

Skladba	S2	S3	
	20–30	40–50	- rozmístění termočláneků na horním povrchu betonových TT panelů (TČ 25 a 45 jsou umístěny na oceli nechráněného styku TT panelů)
	31–38	51–58	- rozmístění termočláneků mezi minerální vlnou a EPS
	60–67	70–77	- rozmístění termočláneků na neohřívaném (vnějším) povrchu vzorku

Obr. 48 Výkres zkušebního vzorku TT panelů včetně rozmístění termoelektrických článků



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Obr. 49 Průběh montáže zkušebního vzorku střešních TT panelů se skladbami S2 (vlevo) a S3 (vpravo):
(a) uložení panelů na zkušební pec; (b) spodní povrch panelů; (c) montáž desek z minerální vlny;
(d) umístění termočlánků mezi minerální vlnou a EPS; (e) skladby S2, S3 před položením hydroizolační fólie; (f) finální stav zkušebního vzorku

6.4.4 Průběh zkoušky

Průběh zkoušky je znázorněn pomocí Tab. 9, která uvádí doby, kdy byla zaznamenána jednotlivá pozorování.

Tab. 9 Průběh zkoušky vzorků S1, S2

Čas [s]	Čas [min]	Vzorek	Pozorování
300	5	S2, S3	slyšitelné rány při odštěpování betonu panelů
480	8	S2, S3	intenzivní odštěpování betonu z kazet a z hran žebér nosného panelu
1200	20	S2, S3	průnik dýmu po obvodu vzorku, měknutí skladeb nad styčnou spárou mezi TT panely
1380	23	S2, S3	v některých místech po odštěpení betonu kazet je viditelný spodní povrch exponované minerální vlny
2100	35	S2	postupné propadání zátěží vlivem sublimace EPS
2280	38	S2, S3	odpadnutí některých termočlánků vlivem zvlnění povrchu skladeb kolem propadlých zátěží
2520	42	S3	postupné propadání zátěží vlivem sublimace EPS
2700	45	S2, S3	viditelný zvlněný povrch obou skladeb
2760	46	S2, S3	ukončení zkoušky

6.4.5 Shrnutí výsledků zkoušky

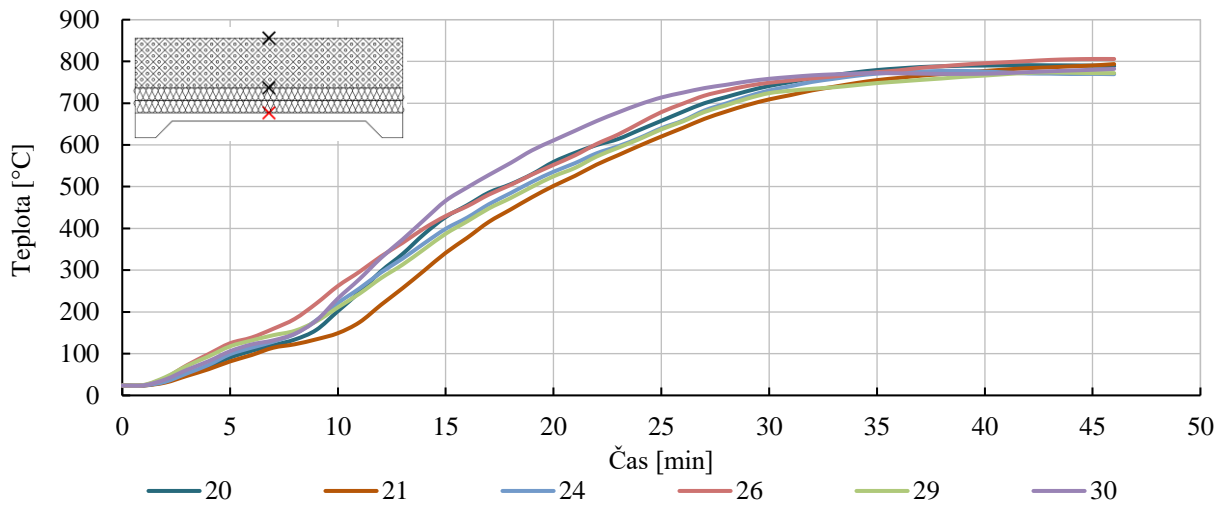
Cílem provedené zkoušky bylo měření rozložení teplot v jednotlivých vrstvách skladeb střešních pláštů (Obr. 50–55). Zásadní průběhy teplot z hlediska kritérií mezních stavů požární odolnosti jsou mezi vrstvou z minerální vlny a EPS a na odvrácené straně zkušební vzorku, tedy na horním povrchu EPS. Kritérium mezního stavu celistvosti bylo v průběhu zkoušky stanoveno pravidelným přikládáním bavlněného polštářku a měrky spár k potenciálním místům porušení tohoto mezního stavu. Vyhodnocení zmíněných kritérií podle kapitoly 3.1.1 je provedeno pomocí následující Tab. 10.

Tab. 10 Vyhodnocení kritérií mezních stavů požární odolnosti na základě zkoušky PAVUS, a. s.

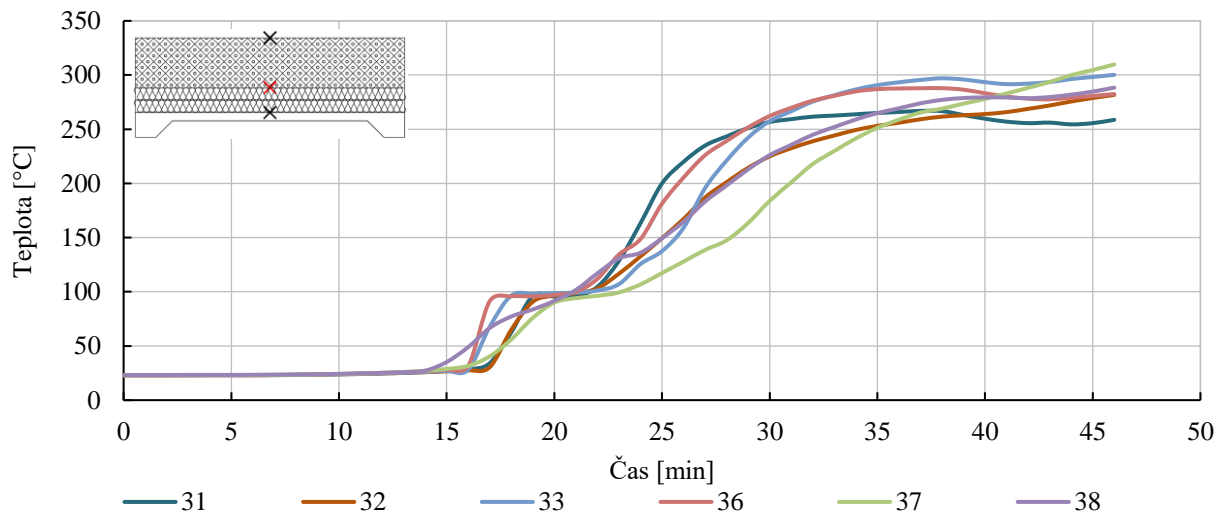
Mezní stav	Kritérium	Naměřená hodnota	Vyhodnocení
Celistvost E	Bavlněný polštářek	46 minut, bez porušení	45 minut
	Průchod měrky spár	46 minut, bez porušení	45 minut
	Trvalé plamenné hoření	46 minut, bez porušení	45 minut
Izolace I	Průměrná teplota	46 minut, bez dosažení	45 minut
	Maximální teplota	46 minut, bez dosažení	45 minut

Z Tab. 10 vyplývá, že střešní TT panel s provedením skladeb S2 a S3 splňuje mezní stavy celistvosti a izolační schopnosti po dobu 46 minut. Výsledné hodnocení požární odolnosti je **EI 45**.

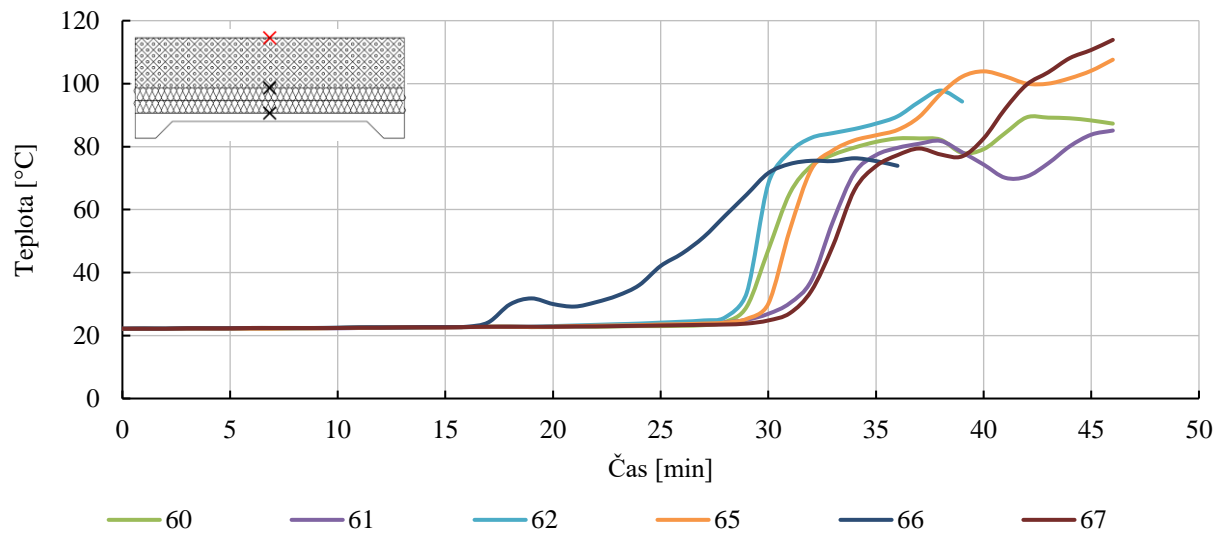
Zkušební vzorek se skladbou S2



Obr. 50 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S2 – mezi TT panelem a minerální vlnou

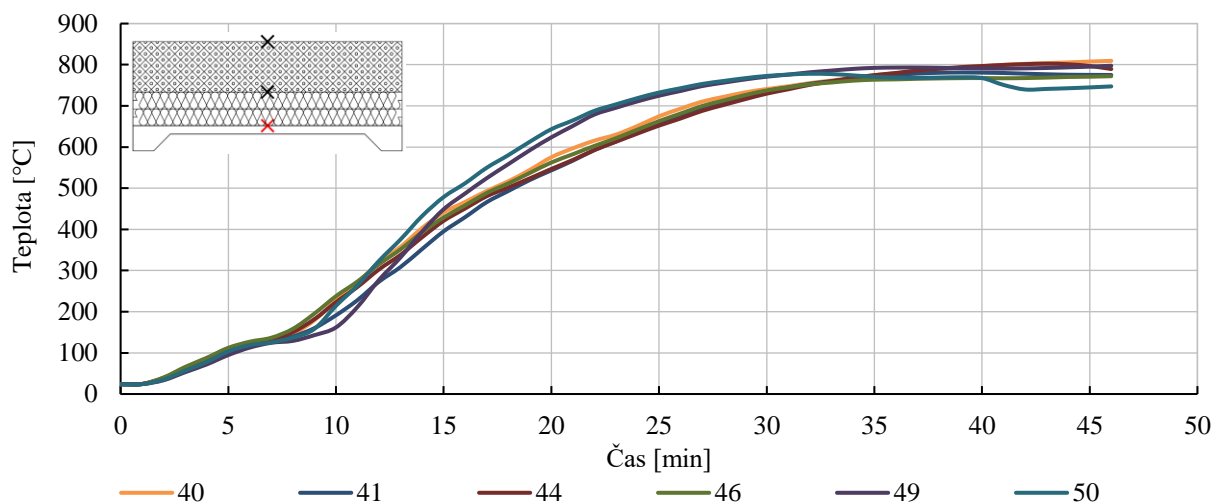


Obr. 51 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S2 – mezi minerální vlnou a EPS

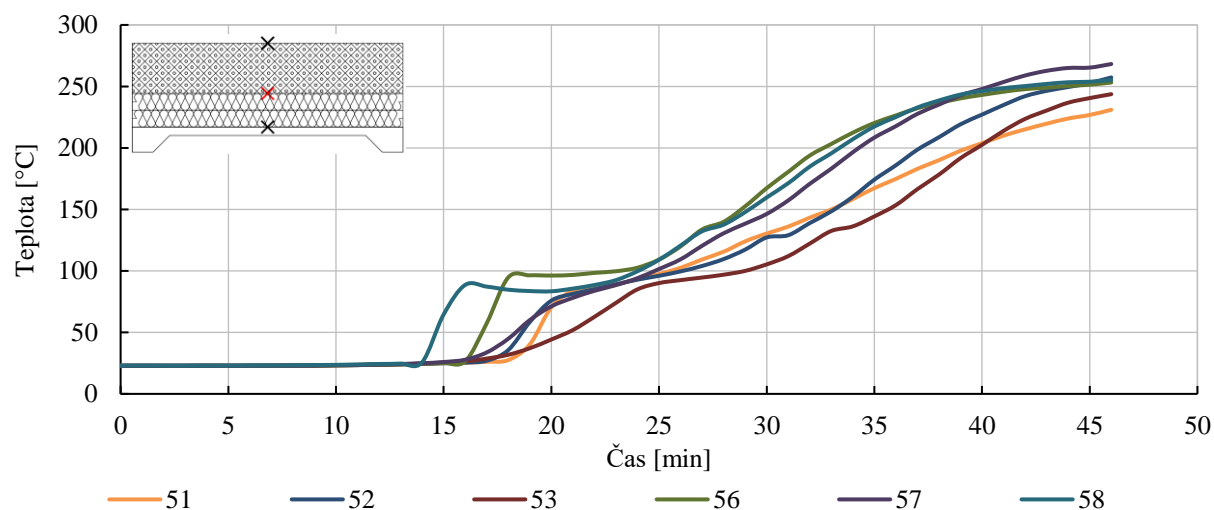


Obr. 52 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S2 – na horním povrchu EPS

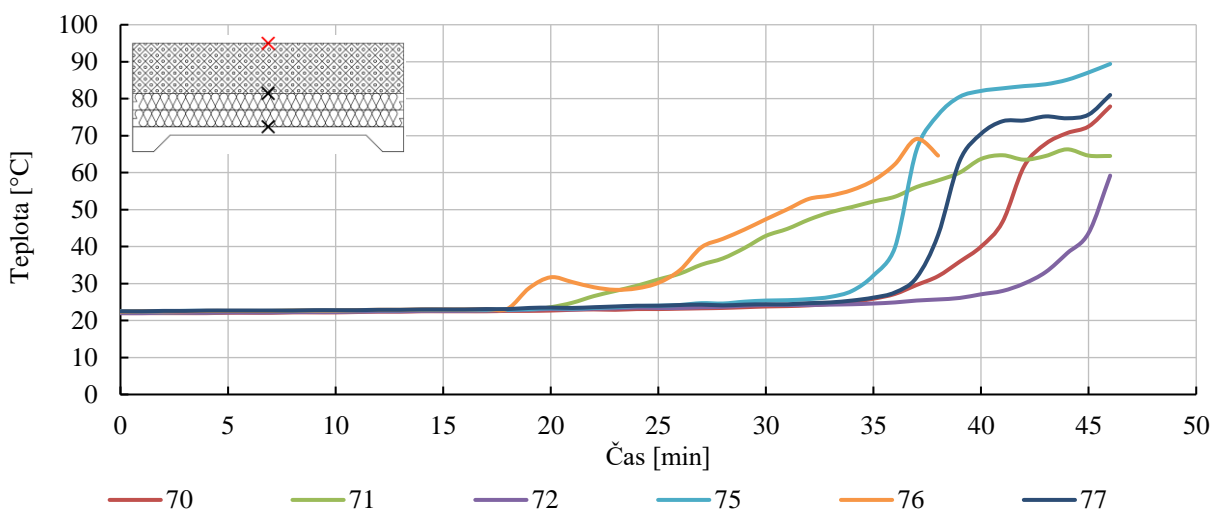
Zkušební vzorek se skladbou S3



Obr. 53 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S3 – mezi TT panelem a minerální vlnou



Obr. 54 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S3 – mezi minerální vlnou a EPS



Obr. 55 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S3 – na horním povrchu EPS



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Obr. 56 Zkušební vzorek střešních TT panelů v/po průběhu požární zkoušky: (a) spodní povrch panelu po odštěpení vylehčujících kazet v 10. minutě zkoušky; (b) druhá fáze odštěpení kazet v 35. minutě zkoušky; (c) horní povrch skladby S2 v 40. minutě zkoušky; (d) horní povrch skladby S3 v 40. minutě zkoušky; (e) spodní povrch panelu následující den po zkoušce; (f) detail spodního povrchu panelu

Obr. 56 zobrazuje poškození zkušební vzorku při a po průběhu požární zkoušky.

7 Teplotní analýza různých variant střešních pláštů

Cílem teplotní analýzy různých variant střešních pláštů je stanovení rozložení teploty metodou konečných prvků pomocí softwaru TempAnalysis pro jednotlivé skladby střešních pláštů ve spojení s betonovou vylehčující kazetou střešního TT panelu.

7.1 Materiálové charakteristiky

7.1.1 Obecně

Přesné informace o způsobu, jakým jsou stavební materiály ovlivněny vysokými teplotami, jsou důležitým předpokladem pro návrh konstrukcí za požáru pomocí požárně inženýrského přístupu. Pomocí těchto znalostí lze modelovat chování konstrukcí při různých scénářích požáru či hospodárně optimalizovat návrh konstrukce za použití nehořlavých materiálů a snížení nákladů na následná protipožární opatření. Materiálové vlastnosti lze rozdělit do dvou kategorií: Tepelné vlastnosti, které řídí teploty dosahované v konstrukčních prvcích a teplotně závislé mechanické vlastnosti, které určují teplotní odezvu konstrukcí. [4]

Úroveň, do které musí být termomechanické vlastnosti specifikovány, závisí na povaze konkrétního případu. V případech, kdy lze předpokládat krátkou dobu trvání požáru, je možné uvažovat materiálové charakteristiky nezávislé na čase a teplotě. Při předpokladu delšího trvání požáru a vystavení konstrukcí vyšším teplotám, je vhodné závislost materiálových vlastností na čase a teplotě zvážit. [4]

Objemová hmotnost

U mnoho protipožárních materiálů dochází ke změně objemové hmotnosti v důsledku dehydratace, rozkladu organických sloučenin či dekarbonizace během požáru. Jelikož je objemová hmotnost vyjádřená hmotností podělená objemem, může se při vysokých teplotách měnit jak hmotnost, tak objem materiálu. Potřebné je tedy kvantifikovat obě hodnoty. Pro kvantifikaci změny hmotnosti lze použít termogravimetrickou analýzu, která sleduje redukci hmoty při rostoucí teplotě. [4]

Pokud nejsou k dispozici přesné informace o objemové hmotnosti materiálu při rostoucí teplotě, lze použít konstantní hodnotu objemové hmotnosti. Tato hodnota je často uvedena v literatuře či výrobcem požárně ochranných materiálů. [4]

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita látky nebo plynu je definována jako množství tepla potřebné ke zvýšení teploty jednotkové hmotnosti látky o jeden stupeň. Měrná tepelná kapacita závisí na tom, zda proces probíhá za podmínek konstantního tlaku nebo konstantního objemu. [26]

Tepelná vodivost

Z tepelně technických vlastností materiálu je tepelná vodivost nejdůležitějším parametrem z hlediska tepelné ochrany chráněné konstrukce. Představuje schopnost materiálu vést teplo. Je dána tepelným tokem [W], který projde materiálem o ploše 1 m^2 a tloušťce 1 m , jestliže rozdíl teplot povrchů ve směru toku činí 1 K . Nehybný a suchý vzduch uzavřený mezi póry či vlákny materiálu nejvíce snižuje hodnotu tepelné vodivosti. Tepelná vodivost materiálu závisí na jeho složení, struktuře, pórovitosti, mezerovitosti, vlhkosti, vrstevnatosti, směru tepelného toku a zejména na teplotě. [27]

Je tedy důležité, aby její průběh za zvýšené teploty byl stanoven přesně. Výrobci protipožárních materiálů obvykle uvádějí hodnoty tepelné vodivosti za běžné teploty. Ve výpočetních modelech sdílení tepla by se však neměla používat konstantní tepelná vodivost, neboť se za požáru zvyšuje s rostoucí teplotou. Použitím konstantní hodnoty za běžné teploty se značně nadhodnocuje izolační schopnost zvolených materiálů, což vede k nevyhovujícím výsledkům výpočtu. [4]

7.1.2 Obyčejný beton – normální beton

Obyčejný beton neboli beton běžné pevnosti a objemové hmotnosti je vyroben z kameniva, vody a cementového tmelu. Pevnost v tlaku je obvykle v rozmezí od 20 do 50 MPa a objemová hmotnost je přibližně 2300 kg/m^3 . Obvyklými způsoby zpracování je monolitické provedení, tedy beton zhotovený přímo na staveništi, nebo prefabrikované provedení betonu, který se po vyrobení v prefa závodech dováží na místo stavby. [3]

I když je beton nehořlavý materiál a betonové konstrukce mají z hlediska požární odolnosti velmi dobré vlastnosti, je při vystavení vysokým teplotám negativně ovlivněn. Za zvýšených teplot dochází v betonu k mechanickým, fyzikálním a chemickým procesům, které vedou ke vratným nebo nevratným změnám jeho mechanických, teplotních a fyzikálních vlastností. Přehled těchto procesů je popsán v Tab. 11. [6, 28]

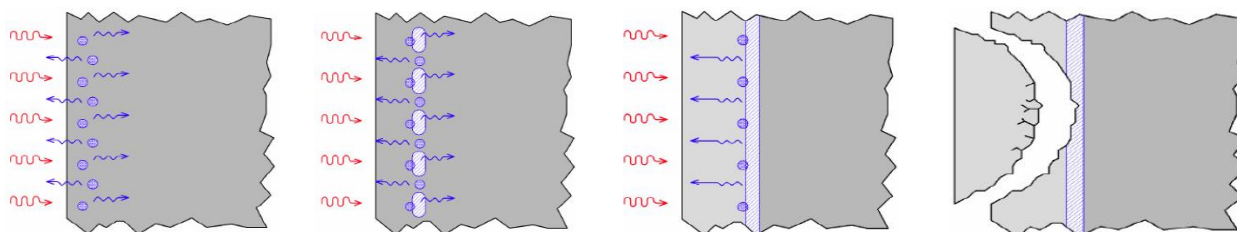
Tab. 11 Přehled procesů a změn v betonu při vystavení zvýšeným teplotám; převzato z [6, 28]

Teplota betonu θ [°C]	Proces
20–100	Dochází k hydrataci (přeměna volné vody v chemicky vázanou). Vznik hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého (Ca(OH)_2 – portlandit).
100	Začíná dehydratace cementového tmelu – uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů.
150	Vrcholí první fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH).
250+	Dochází k uvolňování vázané vody.
300+	Pokračuje rozklad hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého (Ca(OH)_2 – portlandit) za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo.

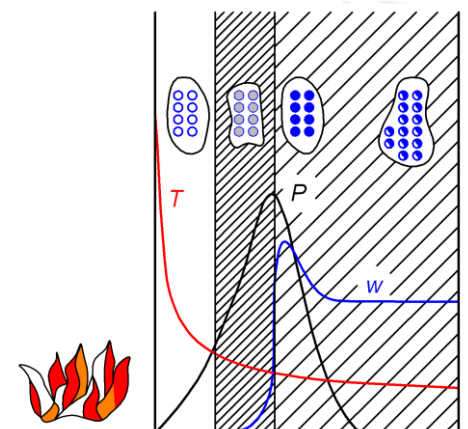
Tab. 11 Přehled procesů a změn v betonu při vystavení zvýšeným teplotám; převzato z [6, 28] (pokračování)

550–600	Dochází k fázové změně křemene (v silikátovém kamenivu) z triklinické soustavy na soustavu hexagonální. To vede společně s vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k narušování vazeb mezi kamenivem a cementovým tmelem.
700–750	Vrcholí druhá fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH).
800+	Hydraulické vazby v cementovém tmelu přecházejí na vazby keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při kterém vzniká oxid uhličitý (CO ₂) – plynná látka rozrušující beton.
900	Totální dekompozice cementového tmelu.
1000+	Začíná tavení některých složek betonu.
1200+	Celkové tavení materiálu.
Pozn.: Hodnoty teplot jsou pouze orientační. Symbol „+“ znamená „a více“.	

Dalším nepříznivým účinkem požáru na betonové konstrukce může být tzv. odštěpování. Odštěpováním betonu se rozumí oddělování vrstev nebo jednotlivých částí betonu z povrchu konstrukčního prvku při vystavení vysokým a rychle rostoucím teplotám [26, 28]. K odštěpování dochází především u betonových prvků s vyšším obsahem vlhkosti a u vysokohodnotných betonů. Záleží ale na mnoha faktorech, jako např. stáří betonu, pevnost betonu, typ a velikost použitého kameniva, vyztužení atd. Jedna z hypotéz ohledně odštěpování je založena na nárůstu pórových tlaků (Obr. 57, 58). Nárůst pórových tlaků je možné omezit vmísením polypropylenových vláken do betonové směsi. Vláknina se při vyšších teplotách tepelně rozloží a tím vytvoří mikrokanálky pro rozpínající se vodní páru, čímž dojde ke snížení vnitřních napětí v betonu. [28]



Obr. 57 Proces nárůstu pórových tlaků s následným odštěpením betonu; převzato z [29]



Obr. 58 Průběh teploty, pórových tlaků a vlhkosti v betonu při požáru; převzato z [29]

Proměnné vlastnosti betonu v závislosti na zvýšené teplotě jsou tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a ztráta hmotnosti (úbytek objemové hmotnosti). Tyto vlastnosti jsou významně ovlivněny typem kameniva, obsahem vlhkosti a složením betonové směsi. [30]

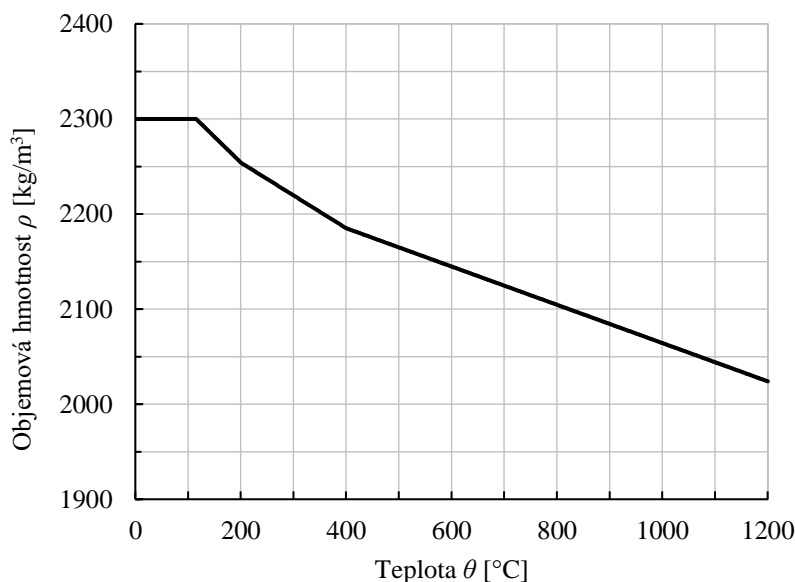
Objemová hmotnost obyčejného betonu v závislosti na teplotě

Objemová hmotnost betonu se značně snižuje během počáteční fáze ohřevu, neboť se odpařuje volná voda. Pevné složky, tj. kamenivo a cement po zahřátí expandují, čímž se zvětšuje jejich objem a objemová hmotnost betonu klesá. Tento jev nastává průběžným ohříváním betonu a jeho vliv se postupně zvyšuje při vyšších teplotách. Kromě toho mají některé typy skalních aglomerátů s různými minerálními složkami speciální vlastnosti při zvýšené teplotě, které ovlivňují objemovou hmotnost. Například křemičité kamenivo se rozpouští a tvoří krystaly při teplotě 600–800 °C a je doprovázeno značnou expanzí objemu s náhlým poklesem objemové hmotnosti betonu. [31]

Změna objemové hmotnosti [kg/m^3] v závislosti na teplotě (Obr. 59) je ovlivněna ztrátou volné i vázané vody a je definována takto [32]:

$$\begin{aligned} \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^\circ\text{C}) && \text{pro } 20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115\text{ }^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (1 - 0,02(\theta - 115)/85) && \text{pro } 115\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 200\text{ }^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) && \text{pro } 200\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 400\text{ }^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) && \text{pro } 400\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1\,200\text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned} \quad (13)$$

kde θ je teplota betonu.



Obr. 59 Objemová hmotnost obyčejného betonu v závislosti na zvýšené teplotě; podle [32]

Měrná tepelná kapacita obyčejného betonu v závislosti na teplotě

Měrná tepelná kapacita neboli měrné teplo $c_p(\theta)$ obyčejného betonu je ovlivněno typem kameniva, směsí a procentuálním vyjádřením vlhkosti v betonu. Typ kameniva je významný zejména

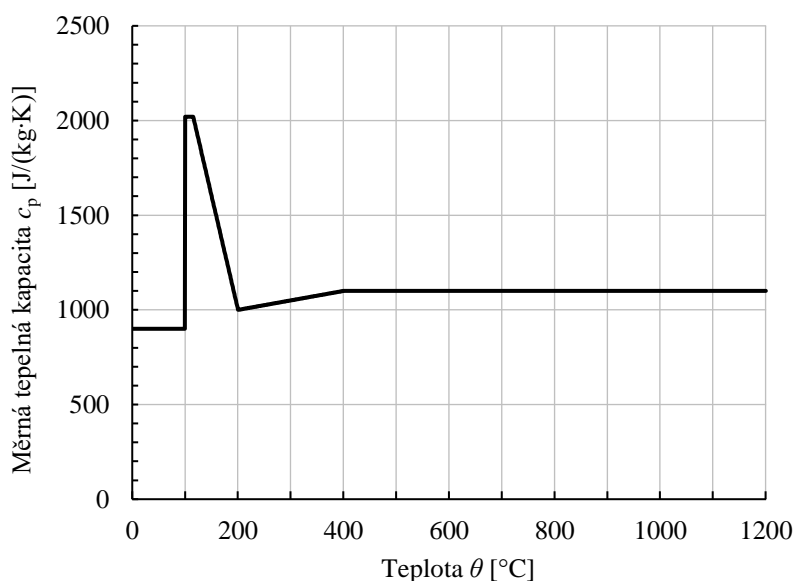
v případě betonu s vápenatým kamenivem, u něhož se měrné teplo náhle zvyšuje v důsledku chemických změn při teplotě přibližně 800 °C. Obsah vlhkosti je významný při teplotách do 200 °C, protože měrná tepelná kapacita vlhkého betonu je dvakrát vyšší než u betonu suchého. Tepelná kapacita volné vody je předána k tepelnému výkonu suchého betonu. Hodnoty mezi 100 °C a 200 °C zohledňují průběžné odpařování volné vody během prvotní fáze ohřevu. [4]

Měrné teplo $c_p(\theta)$ suchého betonu ($u = 0 \%$) s křemičitým či vápencovým kamenivem lze stanovit z následujících vztahů [32]:

$$\begin{aligned} c_p(\theta) &= 900 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]} && \text{pro } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ }^\circ\text{C} \\ c_p(\theta) &= 900 + (\theta - 100) \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]} && \text{pro } 100 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 200 \text{ }^\circ\text{C} \\ c_p(\theta) &= 1\,000 + (\theta - 200)/2 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]} && \text{pro } 200 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 400 \text{ }^\circ\text{C} \\ c_p(\theta) &= 1\,100 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]} && \text{pro } 400 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1\,200 \text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned} \quad (14)$$

kde θ je teplota betonu.

Měrná tepelná kapacita na Obr. 60 vyjadřuje závislost na zvýšené teplotě pro obyčejný beton s obsahem vlhkosti 3 % z hmotnosti betonu.



Obr. 60 Měrná tepelná kapacita obyčejného betonu v závislosti na zvýšené teplotě; podle [32]

Tepelná vodivost obyčejného betonu v závislosti na teplotě

Tepelná vodivost obyčejného betonu $\lambda_c(\theta)$ závisí na chemickém složení a tepelné vodivosti každé jednotlivé složky betonu, na poměru složek, obsahu vlhkosti, typu kameniva a typu cementu. Pokud je beton suchý, má typ kameniva nejvýznamnější vliv na jeho tepelnou vodivost. Pokud se však vlhkost betonu zvyšuje, zvyšuje se tím i jeho tepelná vodivost. [4]

Na Obr. 61 jsou znázorněny meze hodnot tepelné vodivosti dle [32], přičemž tento rozsah platí pro všechny typy kameniva.

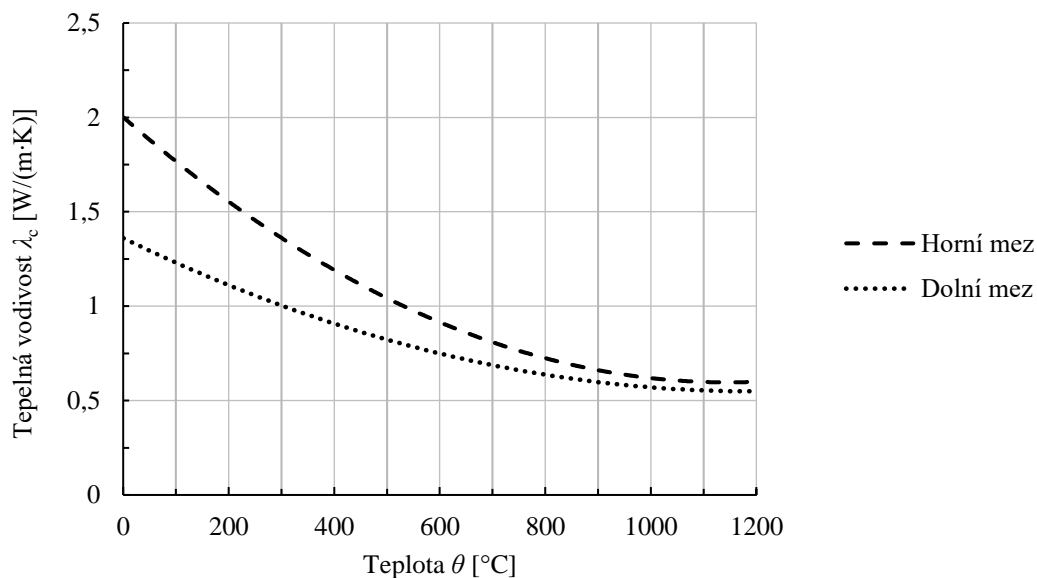
Horní mezní hodnotu tepelné vodivosti λ_c obyčejného betonu lze stanovit ze vztahu [32]:

$$\lambda_c(\theta) = 2 - 0,2451 (\theta/100) + 0,0107 (\theta/100) [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})] \quad \text{pro } 20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}, \quad (15)$$

dolní mezní hodnotu tepelné vodivosti λ_c obyčejného betonu lze stanovit ze vztahu [32]:

$$\lambda_c(\theta) = 1,36 - 0,136 (\theta/100) + 0,0057 (\theta/100) [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})] \quad \text{pro } 20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}, \quad (16)$$

kde θ je teplota betonu.



Obr. 61 Tepelná vodivost obyčejného betonu v závislosti na zvýšené teplotě; podle [32]

Ve výpočtech uvedených v kapitole 7.2 se uvažuje hodnota tepelné vodivosti obyčejného betonu řídicí se podle horní meze zobrazené na Obr. 61.

7.1.3 Minerální vlna

Tepelné vlastnosti izolačního materiálu hrají důležitou roli při určování požární odolnosti, jelikož se za zvýšené teploty výrazně mění. Příčina změny vlastností je tepelný rozklad minerální vlny začínající počáteční degradací organických částí, jako je pojivo. Jako pojivo se nejčastěji využívá pryskyřice. Za přítomnosti vzduchu (kyslíku) je předpokládán rozklad exotermní. Další mechanismus týkající se tepelné degradace souvisí s pyrolýzou. Ta nastává vlivem tepelného zatěžování materiálu, kdy dochází ke krystalizačním procesům a snižování tloušťky materiálu. K celkovému tavení minerálních vláken dochází přibližně od teploty 800–1000 °C. Výše popsání chování minerální vlny za vysokých teplot ovlivňuje především hustota zastoupení minerálních vláken. Hustota vláken má značný vliv na přenos tepla uvnitř materiálu, který je umožněn vedením tepla ve vláknech a v plynu, ale také sálavou a konvektivní složkou. U většiny případů je konvekce uvnitř materiálu zanedbatelná. [33]

Při zvýšených teplotách v betonu dochází k uvolňování volné i vázané vody směrem od exponované strany požárem. Jelikož se desky z minerální vlny nachází na betonových vylehčujících kazetách, začínají od uvolněné vody z betonu navlhat, čímž se výrazně zhoršují jejich tepelně izolační vlastnosti. Je tedy zřejmé, že obsah vlhkosti betonu značně ovlivňuje

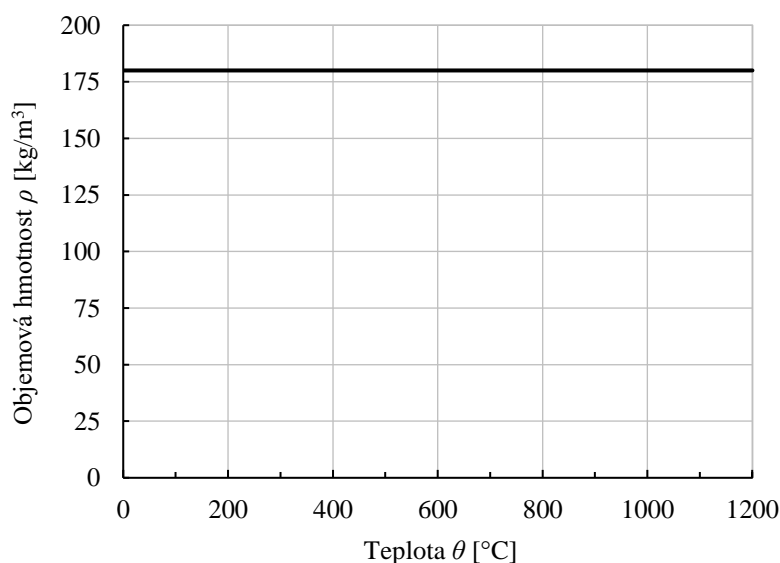
procesy sdílení tepla. Proto je nutné stanovit průběh tepelné vodivosti minerální vlny nejen za zvýšené teploty, ale i s uvážením množství vody, které je schopna přijmout od betonu. [26]

Materiálové charakteristiky minerální vlny byly stanoveny pomocí inverzní analýzy z dostupných výsledků požárních zkoušek. Dostupná literatura sice uvádí např. změnu tepelné vodivosti v závislosti na zvýšené teplotě, ovšem neuvádí změnu tepelné vodivosti minerální vlny s konkrétním obsahem vlhkosti z objemové hmotnosti za vysokých teplot. Je tedy velice obtížné simulovat chování minerální vlny za požární situace včetně zahrnutí všech podstatných fyzikálních procesů.

Ve výpočtech jsou z důvodu dosažení vypovídajících výsledků teplotní analýzy uvažovány dva modely materiálových vlastností minerální vlny. Tyto modely nepopisují reálné průběhy těchto vlastností, ale jsou použity proto, aby se pomocí nich zohlednily v modelu vedení (sdílení) tepla i další fyzikální procesy jako např. transport tepla, vypařování vody, závislost vlastností materiálu na vlhkosti atd., které jsou závislé nejen na teplotě, ale i na čase a poloze. Z tohoto hlediska jsou zásadními materiálovými vlastnostmi zejména měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost.

Objemová hmotnost

Objemová hmotnost minerální vlny se běžně pohybuje okolo $150\text{--}165\text{ kg/m}^3$. V případech, kdy se minerální vlna nachází v kontaktu s betonovou konstrukcí, dochází při vystavení takovéto skladby vysokým teplotám k částečnému přestupu vlhkosti do minerální vlny. Zahřívání způsobuje transport vlhkosti v betonovém prvku směrem od požárem exponovaného povrchu. Tím se akumuluje značná část vody na rozhraní vrstvy z betonu a vrstvy z minerální vlny. Jelikož je převážná míra minerálních vln poměrně nasákavá, dochází k saturaci od hranice stýkající se s betonem. Obsah vlhkosti zapříčiňuje nárůst objemové hmotnosti minerální vlny. V navazujících výpočtech je pro oba modely konzervativně stanovena konstantní hodnota objemové hmotnosti 180 kg/m^3 (Obr. 62).

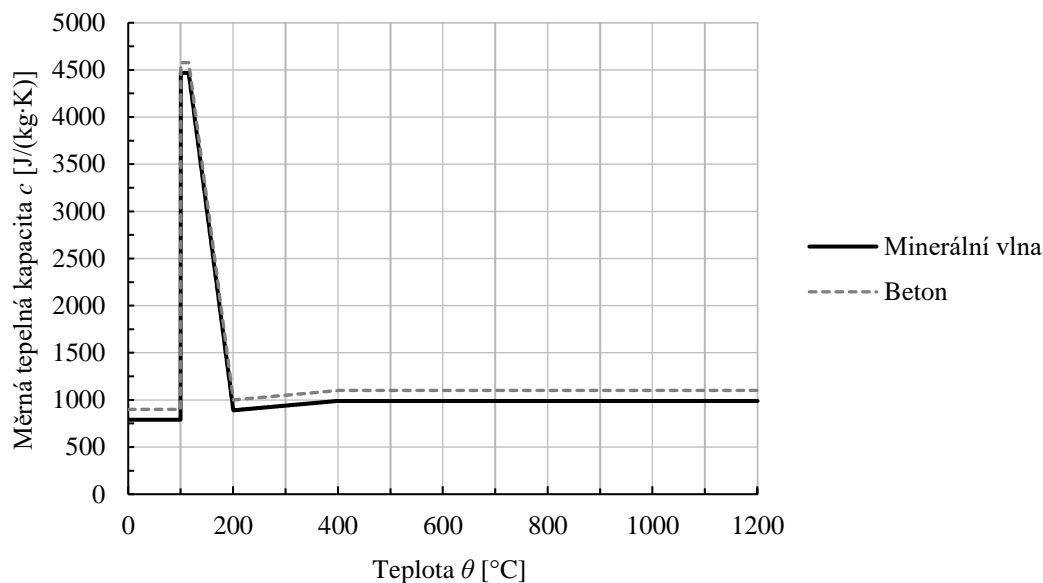


Obr. 62 Objemová hmotnost minerální vlny v závislosti na zvýšené teplotě

Měrná tepelná kapacita

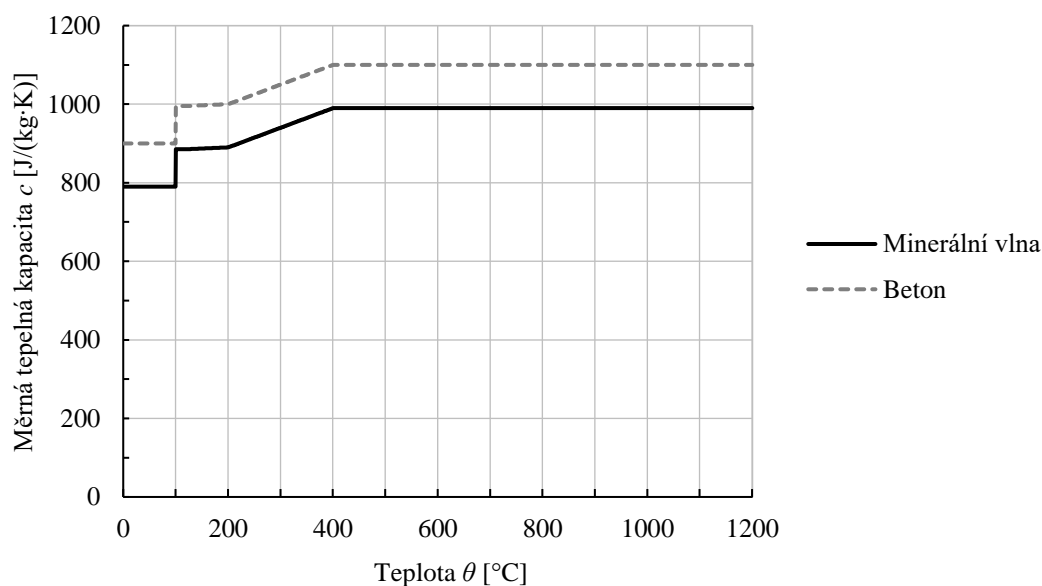
Měrná tepelná kapacita minerální vlny je za běžných podmínek $790 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. U saturované minerální vlny vodou následuje měrná tepelná kapacita v závislosti na zvýšené teplotě průběhy vykreslené v Obr. 63, 64. Průběh byl předpokládán pomocí vztahů popisujících závislost měrné tepelné kapacity betonu za zvýšené teploty dle [32]. Předpoklad spočívá ve snížení měrné tepelné kapacity podle [32] o $110 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ pro jednotlivé teploty. Pro znázornění předpokladu je v Obr. 63, 64 zobrazena křivka měrné tepelné kapacity betonu podle vztahu (14).

1. model – obsah vlhkosti 8 % z objemové hmotnosti suché minerální vlny



Obr. 63 Měrná tepelná kapacita minerální vlny a betonu v závislosti na zvýšené teplotě – 1. model

2. model – obsah vlhkosti 0,25 % z objemové hmotnosti suché minerální vlny



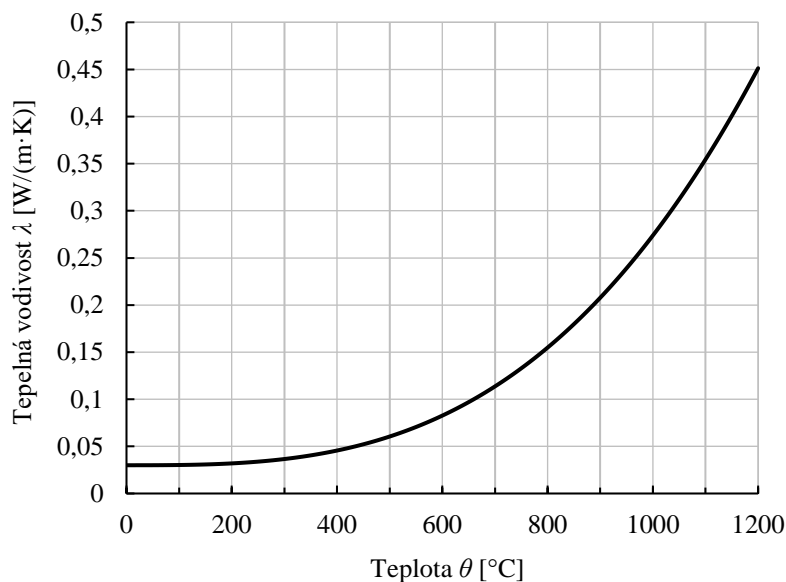
Obr. 64 Měrná tepelná kapacita minerální vlny a betonu v závislosti na zvýšené teplotě – 2. model

Tepelná vodivost

Průběh tepelné vodivosti minerální vlny v závislosti na teplotě popisuje následující vztah [4, 26]:

$$\lambda(\theta) = 0,03 + 0,2438 (\theta/1000)^3 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}, \quad (17)$$

kde θ je teplota minerální vlny.



Obr. 65 Tepelná vodivost minerální vaty v závislosti na zvýšené teplotě; podle [4]

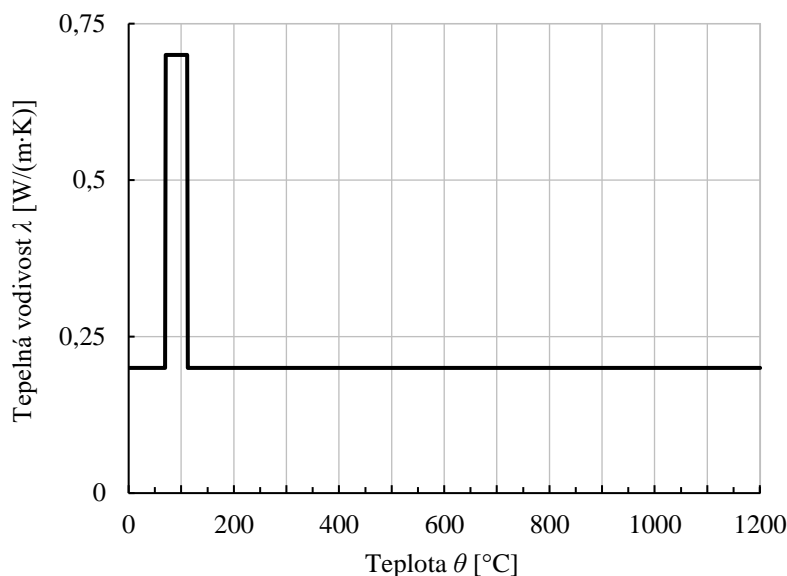
Obr. 65 ukazuje změnu tepelné vodivosti v závislosti na zvýšené teplotě pro izolaci z minerální vlny. Rozdíly v hodnotách tepelné vodivosti při vyšších teplotách jsou způsobeny především změnou chemického složení minerálních vláken. [26, 33]

Tepelná vodivost většiny minerálních vln velmi rychle roste se zvyšujícím se obsahem vlhkosti. Při maximální saturaci může tepelná vodivost minerální vlny dosahovat hodnot 0,7–0,9 W/(m·K). [34, 35]

Obdobně jako u měrné tepelné kapacity, byly odvozeny dva modely tepelné vodivosti minerální vlny. První model popisuje průběh tepelné vodivosti minerální vlny s 8% obsahem vlhkosti z objemové hmotnosti v závislosti na teplotě (Obr. 66). Počáteční hodnota tepelné vodivosti je konzervativně uvažována 0,2 W/(m·K). Vrchol v rozmezí teplot 70–115 °C má maximální hodnotu 0,7 W/(m·K). Nárůst je způsoben absorpcí vody uvolněné z betonové kazety do vrstvy z minerální vlny. Po následném odpaření vody ze saturované minerální vlny dochází k poklesu tepelné vodivosti zpět na hodnotu 0,2 W/(m·K).

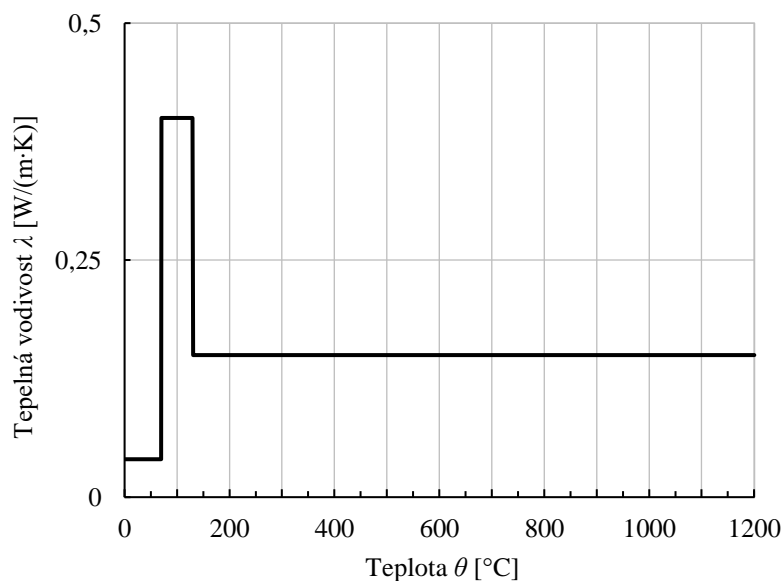
Druhý model tepelné vodivosti minerální vlny s obsahem vlhkosti 0,25 % z objemové hmotnosti má počáteční hodnotu 0,04 W/(m·K). V rozhraní teplot od 70 °C do 130 °C je maximální hodnota tepelné vodivosti 0,4 W/(m·K). Následný pokles a ustálení na hodnotě 0,15 W/(m·K) je způsoben prohřátím izolace, čímž dochází k odpaření vody. Grafické znázornění modelu je zobrazeno na Obr. 67.

1. model – obsah vlhkosti 8 % z objemové hmotnosti suché minerální vlny



Obr. 66 Tepelná vodivost minerální vaty v závislosti na zvýšené teplotě – 1. model

2. model – obsah vlhkosti 0,25 % z objemové hmotnosti suché minerální vlny



Obr. 67 Tepelná vodivost minerální vaty v závislosti na zvýšené teplotě – 2. model

7.1.4 Expandovaný pěnový polystyren (EPS)

V současnosti není dostatek podkladů k přesnému modelování chování EPS za požáru. Při dosažení teploty nad 100 °C začíná pěnový polystyren měknout, sublimovat a postupně se tavit. Měknutí je způsobené ztrátou nadouvadla. Při vystavení vysokým teplotám dojde ještě před vznícením k porušení, zhroucení buněčné struktury a vzniku kapalného filmu. Následným dosažením vyšších teplot se začínají vytvářet plynné hořlavé produkty rozkladem taveniny. Zdali

se dají tyto produkty zapálit plamenem či pouhou jiskrou, závisí ve velké míře na teplotě, době trvání expozice tepla a toku vzduchu okolo materiálu (přístup kyslíku). Pokud hovoříme o EPS obsahující retardéry hoření, je zapálení taveniny EPS jiskrou nepravděpodobné. V opačném případě, kdy EPS retardéry hoření neobsahuje, je jeho zapálení malými plameny snadné. V České republice je využíván pouze typ obsahující retardéry hoření. [33, 36]

Přechodová teplota zapálení EPS se pohybuje okolo hodnot 360–370 °C. Tyto hodnoty ukazují, že jestliže se EPS roztaví, dochází k jeho dezintegraci a hořlavé plyny se vytvářejí až při překročení teploty 350 °C. Teplota samovznícení EPS se pohybuje okolo 450 °C (bez přítomnosti zápalného zdroje – např. hořáku). [36]

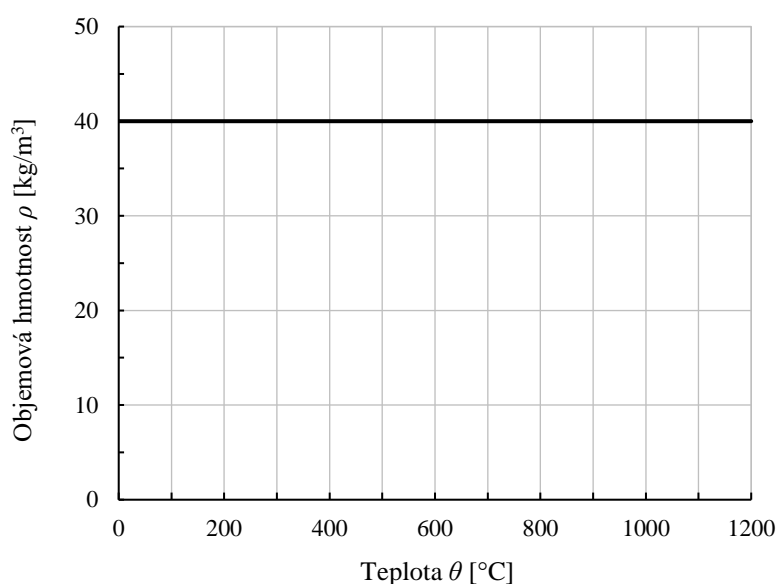
Po zapálení se hoření snadno šíří po exponovaném povrchu EPS, který nadále hoří, dokud není všechn spotřebován. Nízká hustota EPS usnadňuje hoření tím, že je vyšší poměr vzduchu (98 %) k polystyrenu (2 %). Přítomná hmota materiálu je tedy nízká, a tudíž je také nízké množství uvolňovaného tepla. [36]

Delší expozice EPS vysokým teplotám vede až k celkovému vytavení celé izolační vrstvy z tohoto materiálu (viz Obr. 42–44). Z tohoto důvodu je izolační vrstva z EPS v navazujících výpočtech modelována pouze jako okrajová podmínka, za účelem získání odpovídajících teplot pod touto vrstvou.

Materiálové vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu jsou uvažovány konstantní, tedy nezávislé na rostoucí teplotě. Grafy vstupních hodnot materiálových charakteristik EPS mají ve výpočtech následující průběhy:

Objemová hmotnost EPS

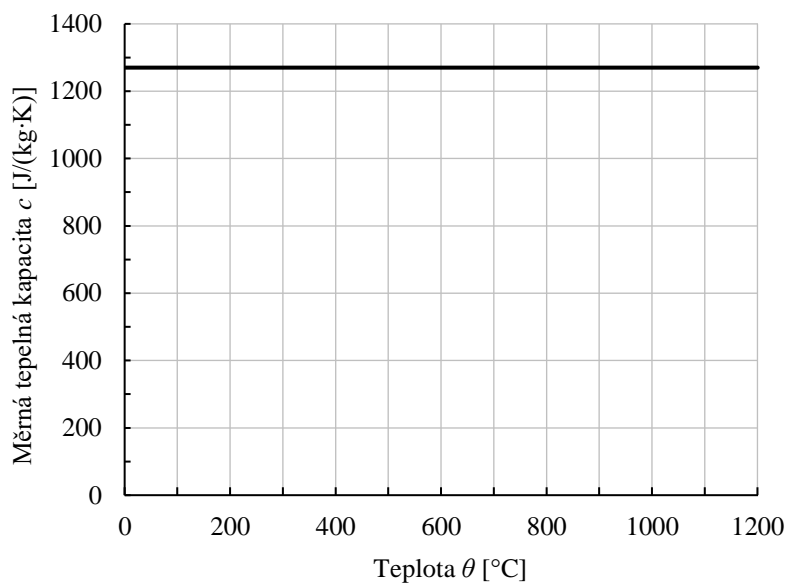
Objemová hmotnost EPS byla v numerické teplotní analýze uvažována 40 kg/m³ (Obr. 68).



Obr. 68 Objemová hmotnost EPS v závislosti na zvýšené teplotě

Měrná tepelná kapacita EPS

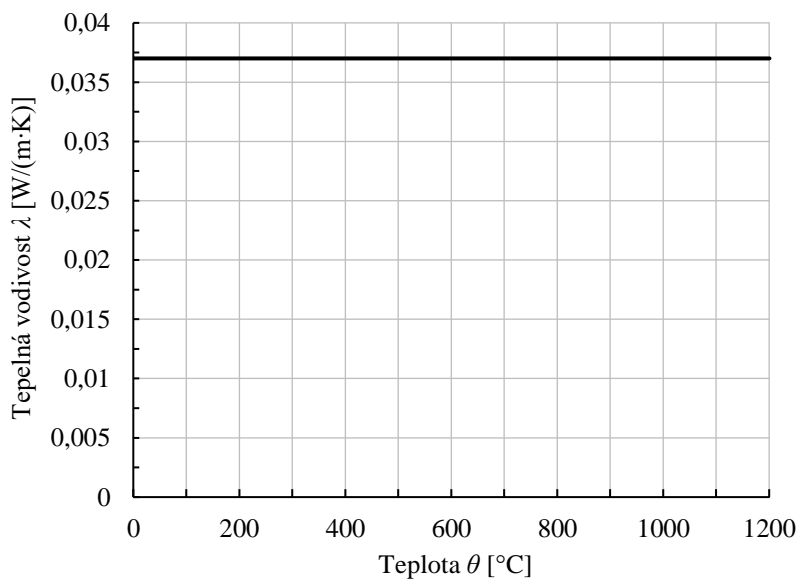
Měrná tepelná kapacita EPS byla pro potřeby teplotní analýzy stanovena hodnotou 1290 J/(kg·K) (Obr. 69).



Obr. 69 Měrná tepelná kapacita EPS v závislosti na zvýšené teplotě

Tepelná vodivost EPS

Hodnota tepelné vodivosti je v teplotní analýze uvažována 0,037 W/(m·K) (Obr. 70).



Obr. 70 Tepelná vodivost EPS v závislosti na zvýšené teplotě

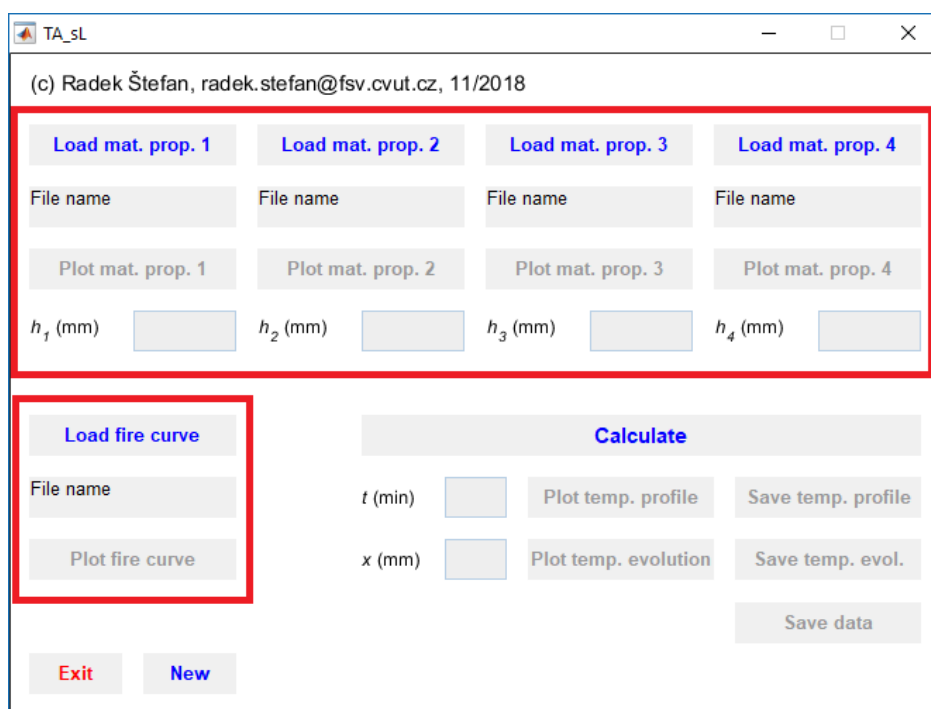
7.2 Numerická teplotní analýza

7.2.1 Software TempAnalysis

Software TempAnalysis [37] byl vyvinut panem Ing. Radkem Štefanem, Ph.D., na Katedře betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze. Program slouží k teplotní analýze pravoúhlých průřezů (desek, stěn, nosníků, sloupů) vystavených požáru. V programu lze modelovat průřezy různých stavebních materiálů, jež jsou definovány pomocí materiálových charakteristik, ať už konstantních či závislých na teplotě. Návrhový požární scénář může být reprezentován libovolnou křivkou požáru. [19]

Numerická teplotní analýza byla provedena ve verzi tohoto programu, která umožňuje zadání až čtyřech vrstev dané skladby, včetně definování materiálových vlastností jednotlivých vrstev skladby.

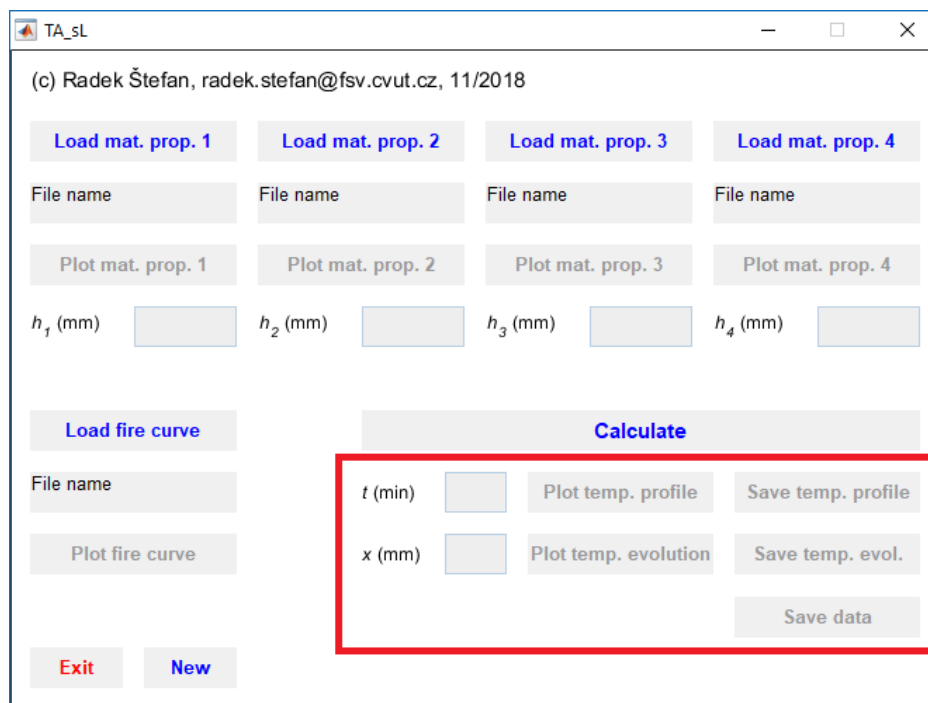
Problém sdílení tepla je v programu řešen numericky. Diskretizace podle prostorových proměnných je realizována metodou konečných prvků, časová diskretizace semiimplicitním schématem. [6; 17]



Obr. 71 Úvodní okno programu TempAnalysis verze TA_sL – část pro zadání vstupních parametrů [37]

Vstupními parametry pro výpočet jsou materiálové vlastnosti, které jsou popsány v kapitole 7.1, a návrhový požární scénář, jež je v tomto případě definován normovou teplotní křivkou uvedenou v kapitole 2.2.1. Pro úplnost vstupních údajů je nutné zadat tloušťku v [mm] jednotlivých vrstev modelované skladby. Exponovaná strana modelované skladby je vždy zastoupena vrstvou číslo 1.

Výstupními hodnotami jsou teplotní profily v kterémkoliv čase výpočtu a průběhy teplot v konkrétní vzdálenosti „x“ [mm], která je měřena od exponovaného povrchu zadané skladby. Výsledky programu jsou v čase limitovány dobou trvání návrhového požárního scénáře, z hlediska průběhů teplot je program omezen celkovou tloušťkou vymodelované skladby.



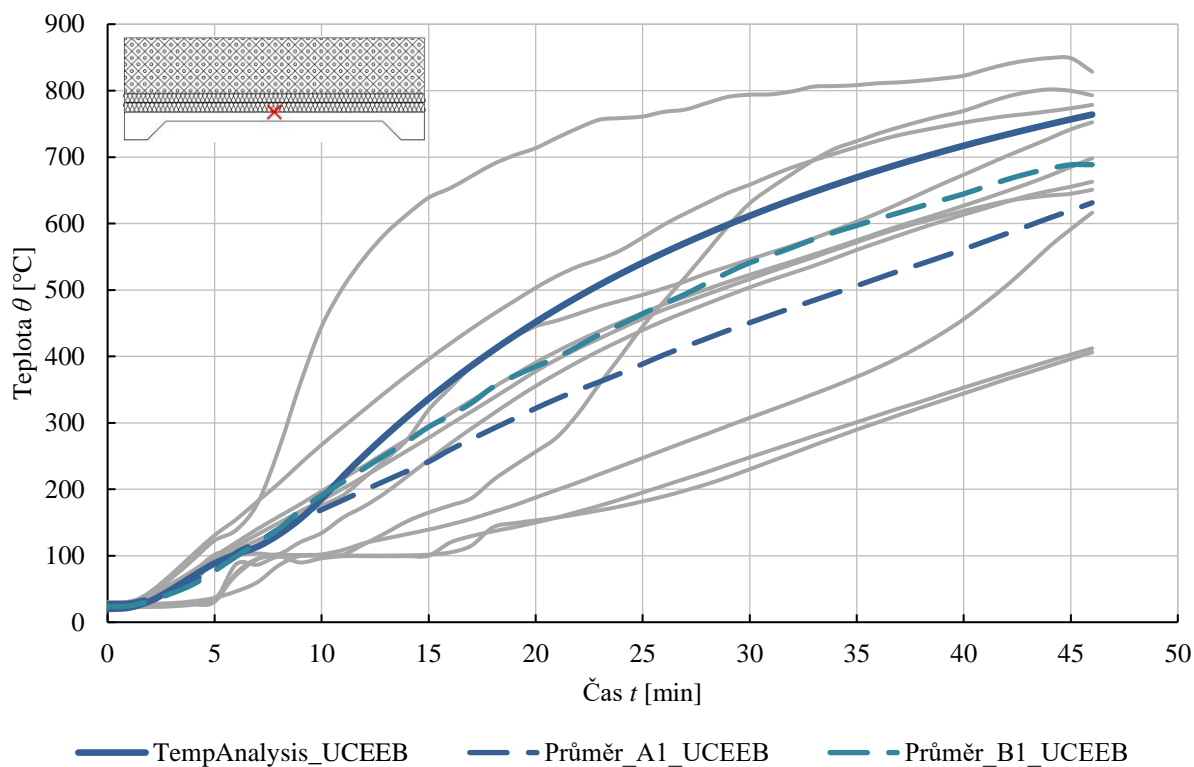
Obr. 72 Úvodní okno programu TempAnalysis verze TA_sL – část pro výstupy [37]

7.2.2 Výsledky a vyhodnocení

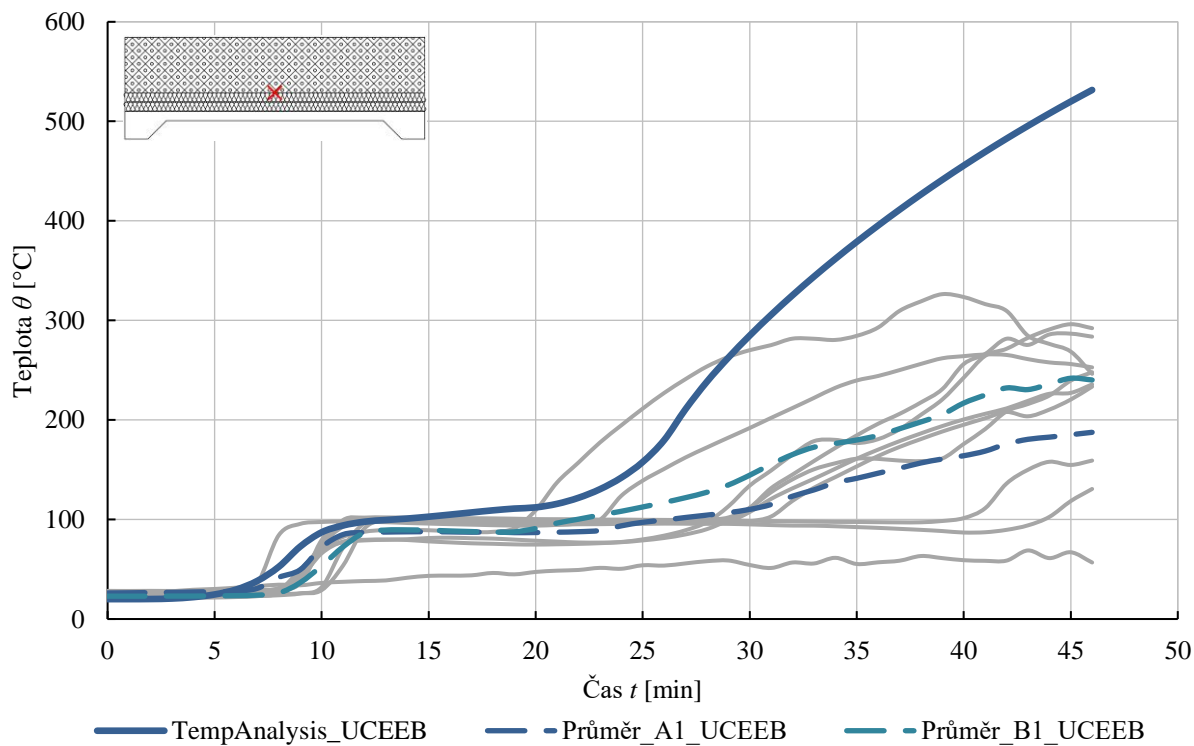
Pro jednotlivé varianty skladeb střešních pláštěů byly stanoveny teplotní profily s následným porovnáním výsledků realizovaných požárních zkoušek (Obr. 73–80). Naměřené hodnoty z provedených požárních zkoušek z kapitoly 6.3.5 a 6.4.5 jsou v Obr. 73–80 znázorněny šedými křivkami. Průběhy teplot z termočlánků umístěných na EPS nebyly porovnány s teplotními profily vypočtených na horním povrchu vrstvy z EPS. Toto porovnání nebylo provedeno proto, neboť EPS během požárních zkoušek sublimoval, čímž se výrazně měnila jeho izolační schopnost. Ve výpočtech byla vrstva z EPS uvažována s neměnnými vlastnostmi v závislosti na čase a teplotě. Výpočty jsou s přihlédnutím na tuto skutečnost nepřesné. Z tohoto důvodu není logické porovnávat výsledky zkoušek a teplotní analýzy na horním povrchu EPS.

Vyhodnocení skutečné a vypočtené požární odolnosti je provedeno v Tab. 12, která popisuje dosažení kritérií mezních stavů požární odolnosti, a to izolační schopnosti a druhu konstrukční části DP1. Mezní stav celistvosti je posouzen pouze v závislosti na výsledcích požárních zkoušek, neboť jej není možné nikterak vypočítat (viz Tab. 10 v kapitole 6.4.5). Kritéria izolační schopnosti jsou z důvodu nerelevantních výstupů teplotní analýzy na horním povrchu EPS porovnány s výsledky na rozhraní vrstev z minerální vlny a EPS. Zbýlá kritéria se řídí podle požadavků uvedených v kapitole 3.1.1.

Skladba S1

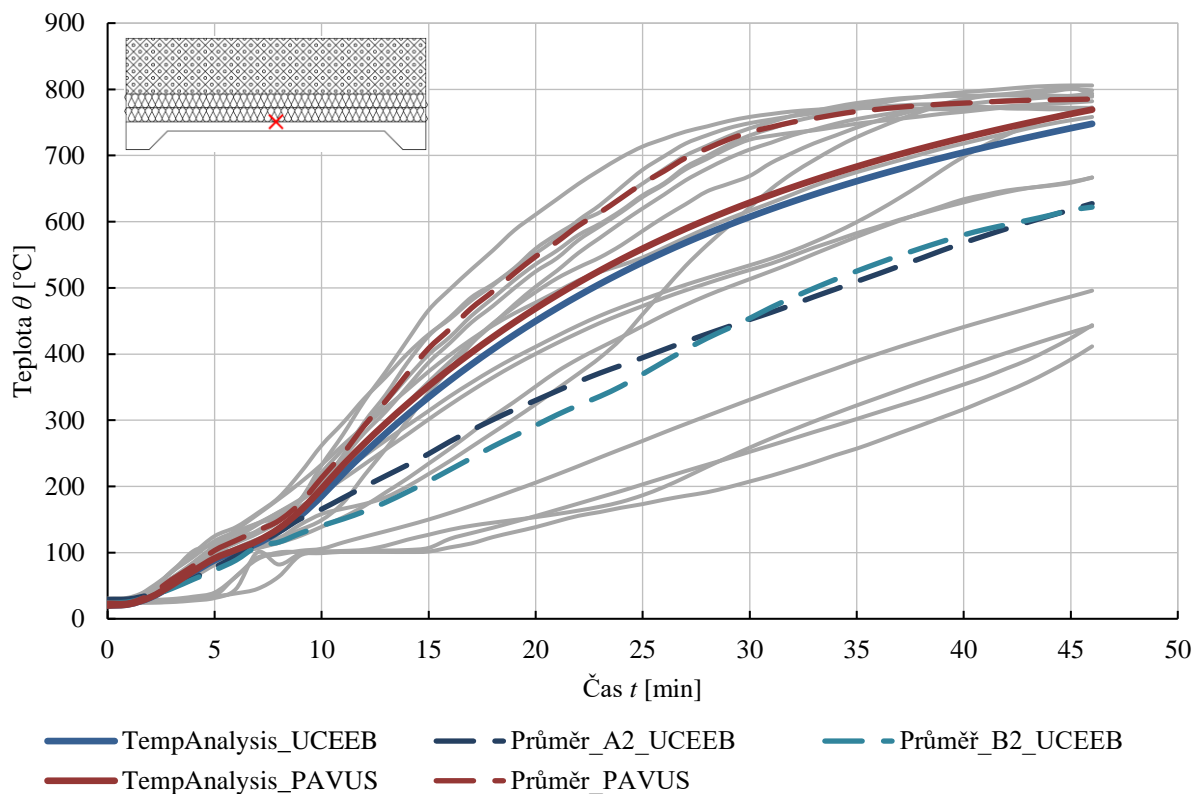


Obr. 73 Teplotní profily skladby S1 mezi betonem a minerální vlnou

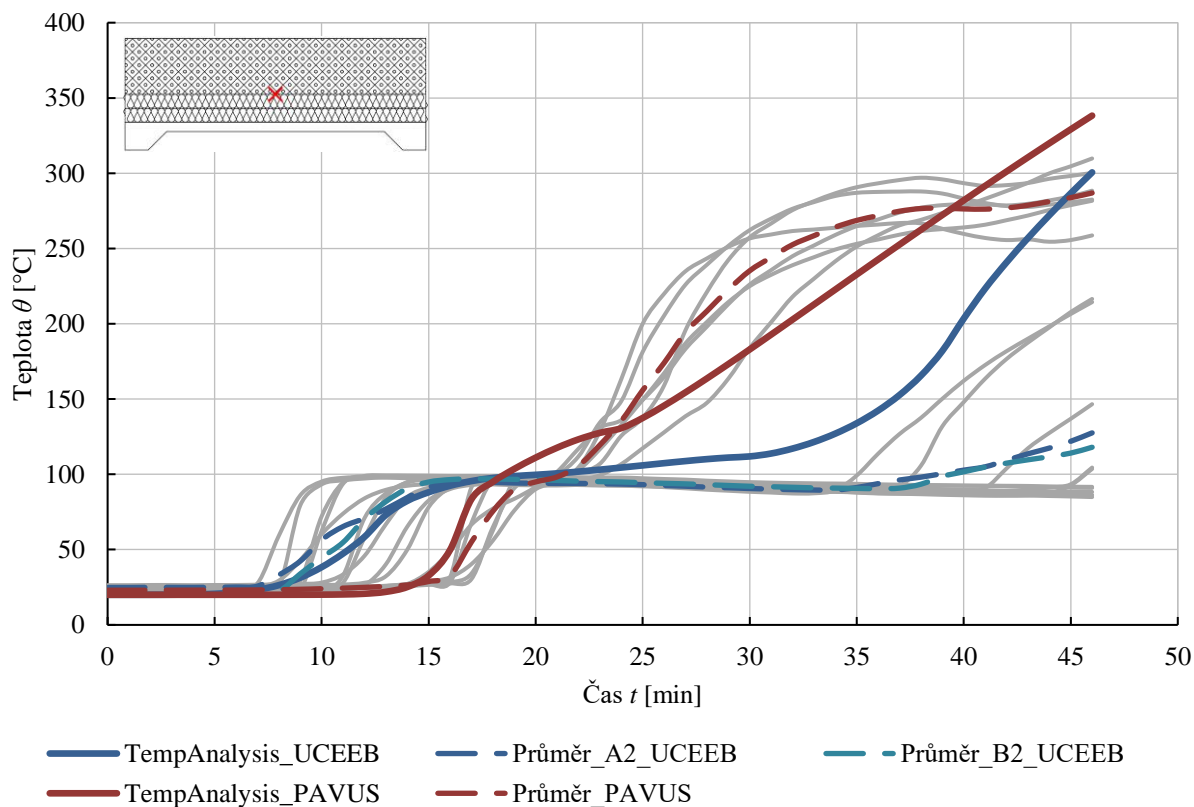


Obr. 74 Teplotní profily skladby S1 mezi minerální vlnou a EPS

Skladba S2

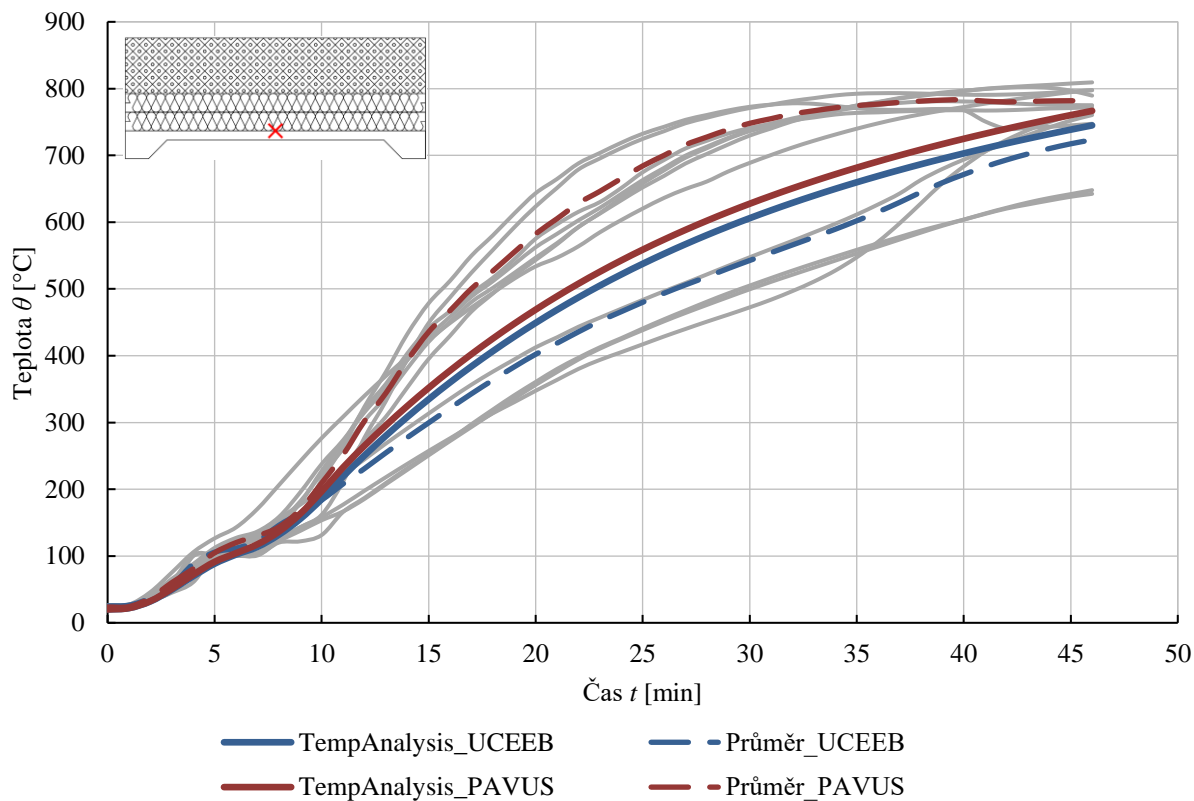


Obr. 75 Teplotní profily skladby S2 mezi betonem a minerální vlnou

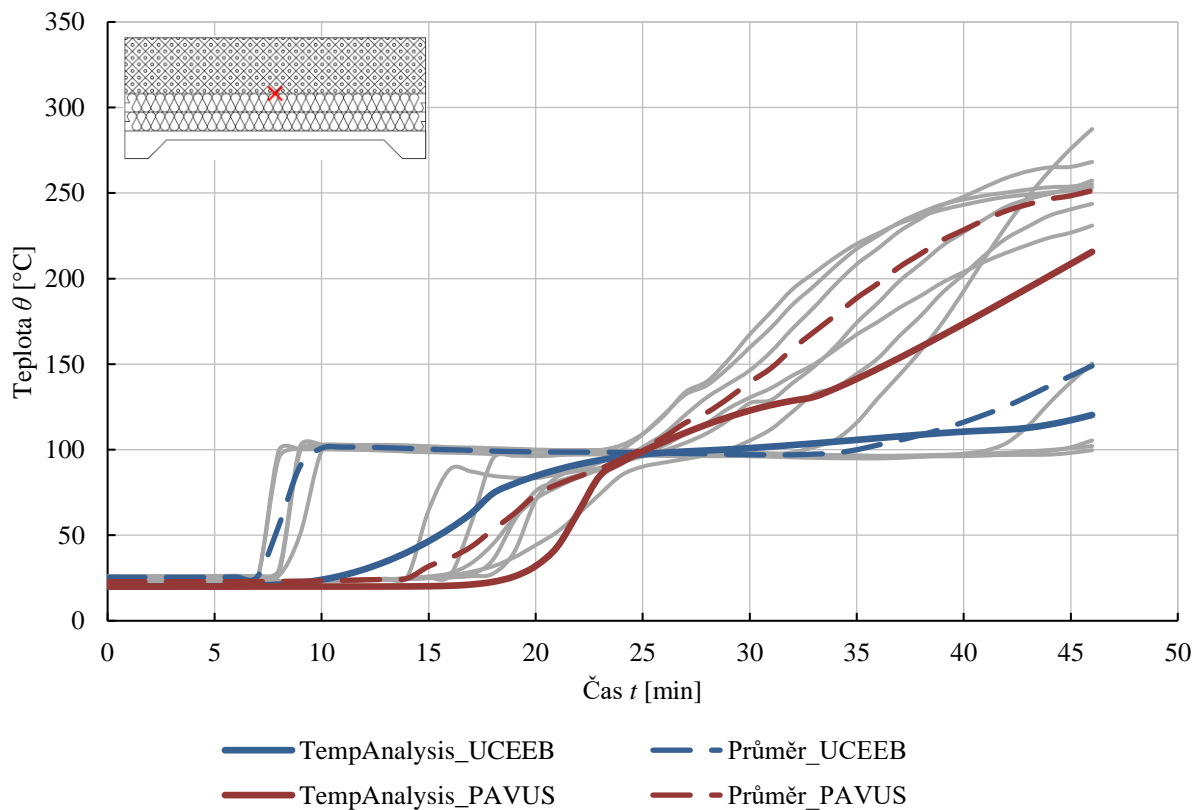


Obr. 76 Teplotní profily skladby S2 mezi minerální vlnou a EPS

Skladba S3

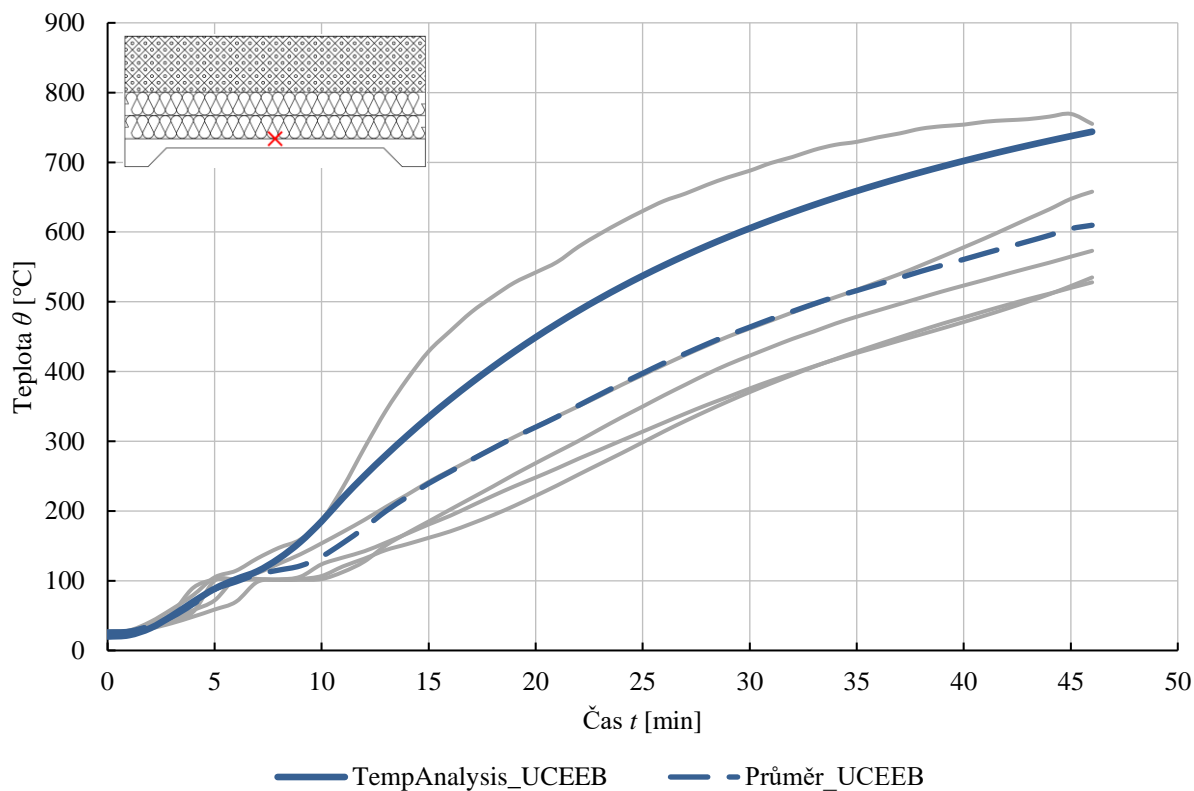


Obr. 77 Teplotní profily skladby S3 mezi betonem a minerální vlnou

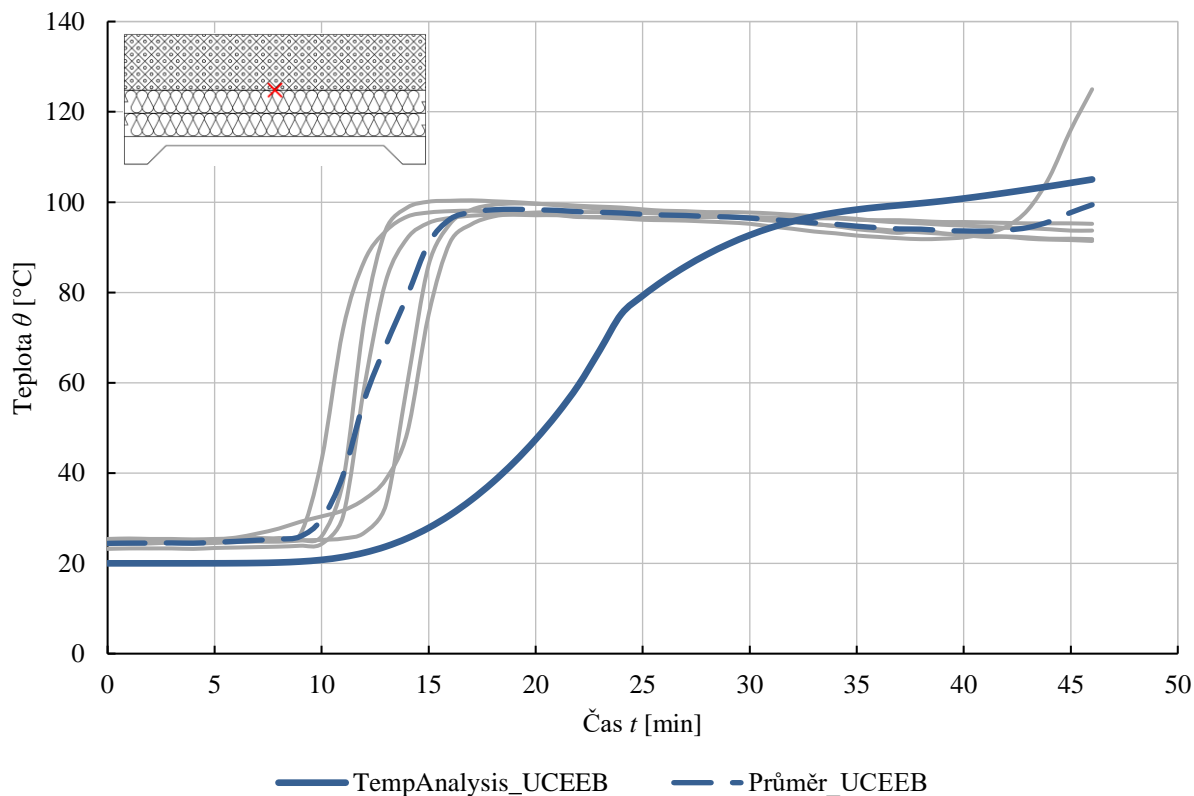


Obr. 78 Teplotní profily skladby S3 mezi minerální vlnou a EPS

Skladba S4



Obr. 79 Teplotní profily skladby S4 mezi betonem a minerální vlnou



Obr. 80 Teplotní profily skladby S4 mezi minerální vlnou a EPS

8 Vyhodnocení

Požadavkem objednavatele požárních zkoušek bylo docílení požární odolnosti, prefabrikovaného předpjatého TT panelu s vybranými skladbami střešních pláštů, REI 45 DP1. Mezní stav únosnosti R nebyl předmětem pozorování již provedených požárních zkoušek. Mezní stav celistvosti byl sledován pouze v průběhu zkoušky provedené v PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí, tedy u skladeb S2 a S3. Po dobu 45 minut nedošlo k porušení žádného z kritérií uvedených v Tab. 10 a kapitole 3.1.1. U mezního stavu izolační schopnosti bylo dosažení kritérií převážně po 45 minutách, pouze u skladby S1 došlo k dosažení dřívě a splňuje izolační schopnost po dobu 30 minut. Problematické je u zvolených skladeb určení druhu konstrukční části. Konstrukce střechy může být v takovémto provedení klasifikována jako druh konstrukční části DP1 pouze v případě, kdy nedojde na rozhraní minerální vlny a EPS k překročení teploty 140 °C. Tento požadavek splňuje na základě experimentu pouze skladba S4. Ostatní skladby splňují dle provedených zkoušek druh konstrukční části DP1 po dobu 15 minut (viz Tab. 12).

Výsledky teplotní analýzy se převážně pohybují v rozmezí vymezeném průběhy teplot ze všech požárních zkoušek. Teplotní profily vypočtené na rozhraní vrstev betonu a minerální vlny v převážné míře odpovídají výsledkům provedených požárních zkoušek. Sdílení tepla v tomto případě probíhá pouze přes vrstvu betonu, jehož materiálové vlastnosti za zvýšené teploty jsou detailně popsány v [32].

Výstupy teplotní analýzy velice ovlivňují vlastnosti materiálů, které jsou proměnné především kvůli zvyšující se teplotě a změně obsahu vlhkosti dané vrstvy. Při požárních zkouškách v UCEEB, ČVUT v Praze se volná i vázaná voda z betonu uvolňuje pouze z vylehčujících kazet, tedy z menšího objemu, oproti požární zkoušce provedené ve zkušebně PAVUS, a. s., kde se voda uvolňuje z kazet i z nosných žeber TT panelů. Toto může být příčinou oddálení prvotního nárůstu teploty do cca 100 °C a následným výrazněji rostoucím průběhem teploty od 100 °C do maximální teploty v konkrétním čase.

Pro více vypovídající hodnoty mezi vrstvou z minerální vlny a vrstvou z EPS bylo nutné v teplotní analýze uvažovat dva modely materiálových vlastností minerální vlny z hlediska množství vlhkosti absorbované z betonu. Vlhkost v minerální vlně značně ovlivňuje její tepelně izolační schopnost, se stoupající vlhkostí tepelně izolační schopnost vlny klesá. Tyto modely byly stanoveny na základě inverzní analýzy a zahrnují fyzikální procesy, které bylo nutné zohlednit pro získání kvalitního modelu sdílení tepla.

Vhodným přístupem pro docílení přesnějších výstupů teplotní analýzy by bylo použití sofistikovanějších modelů sdruženého transportu tepla a vlhkosti. Tyto modely však svou složitostí přesahují rámec této práce.

Tab. 12 Vyhodnocení požární odolnosti skladeb střešních pláštů

Skladba	Mezní stav	Kritérium	Naměřená hodnota [min]			Vypočtená hodnota ¹⁾ [min]		Hodnocení požární odolnosti		
			UCEEB		PAVUS	UCEEB	PAVUS	UCEEB	PAVUS	Výpočet ²⁾
			A	B						
S1	Izolační schopnost I	Přůměrná teplota ($\theta > 160\text{ °C}$)	43	38	-	25	-	30	-	15
		Maximální teplota ($\theta > 200\text{ °C}$)	45	25	-	26	-	15	-	15
	DP1	Teplota mezi minerální vlnou a EPS ($\theta > 140\text{ °C}$)	25	21	-	23	-	15	-	15
S2	Izolační schopnost I	Přůměrná teplota ($\theta > 160\text{ °C}$)	bez dosažení	bez dosažení	bez dosažení	37	27	45	45	15
		Maximální teplota ($\theta > 200\text{ °C}$)	bez dosažení	bez dosažení	bez dosažení	39	31	45	45	30
	DP1	Teplota mezi minerální vlnou a EPS ($\theta > 140\text{ °C}$)	38	39	23	35	25	30	15	15
S3	Izolační schopnost I	Přůměrná teplota ($\theta > 160\text{ °C}$)	bez dosažení	-	bez dosažení	bez dosažení	38	45	45	30
		Maximální teplota ($\theta > 200\text{ °C}$)	bez dosažení	-	bez dosažení	bez dosažení	43	45	45	30
	DP1	Teplota mezi minerální vlnou a EPS ($\theta > 140\text{ °C}$)	36	-	28	bez dosažení	34	30	15	30
S4	Izolační schopnost I	Přůměrná teplota ($\theta > 160\text{ °C}$)	-	bez dosažení	-	bez dosažení	-	45	-	45
		Maximální teplota ($\theta > 200\text{ °C}$)	-	bez dosažení	-	bez dosažení	-	45	-	45
	DP1	Teplota mezi minerální vlnou a EPS ($\theta > 140\text{ °C}$)	-	bez dosažení	-	bez dosažení	-	45	-	45

¹⁾ Hodnoty psané šedou barvou jsou vypočítané na rozhraní vrstev minerální vlny a EPS.

²⁾ Výsledná hodnota je stanovena vždy z nižší vypočtené doby dosažení kritéria konkrétního mezního stavu požární odolnosti.

9 Závěr

Úvodem práce byly shrnuty teoretické poznatky, které se týkají znalostí ohledně chování požáru, hodnocení střeš z požárního hlediska a stručného vysvětlení přístupů teplotní analýzy konstrukce, které obsahuje popis modelu sdílení tepla vycházejícího z Fourierova zákona. Jedním z možných přístupů teplotní analýzy konstrukce jsou zkoušky požární odolnosti. Problematice požárních zkoušek je věnována samostatná kapitola s navázáním popisu přípravy, realizace a vyhodnocení již vykonaných zkoušek. Tyto zkoušky proběhly v požární laboratoři FireLAB UCEEB, ČVUT v Praze a v akreditované zkušebně PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí.

V rámci teplotní analýzy různých variant střešních pláštů, zahrnujících betonovou vylehčující kazetu, byly navrženy čtyři skladby za účelem dosažení nejvyšší možné požární odolnosti celé střešní konstrukce. Konstrukce střechy je v tomto případě tvořena jednou ze skladeb střešních pláštů a prefabrikovaných předpjatých TT panelů. Vychází se z příslušných technických předpisů, jež udávají kritéria dosažení mezních stavů požární odolnosti. Teplotní analýzou byly stanoveny teplotní profily navržených skladeb, které jsou porovnány s konkrétními kritérii mezních stavů požární odolnosti.

Výsledky teplotní analýzy byly v závěrečné části práce porovnány s reálnými průběhy teplot z požárních zkoušek. Výpočtem stanovené teplotní profily se přibližují spíše výstupům zkoušek provedených v požární laboratoři FireLAB UCEEB, ČVUT v Praze. Zde byly zkoušeny pouze betonové vylehčující kazety se všemi variantami střešních pláštů, což více odpovídá podmínkám uvažovaných v matematickém modelu sdílení tepla. Oproti tomu byl ozkoušen celý střešní TT panel se zvolenými skladbami střechy v akreditované zkušebně PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí.

Přínosem práce je ověření, že i při použití jednoduchého výpočetního modelu sdílení tepla se lze přiblížit naměřeným průběhům teplot z požárních zkoušek. Hodnoty získané výpočetním modelem teplotní analýzy konstrukce vycházejí konzervativní. V budoucnu by pravděpodobně bylo možné prokazovat požární odolnost konstrukcí pomocí verifikovaných a validovaných modelů, oproti finančně náročným požárním zkouškám.

Seznam obrázků

Obr. 1 Prefabrikovaný předpjatý TT panel; převzato z [1]	1
Obr. 2 Charakteristický průběh teplot požáru v místnosti; převzato z [3]	2
Obr. 3 Nominální normová teplotní křivka ISO 834 v čase 60 minut; podle [7].....	3
Obr. 4 Mezní stavy požární odolnosti: (a) únosnost; (b) celistvost; (c) izolační schopnost; (d) radiace; převzato z [15]	6
Obr. 5 Příklady konstrukcí dle druhů konstrukčních částí: (a) DP1; (b) DP2; (c) DP3; převzato z [16].....	7
Obr. 6 Termoelektrické články: (a) deskový snímač teploty [20]; (b) diskový termoelektrický článek [21]	12
Obr. 7 Mezní odchylky po prvních 10 minutách zkoušky pro průměrnou teplotu uvnitř pece; podle [10]	12
Obr. 8 Varianty skladeb střešních pláštů: (a) skladba S1; (b) skladba S2; (c) skladba S3; (d) skladba S4.....	15
Obr. 9 Rozměry mobilní požární pece UCEEB ČVUT v Praze; převzato z [22]	17
Obr. 10 Mobilní požární pec v sestavení pro zkoušení vodorovných prvků; převzato z [23].....	17
Obr. 11 Rozmístění termočlánků v řezu: (a) vzorek A1, B1; (b) vzorek A2, B2.....	19
Obr. 12 Půdorysné rozmístění termočlánků vzorků A1, A2 a B1, B2: (a), (b) mezi betonovou kazetou a minerální vlnou; (c), (d) mezi minerální vlnou a EPS; (e), (f) na EPS – vnější líc.....	20
Obr. 13 Vzorky A1, B1 a A2, B2 při montáži: (a) umístění termočlánků na betonových kazetách; (b) umístění termočlánků mezi minerální vlnu a EPS; (c) umístění termočlánků na EPS před osazením zatížení.....	21
Obr. 14 Umístění vzorků A1, A2 v teplovzdušné sušárně	21
Obr. 15 Rozmístění termočlánků v řezu: (a) vzorek A; (b) vzorek B	22
Obr. 16 Půdorysné rozmístění termočlánků vzorků A, B: (a), (b) mezi betonovou kazetou a minerální vlnou; (c), (d) mezi minerální vlnou a EPS; (e), (f) na EPS – vnější líc	23
Obr. 17 Vzorky A a B při montáži: (a) umístění termočlánků na betonových kazetách; (b) umístění termočlánků mezi minerální vlnu a EPS (c) umístění termočlánků na EPS před osazením zatížení	24
Obr. 18 Průběh teplot uvnitř pece při zkoušce A1, A2.....	26
Obr. 19 Okrajové podmínky zkoušky A1, A2 – objemový průtok VZT a výkon hořáku.....	26
Obr. 20 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A1 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou	27
Obr. 21 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A1 – mezi minerální vlnou a EPS	27
Obr. 22 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A1 – na horním líci EPS	27

Obr. 23 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A2 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou	28
Obr. 24 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A2 – mezi minerální vlnou a EPS	28
Obr. 25 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A2 – na horním líci EPS	28
Obr. 26 Průběh teplot uvnitř pece při zkoušce B1, B2 vč. porovnání s normovou teplotní křivkou ISO 834.....	29
Obr. 27 Okrajové podmínky zkoušky B1, B2 – objemový průtok VZT a výkon hořáku	29
Obr. 28 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B1 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou	30
Obr. 29 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B1 – mezi minerální vlnou a EPS.....	30
Obr. 30 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B1 – na horním líci EPS	30
Obr. 31 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B2 – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou	31
Obr. 32 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B2 – mezi minerální vlnou a EPS.....	31
Obr. 33 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B2 – na horním líci EPS	31
Obr. 34 Průběh teplot uvnitř pece při zkoušce A, B vč. porovnání s normovou teplotní křivkou ISO 834.....	32
Obr. 35 Okrajové podmínky zkoušky A, B – objemový průtok VZT a výkon hořáku.....	32
Obr. 36 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou	33
Obr. 37 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A – mezi minerální vlnou a EPS	33
Obr. 38 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku A – na horním líci EPS	33
Obr. 39 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B – mezi betonovou kazetou a minerální vlnou	34
Obr. 40 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B –minerální vlnou a EPS	34
Obr. 41 Průběh teplot na neohřívané straně vzorku B – na horním líci EPS	34
Obr. 42 Vzorky A1, A2 po požární zkoušce: (a) výsledné vytavení EPS; (b) horní povrch minerální vlny po odejmutí EPS; (c) horní povrch betonových kazet; (d) spodní povrch betonových kazet	35
Obr. 43 Vzorky B1, B2 po požární zkoušce: (a) výsledné vytavení EPS; (b) horní povrch minerální vlny po odejmutí EPS; (c) horní povrch betonových kazet; (d) spodní povrch betonových kazet	36
Obr. 44 Vzorky A, B po požární zkoušce: (a) výsledné vytavení EPS; (b) horní povrch minerální vlny po odejmutí EPS; (c) horní povrch betonových kazet; (d) spodní povrch betonových kazet	37
Obr. 45 Horizontální pec ve zkušebně PAVUS, a. s. ve Veselí nad Lužnicí; převzato z [25].....	37

Obr. 46 Průběh teplot uvnitř zkušební pece	38
Obr. 47 Přetlak uvnitř zkušební pece.....	39
Obr. 48 Výkres zkušební vzorku TT panelů včetně rozmístění termoelektrických článků	40
Obr. 49 Průběh montáže zkušební vzorku střešních TT panelů se skladbami S2 (vlevo) a S3 (vpravo): (a) uložení panelů na zkušební pec; (b) spodní povrch panelů; (c) montáž desek z minerální vlny; (d) umístění termočlánků mezi minerální vlnou a EPS; (e) skladby S2, S3 před položením hydroizolační fólie; (f) finální stav zkušební vzorku.....	41
Obr. 50 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S2 – mezi TT panelem a minerální vlnou ..	43
Obr. 51 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S2 – mezi minerální vlnou a EPS.....	43
Obr. 52 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S2 – na horním povrchu EPS	43
Obr. 53 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S3 – mezi TT panelem a minerální vlnou ..	44
Obr. 54 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S3 – mezi minerální vlnou a EPS.....	44
Obr. 55 Průběh teplot na neohřívané straně skladby S3 – na horním povrchu EPS	44
Obr. 56 Zkušební vzorek střešních TT panelů v/po průběhu požární zkoušky: (a) spodní povrch panelu po odštěpení vylehčujících kazet v 10. minutě zkoušky; (b) druhá fáze odštěpení kazet v 35. minutě zkoušky; (c) horní povrch skladby S2 v 40. minutě zkoušky; (d) horní povrch skladby S3 v 40. minutě zkoušky; (e) spodní povrch panelu následující den po zkoušce; (f) detail spodního povrchu panelu	45
Obr. 57 Proces nárůstu pórových tlaků s následným odštěpením betonu; převzato z [29].....	48
Obr. 58 Průběh teploty, pórových tlaků a vlhkosti v betonu při požáru; převzato z [29]	48
Obr. 59 Objemová hmotnost obyčejného betonu v závislosti na zvýšené teplotě; podle [32].....	49
Obr. 60 Měrná tepelná kapacita obyčejného betonu v závislosti na zvýšené teplotě; podle [32] ..	50
Obr. 61 Tepelná vodivost obyčejného betonu v závislosti na zvýšené teplotě; podle [32].....	51
Obr. 62 Objemová hmotnost minerální vaty v závislosti na zvýšené teplotě	52
Obr. 63 Měrná tepelná kapacita minerální vlny a betonu v závislosti na zvýšené teplotě – 1. model	53
Obr. 64 Měrná tepelná kapacita minerální vlny a betonu v závislosti na zvýšené teplotě – 2. model	53
Obr. 65 Tepelná vodivost minerální vaty v závislosti na zvýšené teplotě; podle [4].....	54
Obr. 66 Tepelná vodivost minerální vaty v závislosti na zvýšené teplotě – 1. model	55
Obr. 67 Tepelná vodivost minerální vaty v závislosti na zvýšené teplotě – 2. model	55
Obr. 68 Objemová hmotnost EPS v závislosti na zvýšené teplotě.....	56
Obr. 69 Měrná tepelná kapacita EPS v závislosti na zvýšené teplotě	57
Obr. 70 Tepelná vodivost EPS v závislosti na zvýšené teplotě.....	57

Obr. 71 Úvodní okno programu TempAnalysis verze TA_sL – část pro zadání vstupních parametrů [37]	58
Obr. 72 Úvodní okno programu TempAnalysis verze TA_sL – část pro výstupy [37]	59
Obr. 73 Teplotní profily skladby S1 mezi betonem a minerální vlnou	60
Obr. 74 Teplotní profily skladby S1 mezi minerální vlnou a EPS	60
Obr. 75 Teplotní profily skladby S2 mezi betonem a minerální vlnou	61
Obr. 76 Teplotní profily skladby S2 mezi minerální vlnou a EPS	61
Obr. 77 Teplotní profily skladby S3 mezi betonem a minerální vlnou	62
Obr. 78 Teplotní profily skladby S3 mezi minerální vlnou a EPS	62
Obr. 79 Teplotní profily skladby S4 mezi betonem a minerální vlnou	63
Obr. 80 Teplotní profily skladby S4 mezi minerální vlnou a EPS	63

Seznam tabulek

Tab. 1 Základní kritéria rozdělení druhů konstrukčních částí; podle [11]	6
Tab. 2 Varianty skladeb střešních plášťů	14
Tab. 3 Výkon pískového hořáku v čase; převzato z [22]	18
Tab. 4 Sledování úbytku hmotnosti vzorků A1, A2 během sušení	22
Tab. 5 Průběh zkoušky vzorků A1, A2	24
Tab. 6 Průběh zkoušky vzorků B1, B2.....	25
Tab. 7 Průběh zkoušky vzorků A, B.....	25
Tab. 8 Změřené hodnoty vlhkosti a teploty prostředí před požární zkouškou	39
Tab. 9 Průběh zkoušky vzorků S1, S2.....	42
Tab. 10 Vyhodnocení kritérií mezních stavů požární odolnosti na základě zkoušky PAVUS, a. s.	42
Tab. 11 Přehled procesů a změn v betonu při vystavení zvýšeným teplotám; převzato z [6, 28].	47
Tab. 12 Vyhodnocení požární odolnosti skladeb střešních plášťů	65

Literatura

- [1] *STT TYPE ROOF SLABS* [online]. Consolis Betonika. [cit. 3. 10. 2019]. Dostupné z: <https://www.betonika.lt/en/services/paslauga-1/stt-tipo-ploksts>
- [2] Vyhláška Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb. o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci) ve znění vyhlášky č. 221/2014 Sb.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03157-5.
- [6] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [7] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Český normalizační institut, srpen 2004.
- [8] KUPILÍK, V. Posuzování střech z hlediska požární bezpečnosti, příklady nevhodného použití fóliové střešní krytiny. In: *TZB-info* [online]. 14. 12. 2019. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/6122-posuzovani-strech-z-hlediska-pozarni-bezpecnosti-prikklady-nevhodneho-pouziti-foliove-stresni-krytiny>
- [9] 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.
- [10] ČSN EN 1363-1. Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [11] ČSN 73 0810. Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [12] HEJTMÁNEK, Petr, Hana NAJMANOVÁ a Marek POKORNÝ. Požární odolnost stavebních konstrukcí. In: *TZB-info* [online]. 2016. [cit. 22. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13655-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci>
- [13] PURKISS, John A a Long-Yuan LI. *Fire Safety Engineering Design of Structures, Third Edition*. B.m.: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4665-8548-5.

- [14] ČSN EN 1363-2. Zkoušení požární odolnosti - Část 2: Alternativní a doplňkové postupy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.
- [15] POKORNÝ, Marek a Petr HEJTMÁNEK. Pasivní požární ochrana stavebních konstrukcí v rámci bytové a občanské výstavby. In: *Seminář ČKAIT* [online]. Karlovy Vary. 2017. [cit. 29. 4. 2019]. Dostupné z: <http://pozar.fsv.cvut.cz/akce/10-seminar-ckait-pasivni-pozarni-ochrana-stavebnich-konstrukci.html>
- [16] HEJTMÁNEK, Petr, Hana NAJMANOVÁ a Marek POKORNÝ. Druhy konstrukčních částí z požárního hlediska. In: *TZB-info* [online]. 8. 2. 2016. [cit. 30. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13651-druhy-konstrukcnich-casti>
- [17] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, 2006. ISBN 978-80-247-1329-8.
- [18] 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.
- [19] WALD, František. *Software ke stanovení požární odolnosti nosných konstrukcí*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04746-0.
- [20] *Plate thermocouple* [online]. Thermo-elektra. [cit. 10. 10. 2019]. Dostupné z: <https://www.thermo-electra.com/en/producten/Thermokoppel/thermocouples-with-cable-or-connector/637-Plate-Thermometer>
- [21] *Z2-K-3M DISC (IEC) - Thermocouple* [online]. Premier Farnell Limited. [cit. 12. 10. 2019]. Dostupné z: <https://il.farnell.com/labfacility/z2-k-3m-disc-iec/sensor-thermocouple-3m/dp/1633485#anchorTechnicalDOCS>
- [22] CHLÁDEK, J. *Malorozměrové zkoušky požární odolnosti*. Praha: ČVUT v Praze, 2019.
- [23] *Vyvinuli jsme pec miniFUR pro středněrozměrové požární zkoušky* [online]. Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. [cit. 16. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/aktuality/vyvinuli-jsme-pec-minifur-pro-strednerozmerove-pozarni-zkousky>
- [24] KLOIDA, V. *Teplotní analýza styku prefabrikovaných předpjatých TT panelů vystavených požáru*. Praha: ČVUT v Praze, 2020 [v přípravě].
- [25] ZEMAN, Filip, CÁBOVÁ, Kamila, WALD, František. Numerický model požární zkoušky v peci. In: *TZB-info* [online]. 19. 12. 2018. [cit. 12. 11. 2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/18414-numericky-model-pozarni-zkousky-v-peci>
- [26] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS, ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Mass.: Bethesda, Md: National Fire Protection Association; Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 978-0-87765-451-3.

-
- [27] SAINT-GLOBAL CONSTRUCTION PRODUCTS CZ a. s., DIVISION ISOVER. *Technical Insulations* [online]. 2017. [cit. 7. 11. 2019]. Dostupné z: https://www.isover.cz/sites/isover.cz/files/assets/documents/catalogue_of_technical_insulations_2017_08_2.pdf
- [28] KHOURY, Gabriel Alexander a INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE, ed. *Fire design of concrete structures: materials, structures and modelling*. 1. publ. Lausanne: Internat. Federation for Structural Concrete, 2007. Bulletin / International Federation for Structural Concrete State-of-art report, 38. ISBN 978-2-88394-078-9.
- [29] PROCHÁZKA, Jaroslav, ŠTEFAN, Radek. *Specifika návrhu prvků z vysokopevnostního betonu (HSC)* [online]. 2016. [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/vyuka/133PSBZ/133PSBZ_Prednaska_A11.pdf
- [30] KODUR, Venkatesh. *Properties of Concrete at Elevated Temperatures*. ISRN Civil Engineering [online]. 2014, 1–15. ISSN 2090-5114. Dostupné z: doi:10.1155/2014/468510
- [31] GUO, Zhenhai a Xudong SHI. *Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures*. Waltham, Mass: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-0-12-386962-3.
- [32] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, listopad 2006.
- [33] HIDALGO-MEDINA, Juan Patricio. *Performance-based methodology for the fire safe design of insulation materials in energy efficient buildings*. The University of Edinburgh, 2015.
- [34] JERMAN, Miloš a Robert ČERNÝ. *Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials*. Energy and Buildings [online]. 2012, 53, 39–46. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.002
- [35] PETTER JELLE, Bjørn. *Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings*. In: Start-Up Creation [online]. B.m.: Elsevier, 2016 [cit. 2019-11-18], s. 129–181. ISBN 978-0-08-100546-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100546-0.00008-X
- [36] EUROPEAN MANUFACTURERS OF EPS. *Behaviour of EPS in case of fire* [online]. [cit. 6. 11. 2019]. Dostupné z: <https://eumeps.construction/content/8-downloads/4-documents/1-fire-safety/eps-behaviour-in-case-of-fire.pdf>
- [37] 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. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~stefarad/software/ta/ta.cz.html>