

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**Katedra betonových a zděných konstrukcí**



**Studijní program: Integrální bezpečnost staveb**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**MODELOVÁNÍ POŽÁRU V TUNELECH POMOCÍ  
ZJEDNODUŠENÝCH A ZPŘESNĚNÝCH MODELŮ  
POŽÁRU**

**MODELLING OF FIRE IN TUNNELS USING SIMPLIFIED AND  
ADVANCED FIRE MODELS**

**Vypracoval:**

**Bc. Miroslav Hlaváček**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Martin Benýšek, Ph.D.**

**Datum:**

**08.01.2024**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hlaváček** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **486230**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studijní program: **Integrální bezpečnost staveb**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Modelování požáru v tunelech pomocí zjednodušených a zpřesněných modelů požáru**

Název diplomové práce anglicky:

**Modelling of fire in tunnels using simplified and advanced fire models**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše literatury
2. Analýza modelů požáru v tunelech
3. Modely požáru v tunelech
4. Parametrická studie okrajových podmínek v tunelech
5. Vyhodnocení
6. Závěr

Seznam doporučené literatury:

HURLEY, Morgan J., Daniel GOTTUK, John R. HALL, Kazunori HARADA, Erica KULIGOWSKI, Milosh PUCHOVSKY, José TORERO, John M. WATTS a Christopher WIECZOREK, ed. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [online]. New York, NY: Springer New York, 2016 [vid. 2023-04-18]. ISBN 978-1-4939-2564-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2565-0  
Tunnel fire testing and modeling. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-49516-3  
Nařízení Komise (EU) č. 1303/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se bezpečnosti v železničních tunelech železničního systému Evropské unie (Text s významem pro EHP) [on-line]. 16. červen 2019 [vid. 2023-04-12]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1303/2019-06-16/ces>.  
Legislative Body: OP\_DATPRO

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Martin Benýšek, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSv**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.09.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Martin Benýšek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Martina Benýška, Ph.D. 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. Miroslav Hlaváček

---



## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval zejména mému vedoucímu Ing. Martinu Benýškovi, Ph. D., a to nejen za odborné vedení, pomoc a cenné rady, ale i za vstřícnost a podporu během tvorby této práce.

Také bych rád poděkoval svým blízkým za trpělivost, když jsem byl zaneprázdněn studiem, za podporu, když jsem potřeboval povzbudit, a za to, že se mnou slavili každý maličký úspěch na této cestě.

Diplomová práce byla vytvořena v rámci podpory Studentské grantové soutěže ČVUT pod číslem SGS23/033/OHK1/1T/11.

---



## OBSAH

Obsah .....	1
Abstrakt .....	3
Abstract.....	4
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	5
1. Úvod.....	6
1.1 Motivace.....	7
1.2 Struktura diplomové práce .....	7
2. Tunelové objekty .....	8
2.1 Terminologie.....	9
2.2 Silniční tunely .....	10
2.3 Železniční tunely.....	11
2.4 Konstrukce tunelů .....	12
3. Požární bezpečnost v tunelech .....	14
3.1 Historie požárů v silničních tunelech.....	16
3.2 Historie požárů v železničních tunelech .....	17
3.3 Srovnání bezpečnosti v silničních a železničních tunelech .....	18
3.3.1 Porovnání požadavků z hlediska bezpečnosti.....	19
4. Modely požárů.....	22
4.1 Fyzikální modely .....	22
4.2 Matematické deterministické modely .....	23
4.2.1 Nominální teplotní křivky používané pro tunelové objekty .....	23
4.2.2 Zjednodušené výpočtové modely.....	28
4.2.3 Zpřesněné výpočtové modely.....	28
4.2.4 Rychlost uvolňování tepla.....	30
5. Modelování požáru v tunelu .....	32
5.1 Použitý zpřesněný model .....	32
5.2 Porovnání teplot v konstrukci po zatížení různými teplotními křivkami	32
5.3 Popis zpřesněného modelu .....	34
5.3.1 HRR pro osobní automobil.....	36
5.3.2 HRR pro autobus .....	37
5.3.3 HGV – nákladní automobil.....	37
5.3.4 HRR – vlaková souprava .....	38



---

<b>5.4</b>	<b>Výstupy z programu FDS .....</b>	<b>38</b>
5.4.1	Výstupy z první modelové situace .....	39
5.4.2	Výstupy z druhé modelové situace.....	58
5.4.3	Výstupy z třetí modelové situace .....	77
<b>6.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>84</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>86</b>
	<b>Použitý software .....</b>	<b>90</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>91</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>93</b>
	<b>Seznam rovnic.....</b>	<b>93</b>





## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá problematikou modelování požárů v silničních a železničních tunelech pomocí zjednodušených a zpřesněných modelů požárů. V jednotlivých kapitolách je popsáno základní dělení tunelů podle druhu konstrukce nebo využití tunelu, dále je v diplomové práci souhrn historie požárů v tunelových stavbách, který vede až po současné vnímání požární bezpečnosti tunelových staveb v ČR i ve světě dle platných norem a předpisů. V neposlední řadě diplomová práce poukazuje na různé druhy požárních modelů a jejich využití v praxi.

Praktická část se věnuje matematickému modelování požáru s využitím programu Pyrosim (Fire Dynamics Simulator – FDS), kde bylo sledováno několik parametrů, například teploty na ostění tunelu po zatížení rychlosti uvolňování tepla (HRR) několika dopravních prostředků a následné porovnání se zjednodušenými modely požáru, normovými teplotními křivkami užívaných pro tunelové stavby.

### **Klíčová slova**

Požár; modelování požáru; požár v tunelu; požární bezpečnost v tunelech; software na modelování požáru; konstrukce a využití tunelu; druhy tunelů.



## **ABSTRACT**

The thesis deals with the problem of modelling fires in road and railway tunnels using simplified and advanced fire models. The individual chapters describe the basic division of tunnels according to the type of construction or use of the tunnel, then the thesis provides a summary of the history of fires in tunnel structures, leading up to the current perception of fire safety of tunnel structures in the Czech Republic and the world according to current standards and regulations. Last but not least, the thesis highlights the different types of fire models and their use in practice.

The practical part is devoted to the mathematical modelling of fire using the Fire Dynamics Simulator (FDS) with program Pyrosim, where several parameters were monitored, such as the temperatures on the tunnel lining after loading the heat release rate (HRR) of several vehicles and the subsequent comparison with simplified fire models, standard temperature curves used for tunnel structures.

## **Keywords**

Fire; fire modelling; tunnel fire; fire safety in tunnels; fire modelling software; tunnel construction and use; types of tunnels.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky

<i>CFD</i>	Výpočtový model dynamiky kapalin (Computational Fluid Dynamics)
<i>FDS</i>	Simulátor dynamiky požáru (Fire Dynamics Simulator)
<i>SMV</i>	Program pro zobrazení výsledků z programu FDS (Smokeview)
<i>HRR</i>	Rychlost uvolňování tepla (Heat Release Rate)
<i>HRR<sub>max</sub></i>	Maximální rychlost uvolňování tepla
<i>RHR<sub>f</sub></i>	Maximální rychlost uvolňování tepla
<i>PTCH</i>	Požárně technické charakteristiky
<i>HZS</i>	Hasičský záchranný sbor ČR
<i>IZS</i>	Integrovaný záchranný systém
<i>NRTM</i>	Nová rakouská tunelovací metoda
<i>TBM</i>	Tunelování razícími štíty (Tunnel Boring Machine)
<i>NIST</i>	Národní institut pro standardy a technologie
<i>OA</i>	Osobní automobil
<i>EV</i>	Elektrické vozidlo (Electric Vehicle)
<i>ICEV</i>	Konvenční vozidlo – spalovací (Internal Combustion Engine Vehicle)
<i>PHEV</i>	Plug-in hybridní vozidlo (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
<i>HGV</i>	Těžké nákladní vozidlo (Heavy Good Vehicle)
<i>MPV</i>	Víceúčelové osobní vozidlo (Multi-Purpose Vehicle)
<i>ČR</i>	Česká republika
<i>ZTV</i>	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln (Další technické specifikace a pokyny pro stavby silničních tunelů nebo název teplotní křivky)
<i>RABT</i>	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (Pokyny pro provoz a vybavení silničních tunelů) nebo název teplotní křivky)
<i>RWS</i>	Rijkswaterstaat
<i>HCM</i>	Hydrocarbon Modified (modifikovaná uhlovodíková křivka)
<i>HC</i>	Hydrocarbon (uhlovodíková křivka)
<i>PIARC</i>	World Road Association (Světová silniční asociace)
<i>UPTUN</i>	projekt financovaný EU zahájený v září 2002 a zaměřený na zvyšování požární bezpečnosti u stávajících tunelových staveb na území Evropy



## 1. ÚVOD

V kontextu rostoucí urbanizace a tlaku na efektivní dopravní systémy v hlavních městech jak v České republice, tak i ve světě, je třeba zvážit integrovaný přístup k projektování a výstavbě tunelů. S tím souvisí rostoucí vývoj rychlostních silnic, dálnic a rychlostních železničních koridorů, kde se tunely stávají nezbytnou součástí dopravní infrastruktury. Tyto tunelové stavby slouží k překonávání vodních toků, geograficky náročných oblastí, hustě zastavěných oblastí a také slouží jako řešení pro dopravu mimo chráněné oblasti nebo pro křížení s dalšími dopravními stavbami. Díky své schopnosti minimalizovat dopravní zácpy, chránit životní prostředí a zlepšovat celkovou dopravní situaci ve městech, tunely představují efektivní řešení v rámci urbanistického plánování. Nicméně, jsou v tunelech vysoké nároky zejména na bezpečnost, tímto se výstavba těchto podzemních cest stává technicky i finančně náročnější.

Při plánování nových tunelů je důležitým faktorem zdokonalení techniky rubání, která výrazně zkracuje dobu výstavby. Jedním z příkladů je Nová Rakouská Tunelovací Metoda (NRTM), která umožňuje postupné rubání profilu za pomoci moderních tunelovacích strojů nebo pomocí metody TBM, při které se profil rubá najednou v celém průřezu.

Nedávné i historické požáry v tunelech vedly k podrobnějšímu zkoumání bezpečnostních opatření v tunelových stavbách. V Tab. 1, Tab. 2 a Tab. 3 jsou uvedeny nejzávažnější požáry ve světě, které měly fatální důsledky pro lidské životy, zdraví a také materiální hodnoty. Z tohoto důvodu je nezbytné nepodceňovat požární bezpečnost při navrhování, projektování a provozování tunelových staveb. Moderní technologie, jako jsou například detekční systémy pro včasné rozpoznání požáru, optimalizované ventilační systémy pro odvod kouře a tepla, a vysoký standard školení pro provozní personál, všechny přispívají k vytváření bezpečnějšího prostředí v tunelech.[1–3]

K 20.05.2023 bylo v ČR evidováno 169 železničních tunelů s celkovou délkou téměř 56 km, přičemž průměrná délka jednoho tunelu činí 330 metrů. Nejdelší z nich, Ejpovický tunel, který má délku 4150 metrů. Silniční tunely, které jsou v menším počtu, tedy 37, mají větší průměrnou délku, dosahující téměř 780 metrů.[4]

Ačkoli statistické údaje naznačují, že požáry v tunelech nejsou tak běžné jako na volných úsecích komunikace, jejich důsledky bývají výrazně závažnější. Nejen že v tunelu mohou být ohroženi účastníci dopravních nehod, ale celkově všechny osoby v jeho blízkosti. Klíčovými riziky, kterým je třeba čelit, jsou rychlé šíření kouře a extrémní nárůst teplot, což může v kombinaci s omezenými možnostmi úniku mít tragické následky.[1]

Požární zkoušky jsou jedním z nejdůležitějších nástrojů pro hodnocení bezpečnosti tunelů. Nicméně mají několik omezení, která je nutné řešit. Jedním z hlavních problémů je skutečnost, že požární zkoušky s reálným požárem mohou způsobit poškození tunelového vybavení, což může zvýšit náklady a komplikace s tím spojené. Jako alternativní řešení se často používají dýmovnice k simulaci kouře v tunelu. Tento tzv. "studený kouř" však nemá stejné vlastnosti jako skutečný kouř z požáru, což ovlivňuje výsledky zkoušek.

Modelování požáru v tunelech pomocí výpočetních modelů je důležitým nástrojem pro posouzení bezpečnosti a navrhování opatření pro minimalizaci rizik spojených s požárem v tunelech. Existuje několik různých přístupů k modelování požáru v tunelu,



zahrnující jak experimentální metody, tak také výpočetní simulace. Výsledky matematických modelů požáru v tunelech mohou být použity pro navrhování optimálních strategií evakuace osob nebo efektivního zásahu HZS v případě požáru, a také pro navrhování konstrukčních opatření pro minimalizaci rizik spojených s požárem v tunelu.[2]

## 1.1 Motivace

I když pravděpodobnost požáru může být nízká, velký požár je možný incident v podzemních tunelech. V takovém případě je stabilita tunelové konstrukce klíčovým návrhovým parametrem týkajícím se požární bezpečnosti tunelů. Například tunel může být klíčovou dopravní tepnou mezi dvěma zeměmi, jako v případě tunelů Mont Blanc nebo St. Gotthard, kde došlo k několika požárům, z nichž některé měly závažné následky. Velký požár může ohrozit stavbu tunelu, pokud se požár stane příliš intenzivním po dlouhou dobu. Proto je zásadní se v této oblasti více vzdělávat a zkoumat nové a efektivnější metody požární bezpečnosti.

Dalším zajímavým tématem je volba návrhového požárního scénáře pro tunelové stavby. Při výběru různých požárních křivek neexistuje jediný návod, který by se týkal toho, jak zvolit jednu křivku ve vztahu k HRR, rychlosti podélného větrání nebo výškám stropu ve srovnání s ostatními. Proto například v ČR stále často používáme pro posouzení požární odolnosti tunelové konstrukce normovou křivku ISO 834, která dosahuje prokazatelně nižších teplot a rychlosti rozvoje požáru než jiné požární křivky, což jsou klíčové parametry při navrhování.

## 1.2 Struktura diplomové práce

Diplomová práce se v úvodu zaměřuje na základní dělení tunelů podle druhu konstrukce nebo využití tunelu, dále je v diplomové práci souhrn historie požárů v tunelových stavbách, který vede až po současné vnímání požární bezpečnosti tunelových staveb v ČR i ve světě dle platných norem a předpisů. V neposlední řadě diplomová práce poukazuje na různé druhy požárních modelů a jejich využití v praxi. V závěrečné části je v diplomové práci vymodelován silniční a železniční tunel pomocí programu Pyrosim, kde jsou sledované parametry posuzovány se zjednodušenými modely požáru.



## 2. TUNELOVÉ OBJEKTY

Tunely jsou liniové podzemní objekty, které se vyznačují uzavřeným příčným profilem. Tunelem procházejí pozemní komunikace či železnice a umožňuje vozidlům plynulou a bezpečnou jízdu pod horskými masivy, vodními překážkami, osídlenými oblastmi, historicky nebo ekologicky cennými územími apod.

Tunel představuje klíčový prvek v rámci širšího dopravního systému. Je nezbytné chápat jej nejen jako izolovanou strukturu, ale jako nedílnou součást komplexního komunikačního řetězce. Jakákoli událost ovlivňující dopravní systém má přímý dopad na provozní a bezpečnostní aspekty tunelu. Tento vztah je obousměrný, což znamená, že jakékoli problémy či významné události v rámci tunelu mohou mít značný vliv na celkovou plynulost a bezpečnost dopravního systému. Proto je zásadní, aby byl tunel navrhován a spravován s ohledem na jeho význam a roli v rámci celého dopravního uzlu. [5]

Obecně se klasifikují na základě svého umístění, způsobu výstavby, druhu provozu, délky a intenzity dopravy. Délka tunelu a intenzita dopravy jsou klíčové faktory ovlivňující technologické vybavení tunelu. Tunely se z hlediska druhu provozu rozdělují do dvou základních skupin – silniční a železniční. Projektové požadavky a předpisy se musí aplikovat na příslušný typ tunelu s ohledem na specifika provozu. Podle provozu jsou tunely více popsány v následujících kapitolách.

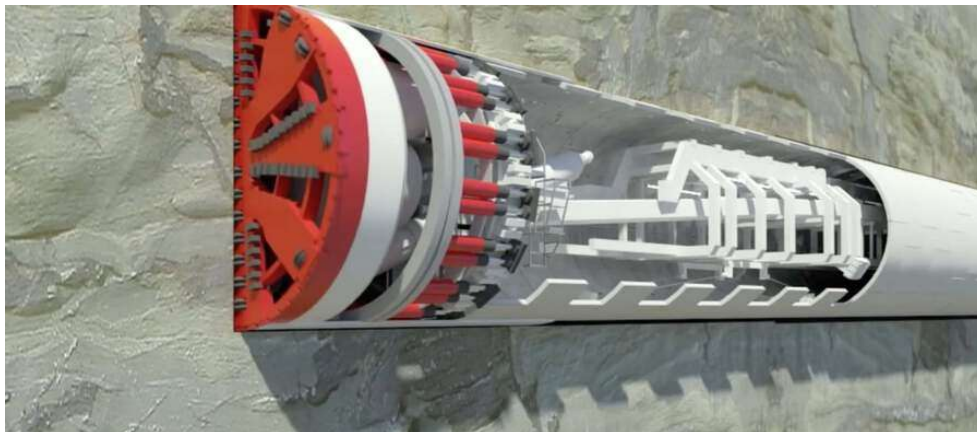
Podle způsobu výstavby se tunely dělí na:

- ražené,
- hloubené,
- budované zvláštními způsoby.



Obr. 1 Hloubený tunel Zvěrotice [7]

Hloubené tunely mají často pravouhlý průřez, oproti tomu ražené tunely mají pouze klenutý průřez, plocha průřezu je navíc omezena velikostí razícího štítu.[8, 9]



Obr. 2 Ražení tunelu technologií TBM [6]

## 2.1 Terminologie

**Ražené tunely** – tunely, jejichž výstavba se provádí ražením bez odstranění nadloží tunelu.

**Hloubené tunely** – tunely budované s dočasným odstraněním nadloží nad tunelem nebo budované na povrchu a dodatečně zasypány.

**Tunelová trouba** – část tunelu, vymezena portály pozemního či železničního tunelu.

**Portál tunelu** – část tunelu ohraničující zvnějšku tunelovou troubu. Utváří tak vjezdový, výjezdový otvor tunelové trouby a prostor kolem něj.

**Délka tunelu** – je vzdálenost mezi vnějšími lící obou tunelových portálů, měřená v ose tunelové trouby v úrovni nivelety.

**Tunelová propojka** – průchod či průjezd mezi zpravidla jednosměrnými tunelovými troubami, aby sousední tunelová trouba sloužila jako požárně bezpečný prostor.

**Technologické vybavení tunelu** – vybavení tunelu sloužící ke zvýšení bezpečnosti a ochrany zdraví účastníků provozu i pracovníků provozovatele, bezpečnosti a plynulosti provozu a k zabezpečení odpovídajících podmínek pro výkon obsluhy a údržby pracovníků provozovatele.

**Řídicí systém** – Tunelový řídicí systém zajišťuje úplnou kontrolu nad technologickým vybavením tunelu a umožňuje komunikaci s řidiči v reálném čase. Systém monitoruje klíčové fyzikální veličiny, jako je koncentrace oxidu uhelnatého, rychlost vzduchu, teplo-ta a tlaková diference na ventilátorech, aby zajistil maximální bezpečnost. Ústřední dispečink je vybaven vizualizačním systémem a archivuje měřená data. Tunelový informační systém s proměnným dopravním značením a návěstidly je propojen s řídicím centrem.

**Režim řídicího systému** – Jedná se o soubor opatření v řídicím systému, které reagují na různé situace v tunelu, jako je doprava, údržba technologií a kontrola technologií, aby zajistily správné fungování a bezpečnost provozu.

**Kamerový systém** – Videodetekční systém se používá k rozpoznání výstražných tabulek na vozidlech, která převážejí nebezpečný náklad dle dohody ADR. Obrazová data jsou převedena na text, aby se určil druh nebezpečí a charakter přepravované látky. Tato informace pomůže řídicím pracovníkům a záchranným složkám v případě nehody

**SOS kabinky** – SOS skříně jsou určeny pro veřejnost a slouží jako nouzová linka pro přivolání pomoci. Tyto skříně mají žáruvzdornou konstrukci a obsahují oboustranné



komunikační zařízení, které umožňuje spojení s dispečinkem. Kromě toho jsou vybaveny základními prostředky pro první pomoc a technologiemi potřebnými pro zdravotnické, požární a záchranářské účely. [9]

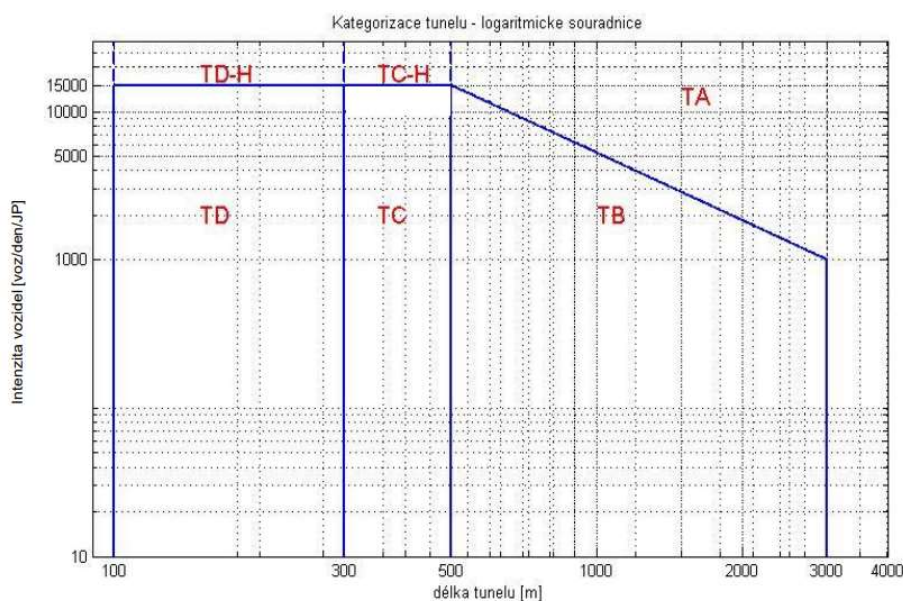
## 2.2 Silniční tunely

Silniční tunely jsou důležitou součástí silniční sítě a slouží k zvýšení přepravní kapacity a zkrácení cesty a doby přejezdu. Vzhledem k tomu, že řidiči najednou přecházejí do neznámého a omezeného prostředí, jsou tunely považovány za nejslabší článek pozemních komunikací z hlediska bezpečnosti. Někteří řidiči mohou pociťovat stres z klaustrofobie, což ovlivňuje jejich vnímání rychlosti, a v případě dlouhých tunelů je okolí jedno-tvárné a řidiči mohou ztrácet pozornost.

Bezpečnostní požadavky na tunely jsou vysoké a musí být splněny po celou dobu jejich životnosti, aby umožnily bezpečnou a plynulou jízdu a zabezpečily bezpečnost obsluhy. Tím se snižuje nutnost údržby během provozu. Tunely se obvykle dělí podle délky na krátké (do 300 m), střední (300-1000 m) a dlouhé (delší než 1000 m). Podle typu provozu můžeme tunely rozdělit na jednosměrné a obousměrné.[8]

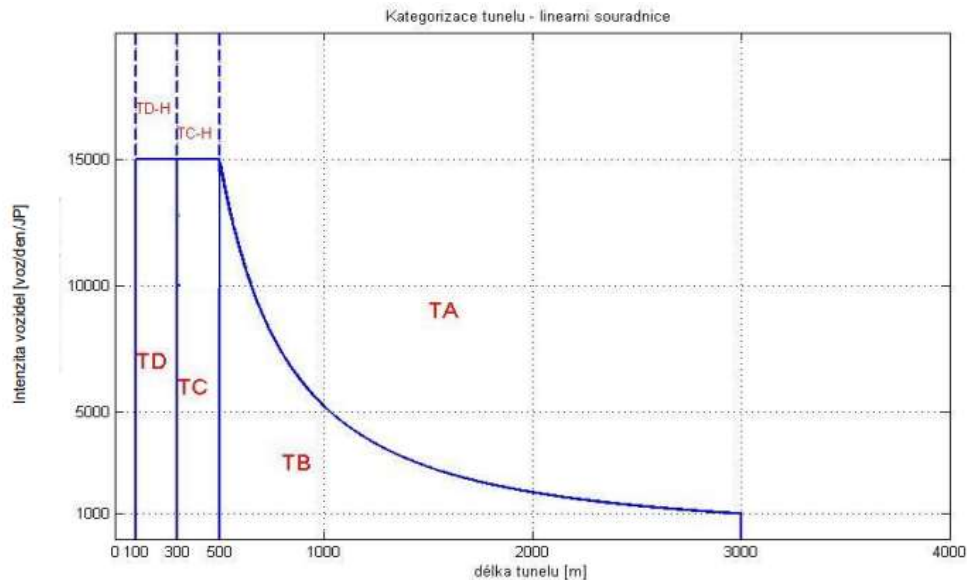
Pro projektování tunelů pozemních komunikací se používají dva hlavní dokumenty: ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací a technické podmínky TP 98 Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací. Následné provozování tunelu má vliv nejen na dopravní charakteristiky tunelu, ale také na provozní náklady a zásadním způsobem ovlivňuje bezpečnost účastníků silničního provozu. Cílem technických podmínek je stanovit zásady pro provozování, správu a údržbu tunelu. [10]

Tunely jsou považovány za prostředí s větším rizikem požáru a jsou rozděleny do čtyř kategorií – TA, TB, TC, TD a dvou podkategorií TC-H a TD-H – podle délky tunelu a provozní intenzity. Pokud je očekávána denní intenzita provozu větší než 15 000 vozidel, tunel bude kategorizován podle délky jako TD-H (100-300 m), TC-H (300-500 m) nebo TA (500-10 000 m). Tunely musí být navrženy tak, aby zajistily bezpečnost provozu a minimalizovaly potřebu údržby v průběhu svého provozu.[11]



Obr. 3 Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (lineární měřítko) [11]





Obr. 4 Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (logaritmické měřítko)  
[11]

## 2.3 Železniční tunely

Kvůli velké koncentraci osob v malém prostoru a zhoršeným podmínkám pro zásah při nehodě v tunelu, je důležité se zabývat bezpečností železničních tunelů. Tunely mohou být rozděleny podle délky a charakteristiky provozu, podle vyhlášky č. 246/2001 Sb. jsou tunely, jejichž délka přesahuje 350 m, klasifikovány jako objekty se složitými podmínkami pro zásah. Pro tyto tunely je nezbytné vypracovat dokumentaci pro zvládnutí požáru, která usnadní práci záchranným složkám při likvidaci požáru.[12] V České republice je průměrná délka železničních tunelů cca 330 m a pouze deset tunelů překračuje délku 1 km. Je tedy nutné se inspirovat zkušenostmi jiných zemí a přizpůsobit naše předpisy, aby se minimalizovaly nedostatky v provozu. Nejdelším tunelem v ČR je Ejpovický tunel, jehož provozní délka činí 4150 m.

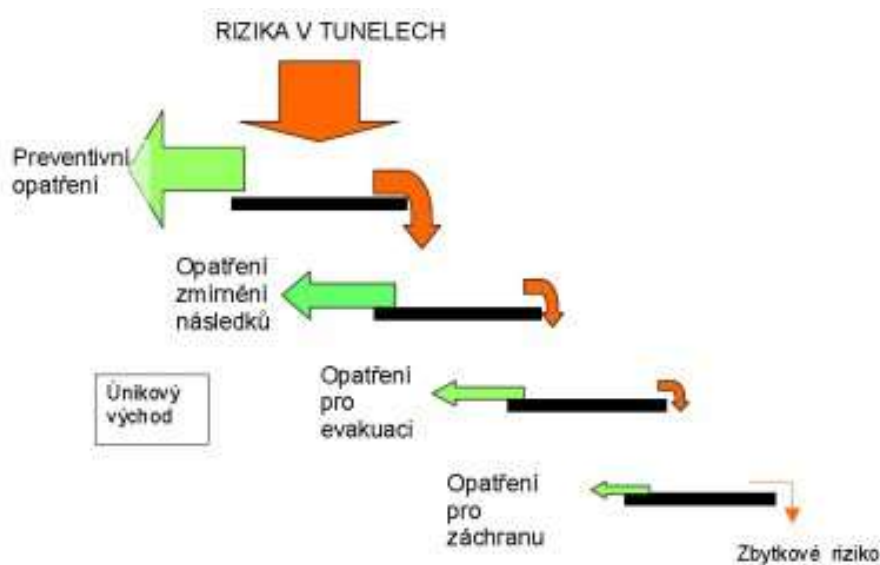
Bezpečnostní koncepce se obvykle zpracovává s ohledem na pravděpodobnost vzniku mimořádné události v tunelu a s předpokladem, že k ní dříve či později dojde. U kratších tunelů do 350 m se nepředpokládá nutnost dodatečných bezpečnostních opatření, ale u tunelů nad 1 km se pravděpodobnost nehody mírně zvyšuje a klesá pravděpodobnost možné sebezáchrany. Směrnice obvykle pokrývají tunely délek od 1 km do 20 km. Každá bezpečnostní koncepce by měla zahrnovat opatření pro zabránění nehod, opatření pro zmírnění následků, opatření pro záchranu vlastními silami a opatření pro umožnění záchrany IZS. Kombinace dodatečných prvků vybavení tunelů závisí přede-vším na délce tunelu. V rámci zpracování ČSN 73 7508 „Železniční tunely“ je zakotvena zásada vypracování koncepce a projektu požárně bezpečnostního řešení pro každý tunel individuálně, na základě analýzy podmínek tunelové stavby. Cílem bezpečnostní koncepce je minimalizace pravděpodobnosti nehod a zajištění rychlého zásahu v případě krizové situace s cílem minimalizovat následky na lidských životech a majetku.[13]

**Technické specifikace interoperability** – „Bezpečnost v železničních tunelech“ (TSI SRT) [14]. Evropská komise zadala zpracování Technické specifikace interoperability (TSI) týkající se bezpečnosti v železničních tunelech, aby se zajistila



technická propojenost železničních systémů v EU a zvýšila konkurenceschopnost železniční dopravy. TSI SRT byly schváleny v polovině roku 2006 a jsou pro železnice v EU závazné, včetně všech koridorových tratí v České republice. V současné době neexistuje specifický právní předpis v České republice týkající se bezpečnosti železničních tunelů, a vzhledem k zavedeným TSI se nepředpokládá jeho vytvoření.

**Norma ČSN 73 7508 „Železniční tunely“** [15] - Tento základní předpis se obecně týká projektování a výstavby ražených a hloubených tunelů s železniční tratí rychlostí do 160 km/hod a kolejovým rozchodem 1,435 m. Norma také slouží pro rekonstrukce, opravy a údržbu stávajících tunelů. V normě je zakotvena zásada vypracování koncepce požárně-bezpečnostního řešení a projektu PBŘ pro každý tunel individuálně, na základě podrobné analýzy podmínek tunelové stavby. Koncepce PBŘ je součástí dokumentace k územnímu řízení a PBŘ tunelového objektu je součástí projektu stavby.



Obr. 5 Schéma řešení bezpečnostní koncepce [14]

## 2.4 Konstrukce tunelů

Nejpoužívanější metodou při realizaci nových tunelů v ČR je ražení konvekčními tunelovacími metodami. Hlavními částmi zajišťující stabilitu výrubu jsou primární a sekundární (definitivní) ostění.

Nejčastějším materiálem pro primární ostění tunelu je vrstva stříkaného betonu, která je vyztužena sítěmi a rámy, nebo pouze drátkobetonem. Primární ostění má hlavní úlohu zajistit stabilitu výrubu až do doby, než je provedeno definitivní ostění. Spolupůsobení mezi oběma typy ostění, životnost jednotlivých prvků ostění a systému ostění-hornina jako celku mají zásadní vliv na dimenzování definitivního ostění a tím i na celkové investiční náklady. Nejčastěji se používá beton ve třech základních formách – monolitický beton, stříkaný beton, prefabrikovaný beton. Ve všech případech může být beton prostý (nevyztužený) nebo železobeton (vyztužený). Standartně se tloušťka ostění pohybuje v rozmezí od 300 do 800 mm. Při zvýšených teplotách dochází k degradaci tunelového ostění. Odštěpování betonu je proces, který je silně ovlivněn teplotním gradientem, vlhkostí betonu a přítomností pórů. Při



teplotě nad 100 °C dochází k odpařování vody, která se přemění na vodní páru s mnohem větším objemem než voda sama, což vede k odprýsknutí betonu (tj. odštěpení). Při ještě vyšších teplotách (400–600 °C) dochází k chemickým transformacím v betonové směsi, které mohou vést k tvorbě vody nebo plynu, což způsobuje další drolení betonu způsobené zvýšením objemu. Teplota a vnitřní napětí také mohou přispět k dalšímu odštěpení betonu. Výztuže umístěné blízko povrchu jsou vystaveny vysokým teplotám z důvodu ztráty krycí vrstvy a tím ztrácí svou nosnost. Aby stabilita ocelové výztuže nebyla ovlivněna, je nutné udržovat teplotu na povrchu pod 300 °C. Výše uvedené jevy představují vysoké riziko jak pro poškození ostění, tak především pro ohrožení života osob. V některých případech dochází k odštěpování betonu již po několika minutách od začátku požáru, kdy se vytváří vysoký teplotní gradient, a obvykle probíhá během prvních 20 minut. Přesto, že většina normových teplotních křivek pro požáry v tunelech neobsahuje fázi ochlazování, tak lze očekávat další nárůst napětí v konstrukci, což může vést k celkové nestabilitě konstrukce. [16]



Obr. 6 Silniční tunel Strenger s ostěním z monolitického betonu [17]



### 3. POŽÁRNÍ BEZPEČNOST V TUNELECH

V dopravních systémech jsou tunely kritickými místy, kde mohou snadno nastat dopravní nehody se zraněním nebo úmrtím osob, exploze, požáry a úniky nebezpečných látek.

V Evropské unii existují tři základní dokumenty týkající se bezpečnosti silničního provozu v tunelech. Jedná se o Vídeňskou úmluvu o silniční dopravě, Evropskou dohodu o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) a směrnici Evropského parlamentu a Rady 2004/54/ES o minimálních bezpečnostních požadavcích na tunely transevropské silniční sítě. Kromě toho může mít každá země své vlastní směrnice týkající se navrhování a výstavby silničních tunelů a zajištění odpovídající úrovně bezpečnosti v nich. Obsahem dohody ADR jsou informace o klasifikaci vozidel přepravujících nebezpečné věci, jakož i požadavky na vybavení a konstrukci těchto vozidel. Samotná vozidla musí být řádně označena tabulkami informujícími o druhu nebezpečí a identifikačních číslech přepravovaného nákladu. Podle dohody ADR existuje pět kategorií tunelů. Jsou označeny písmeny A, B, C, D a E, přičemž písmeno A označuje tunely bez omezení přepravy nebezpečných věcí a písmeno E tunely s nejpřísnějšími požadavky. Definice kategorie tunelů vychází ze zvážení tří hlavních nebezpečí – výbuchu, úniku toxické látky nebo požáru, které mohou způsobit poškození osob nebo vážné poškození tunelu. Kategorie tunelů se mohou měnit v závislosti na denní době nebo dni v týdnu.[18]

Klíčovým aspektem při požárech v tunelech je tzv. zpětná radiace. Tento jev nastává, když se hromadí horký kouř pod stropem tunelu, což vede k intenzivnější radiaci tepla na dopravní prostředky uvnitř tunelu ve srovnání s požárem ve volném prostoru. V důsledku toho může docházet k rychlejšímu a intenzivnějšímu hoření vozidel. Studie uvádějí, že tepelný výkon může být až čtyřikrát vyšší než v případě požárů na otevřeném prostranství. Kromě toho, hoření materiálů, zejména plastů, může vést k uvolňování velkých množství toxických plynů.

Dalším důležitým faktorem je, že vysoké teploty a množství uvolněného kouře mohou způsobit změnu směru proudění vzduchu v tunelu, což se odborně označuje jako „backlayering“. Tento jev může mít významný dopad na bezpečnost a účinnost záchranných a evakuačních operací v tunelu.[19]

Z hlediska požární bezpečnosti v ČR jsou požární úseky v silničních tunelech zařazeny do V. stupně požární bezpečnosti pro krátké tunely (viz kapitola 2.2) nebo do VII. stupně požární bezpečnosti pro střední a dlouhé tunely. Tunely, které procházejí pod zástavbou nebo pod vodním tokem a jsou delší než 500 m, spadají do VII. stupně požární bezpečnosti, což je vyžadováno nařízením vlády č. 264/2009 o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací delších než 500 m. Požární odolnost stavebních konstrukcí je stanovena podle ČSN 73 0804 v tabulce 10. Například pro nosné konstrukce tunelů v V. stupni požární bezpečnosti je požadovaná požární odolnost R 90 DP1 a VII. stupni požární bezpečnosti je požadovaná požární odolnost R 180 DP1. Pro ověření této odolnosti se používá normová teplotní křivka, která má teplotu 1110 °C ve 180. minutě po pozvolném zahřívání. Pro dimenzování větrání se předpokládá požár jednoho nákladního automobilu o výkonu 20 nebo 30–50 MW, v závislosti na podílu nákladních vozidel v předpokládané intenzitě dopravy. [11]

Při navrhování tunelů v České republice je běžně využívána normovaná teplotní křivka (ISO 834) jako základní požární scénář. Tato křivka ale popisuje zejména požár

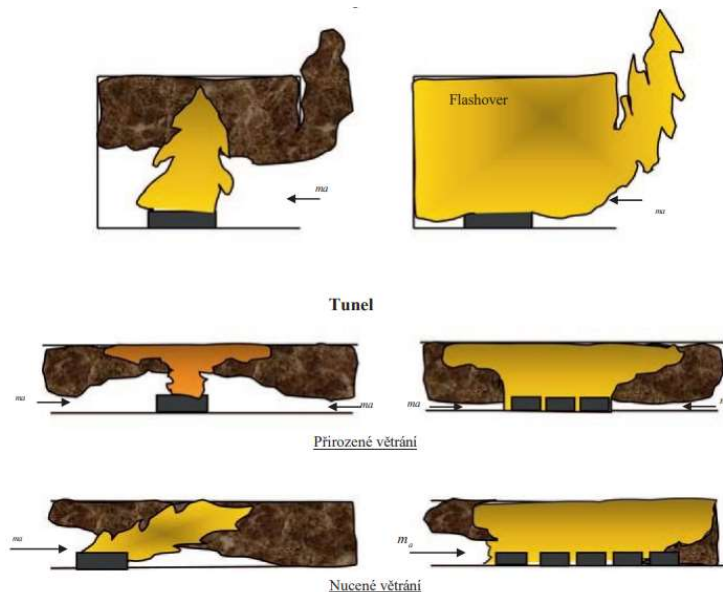


v budovách. V tunelech ale dochází k výrazně většímu teplotnímu gradientu a celkovým teplotám. I přesto se normová teplotní křivka používá i pro tunely, kterými mohou projíždět nákladní vozidla s nebezpečným nákladem nebo které vedou pod zastavěnou oblastí. Při posuzování bezpečnosti a odolnosti tunelových konstrukcí je důležité zvážit různé mezinárodní normy a postupy. V Rakousku a Nizozemsku se například používá teplotní křivka RWS, která je přísnější normová teplotní křivka. V Německu jsou tunely hodnoceny podle specifických křivek RABT car nebo RABT train, v závislosti na tom, zda se jedná o silniční nebo železniční tunel. Ve Francii byla po tragickém požáru v tunelu Mont Blanc v roce 1999 zavedena nová teplotní křivka HCM, která reflektuje poznatky z tohoto incidentu.[20, 21]

Pro tunelové požáry je důležité pochopit, že tyto požáry jsou primárně řízeny palivem, protože přístup vzduchu obvykle není významně omezen. Tunely typicky disponují několika vstupy a výstupy, což z nich činí efektivní kanály pro průchod vzduchu, zejména v případě absence mechanické ventilace. V případě požáru je hoření podporováno vzduchem, který je do tunelu přiváděn v důsledku tlakových rozdílů mezi požárními zplodinami a okolní atmosférou, a také díky rozdílům v tlaku mezi jednotlivými porty.

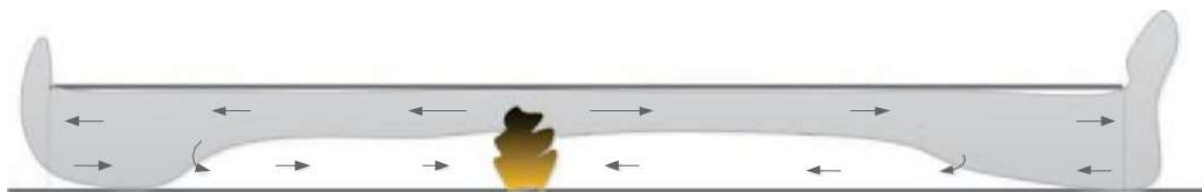
V situacích závažných požárů, jako jsou ty, které se udály například v tunelu Mont Blanc, kde bylo zapojeno více vozidel, může být přívod vzduchu nedostatečný pro udržení plného hoření. Tato situace může vést k významnému nárůstu produkce oxidu uhelnatého (CO) a spotřebování veškerého kyslíku (O<sub>2</sub>) přiváděného k ohništi. Takový scénář je pravděpodobnější v případě požárů zahrnujících více vozidel, než když hoří pouze jedno vozidlo. Klíčovým aspektem v těchto velkých požárech je způsob, jakým je vzduch přiváděn k ohnisku požáru. V případě, že mezi hořícími vozidly je zajištěn dostatečný přívod čerstvého vzduchu, oheň bude pokračovat, dokud bude dostupný dostatek kyslíku. U tunelů s podélným větráním, kde je vzduch přiváděn z jednoho směru, je možné odhadnout, kolik vzduchu je potřeba pro udržení plného hoření. Analýza velkých požárů, jako jsou ty v Mont Blancu, ukazuje, že při rozsáhlých požárech, kde je zasaženo mnoho velkých vozidel, je důležité správně odhadnout dynamiku hoření a přívod vzduchu pro efektivní řešení situace jak ukazuje Obr. 7.[1]

V posledních letech byla rozvinuta komplexní teorie dynamiky požárů v tunelech, zejména pro tunely s podélným prouděním vzduchu, kde je možné vypočítat parametry jako teplotní vývoj, délku plamene, viditelnost a koncentraci plynů. Tato teorie je aplikovatelná i na tunely s příčným větráním, s určitými úpravami. Požár v tunelu vede k vzniku vztlakových sil, které způsobují šíření horkých plynů podél stropu, přičemž rychlost proudění vzduchu ovlivňuje mísení kouře a studeného vzduchu. Průkopníkem v oblasti výzkumu tunelových požárů byl Thomas (1958), který zavedl koncept kritické rychlosti proudění vzduchu potřebného k zabránění zpětnému šíření tepla proti proudění vzduchu, obvykle kolem 3 m/s pro většinu tunelů.[22]



Obr. 7 Požáry řízené palivem (vlevo) a řízené ventilací v tunelu (vpravo) [20]

Vzplanutí (flashover) je rychlý přechod do stavu, kdy se všechny hořlavé materiály v prostoru zapojují do hoření. Požáry v uzavřených prostorech mohou rychle dosáhnout stavu flashover, avšak v tunelech se běžné vzplanutí pravděpodobně nevyskytne kvůli velkým tepelným ztrátám, nedostatku paliva v poměru k objemu a rozprouštění horkých zplodin. Nicméně, vzplanutí může snadno nastat v prostoru vlaku nebo nákladního automobilu v tunelu, ale ne v celém tunelovém prostoru. [1]



Obr. 8 Rozvrstvení kouře při požáru v tunelu s nízkou ventilací [1]

### 3.1 Historie požárů v silničních tunelech

Kritické události, které vyžadují hodnocení úrovně bezpečnosti tunelu, se vyskytují obvykle s nízkou pravděpodobností, ale mají vážné následky. Mezi typické kritické události v tunelu patří: [23]

- kolize nebo jiné události, které mohou způsobit požár
- srážky nebo jiné události, při kterých se uvolňují hořlavé kapaliny
- deflagrace, detonace
- únik toxických nebo jiných nebezpečných látek.

Po analýze požárů silničních vozidel je zřejmé, že největší škody na konstrukci tunelu a nejvyšší počet obětí jsou způsobeny požáry těžkých nákladních vozidel (HGV). Výjimkou jsou vozy přepravující nebezpečné věci, které se zřídka účastní velkých



nehod, zřejmě díky bezpečnostnímu vzdělávání řidičů a pravidelné údržbě vozidel. Komodity přepravované běžnými nákladními vozidly mají stejný potenciál způsobit katastrofální požár jako přeprava nebezpečného zboží s benzínem nebo naftou v tunelu. Tyto skutečnosti byly jasně demonstrovány během požárních zkoušek v tunelu Runehamar v roce 2003. [1]

Tab. 1 Seznam klíčových požárů v silničních tunelech, které vedly k úmrtí osob

Rok	Délka tunelu	Umístění	Příčina požáru	Trvání	Důsledky		
					Osoby	Vozidla	Konstrukce
1968	L = 243 m	Hamburk, Německo	zahoření brzd	1h 30min	žádný	1 HGV	Vážné poškození 34 m
1976	L = 430 m	Paříž, Francie	-	1h	12 z	1 HGV	Poškození 150 m
1978	L = 770 m	Velsen, Nizozemsko	Náraz	1h 20min	5 u 5 z	2 HGV 4 auta	Vážné poškození 30 m
1982	L = 1083 m	Oakland, USA	Náraz	2h 40min	7 u 2 z	3 HGV 1 BUS 4 auta	Vážné poškození, 580 m
1999	L = 11,6 km	Mont Blanc	-	53h	39 u 14 z	23 HGV 9 aut	Vážné poškození 900 m
2007	L = 3400 m	Austrálie	Náraz	1h	3 u 2 z	3 HGV 4 auta	Použití protipožárního systému, bez poškození
2011	L = 7230 m	Norsko	Zahoření motoru	<1h	4 z	1 HGV	Poškození ostění tunelu
2011	L = 7230 m	Norsko	Zahoření motoru	<1h	12 z	1 HGV	Poškození ostění tunelu
2014		Yanhou, Čína	Náraz		31 u 42 z	1 HGV 1 cisterna	

Pozn.: u – úmrtí, z – zranění

### 3.2 Historie požárů v železničních tunelech

Jak je známo, požáry v kolejových vozidlech představují značné nebezpečí pro cestující. Riziko rozšíření požáru je však relativně malé, pokud se počáteční ohnisko v určité části vlaku, například v jednom z vagonů, nerozšíří do rozsáhlého požáru typu flashover. Rozvoj požáru v konkrétním vagonu je ovlivněn mnoha faktory, včetně zatížení palivem, podmínkami ventilace (například otevřené dveře nebo okna) a velikostí požárního zdroje. Pokud dojde ke vzplanutí, existuje riziko, že se požár rozšíří do dalších vagonů, což může mít zničující následky, jak ukazují případy uvedeny v Tab. 2 a Tab. 3. U jiných typů kolejových vozidel, jako jsou nákladní vlaky, představují nebezpečí zejména ty, které přepravují cisterny s palivem nebo vysoce hořlavý materiál. V těchto případech může dojít k rozsáhlému poškození tunelové konstrukce, což je podobné riziku u požárů v silničních tunelech, jak ukazují příklady z Tab. 1. Naopak požáry v osobních vlacích obvykle nezpůsobují tak velké poškození konstrukce tunelu, ale mohou mít fatální dopady na životy cestujících.

Podle Tab. 3, která poskytuje přehled hlavních událostí v tunelech metra, je zřejmé, že požáry způsobené elektrickými závadami jsou hlavní příčinou. V porovnání s požáry na železnici mají požáry v metru větší dopad na úmrtnost. Zvláštní pozornost si vyžadují žhářské požáry, které jsou sice vzácné, ale málokdy se obejdou bez katastrofických následků. To je způsobeno především omezeným prostorem tunelu a vysokou koncentrací cestujících ve vlacích a na nástupištích. Vzhledem k rostoucí



složitosti systémů metra a jejich konstrukci na několika úrovních bude požární bezpečnost vyžadovat v budoucnu ještě větší pozornost.[1]

Tab. 2 Seznam klíčových požárů v železničních tunelech

Rok	Délka tunelu	Umístění	Příčina požáru	Důsledky	
				Osoby	Konstrukce
2008	L = 51 km	Tunel pod Lamanšským průlivem	Požár nákladního vagónu		Poškození 650 m
2000	L = 3,3 km	Kitzsteinhorn	Únik hydraulického oleje do elektrického ohříváče	155 u	
1999	L = 9 km	Salerno	Žhářství	4 u 9 z	
1998	L = 0,8 km	Guizhou Chaoyangba	Únik plynu	6 u 20 z	
1996	L = 51 km	Tunel pod Lamanšským průlivem	Žhářství	34 u	Poškození konstrukce
1991	L = 14,3 km	Tunel Dayaoshan	Nedopalek od cigarety	12 u 20 z	

Pozn.: u – úmrtí, z – zranění

Tab. 3 Seznam klíčových požárů v tunelech metra

Rok	Metro	Umístění	Příčina požáru	Důsledky	
				Osoby	Konstrukce
2003	Metro Jungangno	Ve vlaku	Žhářství	198 u 146 z	
1995	Metro v Baku	Ve vlaku	Elektrická závada	289 u 265 z	
1991	Moskevské metro	Spodní část vlaku	Elektrická závada	7 u 10+ z	
1990	Metro v New Yorku	Ve vlaku	Kabelové vedení	2 u 200 z	
1987	Stanice King Cross		Cigareta	31 m	
2003	Metro Jungangno	Ve vlaku	Žhářství	198 u 146 z	

Pozn.: u – úmrtí, z – zranění

### 3.3 Srovnání bezpečnosti v silničních a železničních tunelech

Charakteristika silničních a železničních tunelů se liší v mnoha aspektech, zejména technologickými požadavky, které jsou určeny různému typu provozu, intenzitou dopravy, délkou tunelu a počtem jízdních pruhů či kolejí.

Jedním z hlavních rozdílů mezi provozem v silničních a železničních tunelech je způsob řízení dopravy. V případě železniční dopravy je každý vlak pod pečlivým dohledem centrálního dispečera a přednosta stanice, což umožňuje přesné monitorování a řízení pohybu vlaků. Naopak, situace v silničních tunelech je mnohem





více náhodná a méně předvídatelná, což vyžaduje rychlou reakci a koordinaci v případě neobvyklých situací. V takových případech jsou informace o incidentech předávány orgánům integrovaného záchranného systému (IZS) přímo od účastníků nehody.

Podle dat o mimořádných událostech získaných v České republice a ve Švédsku je zaznamenáno vyšší pravděpodobnost vzniku požáru v silničních tunelech ve srovnání s železničními. Kromě toho, požáry v silničních tunelech způsobují větší materiální škody, což je přičítáno vyšší hustotě a různorodosti vozidel. [21]

U železničních tunelů je pravděpodobnost, že dojde k nehodě, ať už srážky dvou vlaků nebo defektu na samotné vlakové soupravě, velmi malá.

*„Konkrétně pravděpodobnost vzniku nehody v tunelu je uvažována jako podmíněná pravděpodobností vzniku nehody na železniční trati (PN). Výslednou pravděpodobnost vzniku nehody v tunelu potom dostaneme ze vztahu:*

*$P_{VNT} = P_{NT} * P_N$ , kde  $P_N$  je pravděpodobnost vzniku nehody na železniční trati v síti ČD a  $P_{NT}$  = Celková délka žel. tunelů / Celková délka trati.*

*Výsledná pravděpodobnost vzniku nehody v železničním tunelu ČR  $P_{VNT} = 2,186 * 10^{-8}$  [24]*

### 3.3.1 Porovnání požadavků z hlediska bezpečnosti

Zde je popsáno shrnutí z norem ČSN 73 7507 [8] a ČSN 73 7508 [15], rozdíly na požadavky silničních a železničních tunelů z hlediska bezpečnosti.

#### a) Rozdělení podle délky

- silniční tunely – Krátké 100 – 500 m  
Střední 500 – 1000 m  
Dlouhé > 1000 m
- železniční tunely – podle délky se nerozdělují

Dalšími kritérii, které mají vliv na požární bezpečnost mohou být intenzita dopravy, druh provozu a způsob výstavby.

#### b) Únikové cesty

Požární uzávěry na únikových cestách musí splňovat požadavek EW 90 Sm – C DP1, u železničních tunelů není požadavek na kouřotěsnost)

Evakuační výtahy ve svislých záchranných cestách musí být zřízeny od výšky 15 m u silničních tunelů a od 30 m u železničních tunelů.

#### c) Bezpečnostní plochy

Přistávací plochy pro vrtulník se zřizují pouze u silničních tunelů středních a dlouhých, tedy pro tunely s délkou od 500 m.

#### d) Větrání tunelů

Nucené větrání se zřizuje pro silniční tunely od délky 500 m jako podélné, případně pro delší tunely i příčné (podle požadavků v PBŘ).

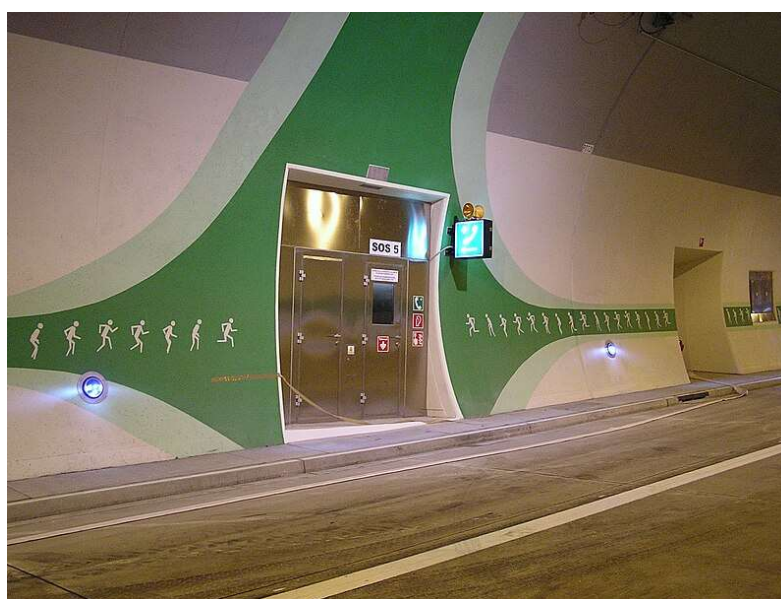
U železničních tunelů je požadavek na nucené větrání až od délky 1000 m.



Obr. 9 Podélně větrání tunelů [25]

#### e) SOS kabinky

Zřizují se po maximálně 150 m a u vstupů do záchranných cest a portálů, u železničních tunelů se zřizují v tzv. bezpečné oblasti)



Obr. 10 SOS kabinka v tunelu Valík [26]

#### f) Nouzový zvukový systém, videodohled (CCTV)

Požadován u silničních tunelů nad 500 m, CCTV od kategorie intenzity provozu TD-H, u železničních není požadován.



Obr. 11 Velkoplošný zobrazovací systém s monitory videodohledu

**g) Požární vodovod**

Pro silniční tunely delších než 300 m, v blízkosti portálů musí být odběrná místa. U železničních tunelů až od délky 500 m.

**h) Nouzové osvětlení**

Zřizuje se pro silniční tunely od délky 300 m a umožňuje plynulý a bezpečný provoz vozidel s omezenou rychlostí. U železničních pro tunely od 500 m.

**i) Přenosné hasící přístroje**

Minimálně 2 ks s hasící schopností 34A u každé SOS kabinky. Pro železniční tunely nejsou požadovány.

**j) Elektrická požární signalizace**

Identifikace požáru pomocí automatických, liniových a tlačítkových hlásičů požáru u tunelů o délky 300 m pro silniční provoz. Pro železniční tunely není požadován



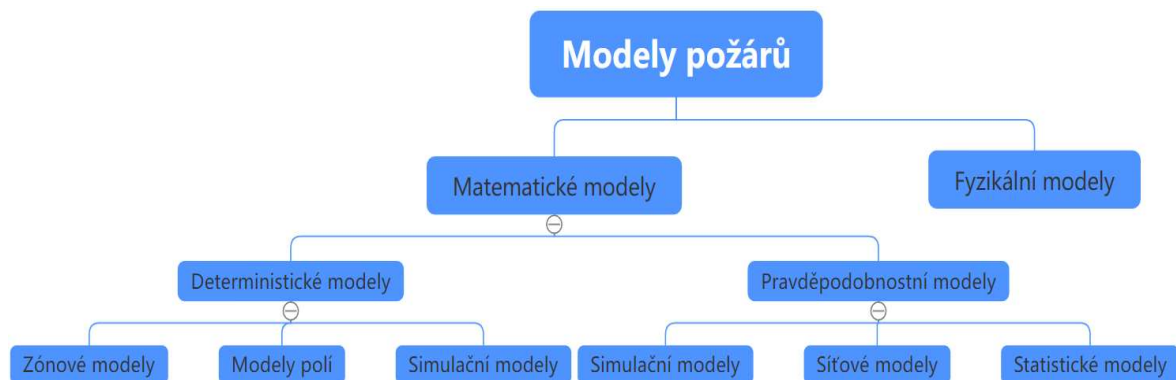
## 4. MODELÝ POŽÁRŮ

Pro stanovení teplot a dalších parametrů pro posouzení požární bezpečnosti v tunelových stavbách jsou matematické modely požáru nejvhodnější metodou. Modely požáru jsou dnes velmi přesné, i když CFD modely mají vysoké požadavky na hardware a čas výpočtu, jsou stále ekonomicky méně náročnější než reálné velkorozměrové zkoušky požárů v tunelech, hlavně z možného porušení konstrukce vlivem vysokých teplot.

Požár může být efektivně charakterizován a předpovídán prostřednictvím různých modelů, které jsou shrnuty v této kapitole. Přístup založený na modelování požáru umožňuje předpovídat různé aspekty požárních jevů, zejména v prostorech, což nám umožňuje lépe se přiblížit realitě. [27]

Základními typy požárních modelů jsou:[28]

- Fyzikální modely – tyto modely vycházejí z laboratorních experimentů a jsou zásadní pro pochopení základních principů požární dynamiky. Jejich aplikace se používá napříč mnoha inženýrskými obory, včetně hodnocení požární odolnosti materiálů v různých měřítkách.
- Matematické modely
  - Pravděpodobnostní – modely pracují na principu "pro stejné vstupy – různé výsledky", což umožňuje předpovídat různé scénáře požáru na základě stejných počátečních podmínek.
  - Deterministické – zde platí pravidlo "stejně vstupy – stejné výsledky". Deterministické modely používají matematické rovnice k popisu fyzikálních a chemických procesů, což vede k konzistentním výsledkům pro stejná vstupní data. Tento typ modelu se rozkládá od základních až po velmi složité, včetně známých zónových modelů a modelů CFD (Computational Fluid Dynamics).



Obr. 12 Rozdělení požárních modelů [28]

### 4.1 Fyzikální modely

Fyzikální modelování představuje klíčový přístup k pochopení principů dynamiky požáru a je základem pro řešení mnoha problémů v různých inženýrských oborech. Tato metoda zahrnuje využití postupů a jevů, které umožňují odvodit chování v reálném prostředí z malých laboratorních experimentů. Jako příklad lze uvést



testování požární odolnosti v požárních laboratořích, což je forma fyzikálního modelování. Tento proces může zahrnovat testy ve velkém nebo malém měřítku, případně použití určitých metod škálování.

## 4.2 Matematické deterministické modely

V dnešní době, kdy technologie neustále postupuje a používané materiály se stále zdokonalují, jsme svědky výstavby stále větších a architektonicky složitějších staveb. Tento trend nevyhnutelně vyvolává potřebu pokročilejších metod v oblasti požární ochrany. S rozvojem počítačových technologií se paralelně rozvíjí i software, který umožňuje efektivně a s vysokou mírou přesnosti modelovat různé scénáře, jako je šíření kouře a tepla v budově, chování lidí v případě požáru a jejich evakuace.

Matematické modelování se tak stává klíčovým prvkem nejen v procesu návrhu a ověřování požární bezpečnosti staveb, ale také při rekonstrukci požárních scénářů během vyšetřování příčin požárů. Jeho využití je široké, od administrativních budov, přes výrobní haly a rozsáhlá obchodní centra, až po dopravní infrastrukturu, včetně tunelů. Tato metoda nabízí mnohostranné využití a je klíčovým nástrojem pro zajištění bezpečnosti a prevenci požárů v moderní stavební praxi.

Je zásadní, aby každý matematický model prošel procesem ověření, tzv. verifikací. Tento krok zahrnuje potvrzení výsledků a kontrolu správnosti použitých algoritmů prostřednictvím zjednodušených manuálních výpočtů nebo porovnáním s výsledky získanými z jiných podobných výpočetních programů. Druhým klíčovým aspektem je validace, tedy prokázání, že výsledky modelu jsou věrohodné a odpovídají realitě. Je nezbytné, aby výsledky modelu byly konzistentní s daty získanými z reálných experimentů a testů.[29]

Pravděpodobnostní matematické modely se z hlediska modelování často nepoužívají, proto nejsou více rozebírány v této práci. [30]

### 4.2.1 Nominální teplotní křivky používané pro tunelové objekty

Fáze plně rozvinutého požáru, charakterizovaná rychlým nárůstem teplot, je obvykle reprezentována pomocí teplotně-časových křivek. Tyto nominální křivky se primárně využívají pro posouzení požární odolnosti stavebních konstrukcí.

V poslední době bylo provedeno několik mezinárodních studií s cílem identifikovat typy požárů, které mohou nastat v tunelech a podzemních prostorech. Z těchto výzkumů vyplynuly různé křivky zobrazující teplotní závislost na čase v rámci různých požárních scénářů.

Studie požárů v tunelech odhalily, že tyto požáry jsou často mnohem intenzivnější než požáry na otevřeném prostranství. Porovnáním hodnot rychlosti uvolňování tepla z různých scénářů (například vozidla, dřevěné kolébky, palivové nádrže) v otevřených a tunelových prostorách bylo zjištěno, že v tunelu může HRR vzrůst až čtyřnásobně.[31]



Standardizované časově-teplotní křivky pro návrh nosného systému tunelové stavby, jsou akceptovány většinou úřadů po celém světě. Výsledky jsou kriticky závislé na volbě časově-teplotní křivky. Při výběru různých křivek neexistuje jediný návod, který by se týkal toho, jak zvolit jednu křivku ve vztahu k HRR, rychlosti podélného větrání nebo výškám stropu ve srovnání s ostatními. Metoda je hrubá a normativní, a proto ji nelze použít pro návrh založený na výkonu. Vzhledem k této skutečnosti existuje jasná potřeba spolehlivého inženýrského postupu založeného na teoretické analýze, který dokáže předpovědět teplotu plynu v závislosti na geometrii tunelu, HRR a podmínkách ventilace.[3]

Tab. 5 Doporučené požární scénáře

Typ dopravního prostředku	Teplotní křivka	Doba vystavení požáru	Max. HRR
Osobní automobil	ISO 834, HC	30-60 min	5-10 MW
Nákladní automobil (HGV)	RWS, HC	120 min	200 MW
Autobus	HC	120 min	50 MW
Cisterna	RWS	120 min	300 MW
	HC	240 min	
Vlak	RWS	120 min	40 MW
		240 min	

Tab. 5 ukazuje vhodný typ teplotní křivky pro určitou dobu vystavení požáru jednotlivých dopravních prostředků podle organizace UPTUN. [38] Je zřejmé, že ve světě je nejpoužívanější křivkou uhlovodíková křivka a křivka RWS.

### Normová teplotní křivka – ISO 834

Standardní teplotní křivka, známá také jako "celulosová křivka", je široce aplikována při hodnocení požární odolnosti různých stavebních materiálů. Tento model je detailně popsán v Eurokódech, mezinárodních normách ISO 834, a také v různých národních normách, jako je například německá norma DIN 4102. Navzdory tomu, že se normová teplotní křivka charakterizuje pomalejším nárůstem teploty než ostatní tunelové křivky, stále v ČR používaná pro posouzení stavebních konstrukcí v tunelu.[31]

Normovou teplotní křivku lze vyjádřit rovnicí:

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



Tab. 6 Tabulkové vyjádření normové teplotní křivky

čas [min]	teplota [°C]	čas [min]	teplota [°C]
0	20	90	1006
5	576	120	1049
10	678	150	1082
15	738	180	1110
20	781	210	1133
30	842	240	1153
45	902	300	1186
60	945	360	1214

### Uhlovodíková křivka – HC

Po zavedení normové teplotní křivky se ukázalo, že některé materiály jako benzín, plyn, chemikálie atd., hoří při výrazně vyšších teplotách než klasické stavební materiály. Z tohoto důvodu bylo nutné vytvoření nové teplotní křivky pro zkoušení požární odolnosti stavebních konstrukcí a materiálů používaných v petrochemickém průmyslu, nazývaná uhlovodíková křivka (také označovaná zkratkou „HC“). Na začátku byla uhlovodíková křivka vyvíjena plynnými a ropnými společnostmi bez porovnání výsledků, což vedlo k drobným rozdílům.[31]

Dnes je teplotní vývoj křivky hoření uhlovodíků sjednocen a je popsán následující rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad (2)$$

Při porovnání s normovou teplotní křivkou se uhlovodíková teplotní křivka vyznačuje výrazně rychlejším teplotním nárůstem, který trvá až do třicáté minuty. Po této době se teplota stabilizuje na hodnotě přibližně 1100 °C a zůstává téměř konstantní. Je třeba poznamenat, že maximální dosažená teplota u uhlovodíkové křivky nemusí být vyšší než u normové teplotní křivky. Nicméně, největším nebezpečím pro konstrukce používané v tunelu je rychlost nárůstu teploty.

Další podobnou křivkou je křivka „HCM“ (uhlovodíková modifikovaná křivka), která se používá hlavně ve Francii od tragédie v tunelu Mont Blanc v roce 1999, při níž přišlo o život 39 lidí. Tato křivka byla navržena tak, aby ukazovala velmi rychlý nárůst teplot, ke kterému dochází, když požáry vypuknou ve stísněných prostorech, jako jsou tunely. Nyní se používá k certifikaci požární odolnosti stavebních materiálů, které budou použity v tunelech. Jen několik minut po vypuknutí požáru dosáhne teplota hodnoty až 1300 °C, která zůstává konstantní.[31]

Vývoj teploty v čase křivky HCM je popsán rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 1280(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad (3)$$



Tab. 7 Porovnání vývoje teplot uhlovodíkové a uhlovodíkové modifikované křivky

čas [min]	Teplota HC [°C]	Teplota HCM [°C]
3	887	1047
5	948	1120
10	1034	1222
30	1098	1297
60	1100	1300
90	1100	1300
120+	1100	1300

### RABT – ZTW křivka

Křivka RABT (také označována jako ZTV – ING) byla vytvořena v Německu v důsledku mnoha požárních zkoušek v tunelech, například v projektu Eureka. RABT křivka se vyznačuje velmi rychlým nárůstem teploty, která dosáhne až 1200 °C během 5 minut, což je rychlejší než uhlovodíková křivka, která dosáhne „pouze“ 1100 °C po 30 minutách. Doba vystavení teplotě 1200 °C je kratší než u ostatních křivek. Ve většině případů se začíná ochlazovat (teplotní spád) ve 30. minutě. Křivka RABT se používá v mnoha zemích k určení požární odolnosti tunelových konstrukcí.

RABT křivka může být přizpůsobena konkrétním bezpečnostním požadavkům. Při testování se teplota rychle zvyšuje, ale udržuje se pouze po dobu 30 nebo 60 minut. Tento nárůst teploty se přibližně shoduje s požárem jednoho nákladního vozidla, přičemž ochlazování trvá 110 minut. V případě potřeby lze dobu expozice při 1200 °C prodloužit na 60 minut nebo déle v závislosti na posouzení rizik, ale ochlazování zůstává stejné. V některých železničních tunelech se doba expozice prodlužuje na 60 minut a v některých silničních tunelech až na 120 minut, což se používá v Číně.

Je nezbytné zajistit, aby betonové povrchy, omítky a obklady deskami vydržely celou dobu trvání RABT-ZTV tunelové křivky, včetně fáze ochlazování, aby se předešlo pádu částí materiálu na dopravní plochy nebo do jiných oblastí, které jsou využívány osobami. Tím lze zabránit dalšímu ohrožení evakuovaných osob a záchranářského personálu. U jiných definovaných požárů v tunelech, např. HCM, není žádná fáze ochlazování popsána.[31]

### RWS křivka

Křivku RWS vyvinul nizozemský Rijkswaterstaat s ohledem na nejhorší možný scénář, při kterém dojde k požáru cisterny s topným olejem nebo benzínem s požárním zatížením 300 MW trvajícím až 120 minut. Křivka RWS byla založena na výsledcích testů provedených TNO v Nizozemsku v roce 1979. Křivka RWS se od křivky uhlovodíkové liší tím, že vychází z teplot očekávaných při požáru v uzavřeném prostoru, jako je například tunel, kde se teplo špatně rozptýluje. Křivka RWS simuluje rychlý nárůst teploty na začátku požáru při použití cisterny s ropou jako zdroje, následovaný postupným poklesem teploty, který lze očekávat při vyhoření palivové náplně.

Při testování stavebních konstrukcí podle křivky RWS jsou stanoveny přísné požadavky. Při použití protipožárních desek nesmí teplota na povrchu betonu



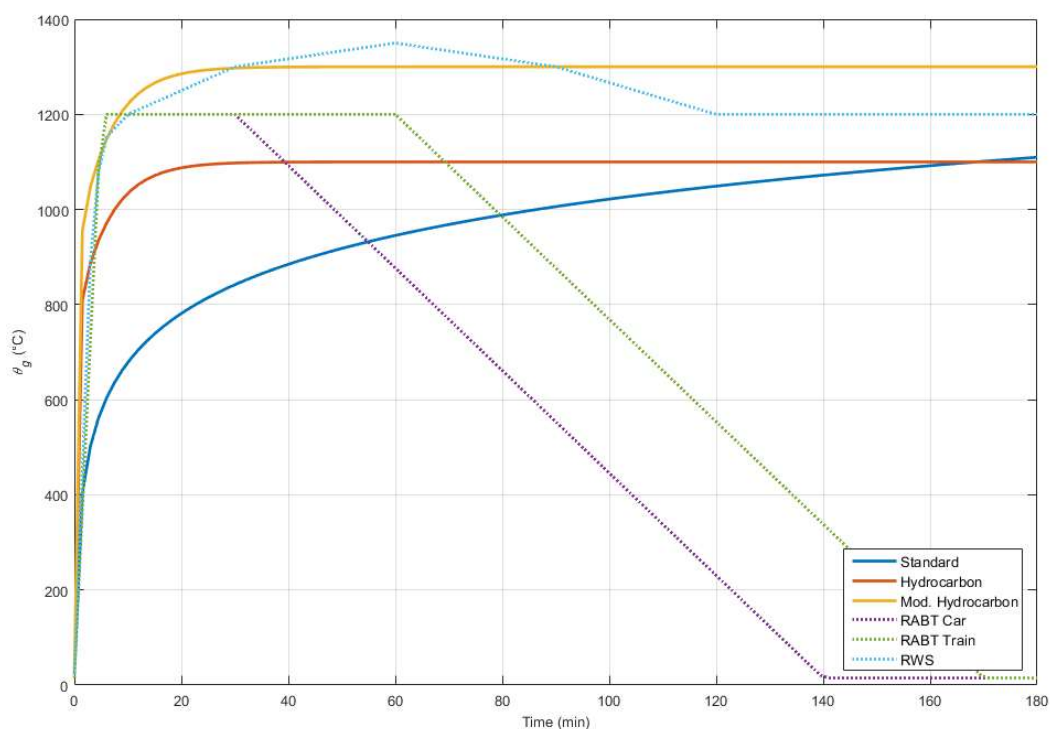


překročit 380 °C a na ocelové výztuži 250 °C. Pokud se jedná o vysokopevnostní beton, musí být teplota na povrchu omezena na maximum 250 °C. [31]

Tab. 8 Tabulkové vyjádření křivky RWS

čas [min]	teplota [°C]	čas [min]	teplota [°C]
3	890	60	1350
5	1140	90	1300
10	1200	120	1200
30	1300	120+	1200

I přesto že známe více možností, jak stanovit požadavky na požární bezpečnost tunelových objektů, tak pro stanovení požární odolnosti tunelových konstrukcí v ČR se stále používá normová teplotní křivka, i když při požáru nákladního automobilu v tunelu může teplota přesáhnout hodnoty normové teplotní křivky a teplotní gradient tohoto požáru může být mnohem větší. Normová teplotní křivka se používá i pro tunely, kterými mohou projíždět nákladní automobily s nebezpečným nákladem nebo které vedou pod zastavěnou oblast. Pro výpočet dimenzí větrání je předpokládán požár jednoho nákladního automobilu s výkonem 20 MW nebo 30-50 MW, což závisí na podílu nákladních vozidel v prognóze dopravní intenzity.[11]



Obr. 13 Teplotní křivky používané v tunelech (z programu FMC)



#### 4.2.2 Zjednodušené výpočtové modely

V oblasti požárních zkoušek se zaměřujeme na modelování buď celých stavebních konstrukcí nebo jen jejich částí. Tyto experimentální modely jsou často spojeny s vysokými náklady a jejich opakované provedení může být komplikované. V důsledku toho se výsledky získané z těchto fyzických modelů využívají k vytváření a validaci matematických modelů. Tyto matematické modely následně slouží jako efektivní nástroje pro ověřování teoretických předpokladů a pochopení dynamiky požáru. [40]

Zjednodušené požární modely jsou založeny na určitých fyzikálních faktorech a jsou vhodné pro omezené aplikace. Po dobu trvání požáru v požárních úsecích se předpokládá, že teploty se budou v průběhu času rovnoměrně měnit. Naopak, u požárů, které se vyskytují lokálně, se očekává, že rozložení teploty bude nerovnoměrné v závislosti na čase a bude se lišit v podle konkrétních podmínkách.[27] Zjednodušené modely požáru podle ČSN 1991-1-2: [28]

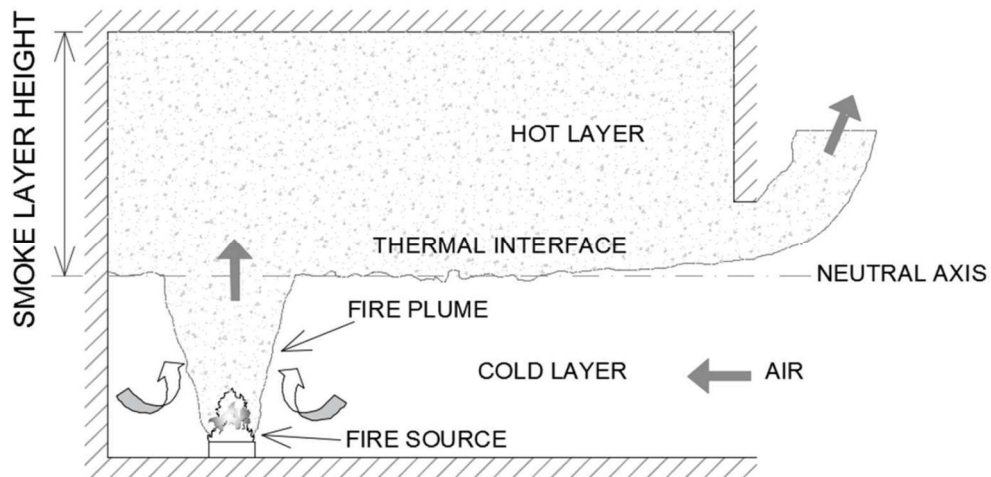
- parametrické teplotní křivky v závislosti na čase, příloha A,
- tepelné působení na vnější pruty – zjednodušené metody výpočtu, příloha B,
- lokální požáry, příloha C,
- hustota požárního zatížení, příloha E,
- rychlost uvolňování tepla, příloha E.

#### 4.2.3 Zpřesněné výpočtové modely

Zpřesněné požární modely zohledňují vlastnosti plynů, výměnu hmoty a energie.[28] Mezi zpřesněné modely patří:

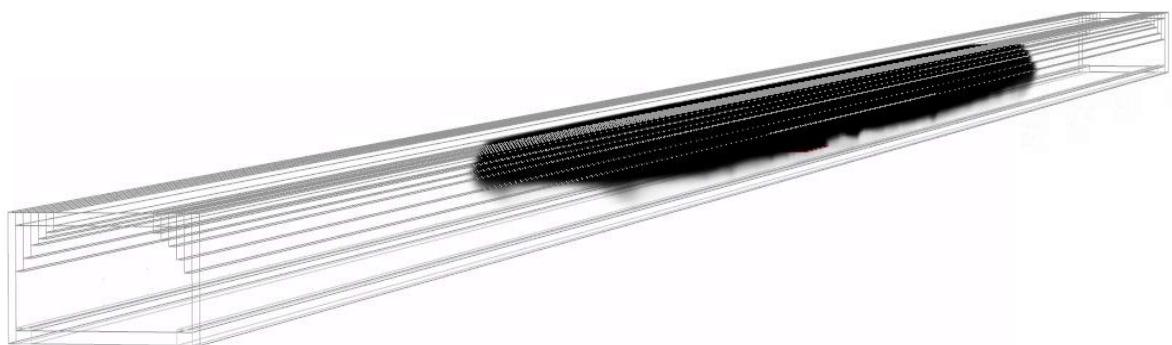
- jednozónové modely, který v požárním úseku předpokládá rovnoměrné rozložení tepla v závislosti na čase,
- dvouzónové modely, který předpokládá horní vrstvu s proměnnou tloušťkou a rovnoměrnou teplotou v závislosti na čase a spodní vrstvu s rovnoměrnou a nižší teplotou v závislosti na čase.

Zónové modely představují základní nástroj pro analyzování šíření zplodin hoření v uzavřených prostorách a popisují ideální průběh požáru. Tyto modely jsou založeny na empirických datech a fyzikálních jevů pozorovaných při reálných požárech. Jednozónový model předpokládá vznik flashoveru (vzplanutí), zatímco dvouzónový model rozděluje prostor na dvě odlišné zóny, jak je ilustrováno na Obr. 14. V případě, že teplota ve vrchní vrstvě přesáhne 500°C nebo se kouřová vrstva rozšíří na 80 % výšky prostoru, dvouzónový model přechází do jednozónového režimu. Dvouzónový model požáru rozděluje prostor na dvě homogenní oblasti s konzistentní hustotou, teplotou a koncentrací plynných látek. Dolní vrstva je ochlazována díky přívodu vzduchu, zatímco horní vrstva se ohřívá zplodinami hoření stoupajícími vzhůru, tvořícími takzvaný "fire plume". [28, 32, 33]



Obr. 14 Schematické znázornění předpokladu dvou vrstev při modelování zón [26]

Při numerických simulacích matematických modelů požáru se nejčastěji používají CFD techniky, které jsou považovány za nejdokonalejší dostupnou metodu. CFD modely využívají rozdělení vypočtené plochy na množství trojrozměrných buněk, tzv. řídicích objemů. Oproti zónovým modelům, které používají pouze dva kontrolní objemy, mají CFD modely několik kontrolních objemů. Základní rovnice jsou založeny na zachování hmoty, energie, hybnosti a složení částic, a to pomocí tzv. Navierovy-Stokesovy rovnice (N-S rovnic). Tyto N-S rovnice jsou trojrozměrné, časově závislé, nelineární parciální diferenciální rovnice, které zahrnují celou historii požáru a jeho lokální vývoj veličin. CFD modely mají obecné použití, avšak vyžadují vysoké hardwarové nároky a mnoho vstupních dat. Teploty v požárním úseku jsou časově a prostorově závislé. [28, 32, 34]



Obr. 15 Schématické znázornění zpřesněného modelu FDS

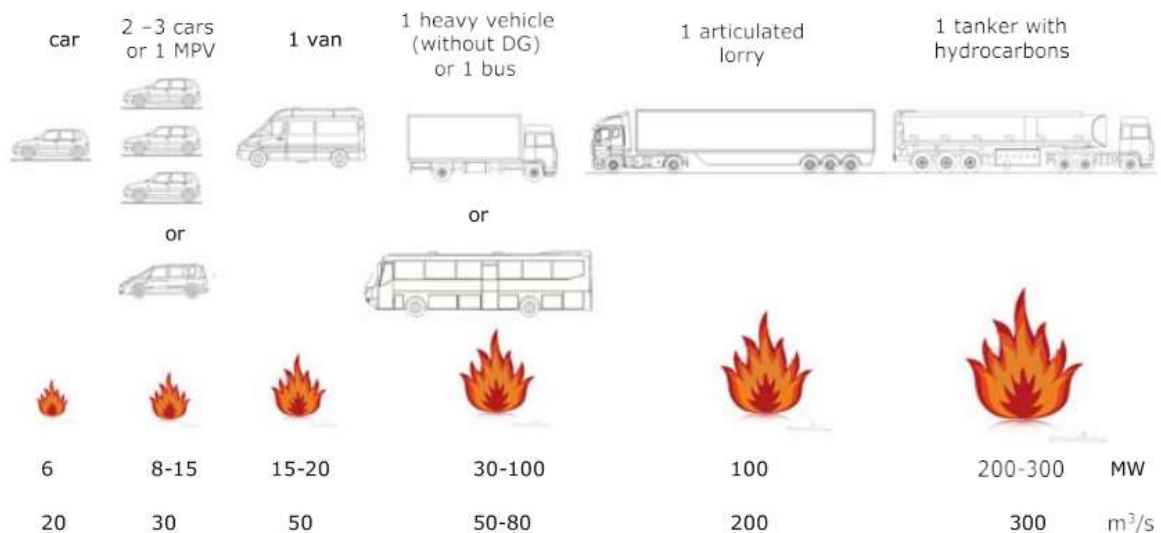
V Tab. 9 jsou popsány výhody a nevýhody použití různých přístupů k navrhování požární bezpečnosti. [35]



Tab. 9 Porovnání modelů požárů

Zjednodušené modely	Zónové modely	CFD modely
<b>Výhody</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metody uvedené v normách a předpisech</li> <li>• Nejrychlejší metoda návrhu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lze zakomponovat pravděpodobnost</li> <li>• Přesné vizualizace</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vytvoření přesného modelovacího prostoru</li> <li>• Množství a úroveň detailů</li> </ul>
<b>Nevýhody</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nevhodné do netypických prostor</li> <li>• Nepřesné výsledky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nelze simulovat turbulence vzduchu</li> <li>• Musí být ověřena správnost vstupních dat</li> <li>• Přesnější než zjednodušené model, ale méně než CFD modely</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Časová náročnost výpočtu</li> <li>• Množství vstupních dat</li> <li>• Musí být ověřena správnost vstupních dat</li> </ul>

#### 4.2.4 Rychlost uvolňování tepla



Obr. 16 Odhadovaná HRR a míra tvorby kouře v silničních tunelech [2]

Základní charakteristikou, která kvantitativně popisuje „velikost požáru“, je rychlost uvolňování tepla (HRR), která se v kontextu tunelu obvykle vyjadřuje v MW. Ačkoli se používaly teoretické odhady HRR, např. při vyšetřování požáru v tunelu Mont Blanc, nedávné diskuse o velikosti požáru jsou spojeny s rozsáhlými požárními zkouškami, kde se HRR získala měřením in-situ.



Obecně jsou k dispozici dva druhy technik pro přímé měření HRR: kalorimetry HRR s otevřeným hořením a požární zkoušky v prostoru (in-situ). Většina hodnot HRR používaných v literatuře však byla získána prostřednictvím velkoplošných požárů v tunelech.

Při navrhování tunelů je nezbytné, zvážit potenciální rychlost rozvoje požáru, která může dosáhnout maximální rychlosti uvolňování tepla během několika málo minut. Dále je důležité posoudit počet vozidel, která by mohla být požárem zasažena, a riziko rozšíření ohně z jednoho vozidla na další. Přímě nad hořícím objektem lze očekávat extrémně vysoké teploty, dosahující 1000 °C až 1400 °C. Rychlost uvolňování tepla může navíc být vyšší, pokud je zapojeno více vozidel. Proto je nutné vytvořit návrhovou požární křivku, která bude splňovat všechny inženýrské cíle projektu, včetně požární a životní bezpečnosti, ochrany konstrukce a dalších aspektů.[36, 37]

Z experimentálních testů lze vyčíst, že rychlost uvolňování tepla (HRR) u jednotlivých osobních vozů se pohybuje v rozmezí od 1,5 MW do přibližně 9 MW, s tím, že většina vozidel má hodnotu nižší než 5 MW. Doba, po kterou trvá, než dosáhne požár nejvyššího HRR, se výrazně liší (10-55 minut). Nejvyšší HRR jsou dosaženy u přívěsů těžkých nákladních vozidel. HRR u přívěsů a těžkých nákladních vozidel se pohybují od 13 MW do více než 200 MW. Doba, po kterou trvá, než dosáhne požár nejvyššího HRR, se pohybuje v rozmezí 10-20 minut. Je důležité poznamenat, že u všech představených testů přívěsů HGV trval požár méně než 1 hodinu. U kolejových vozidel se HRR pohybuje od 7 MW do 43 MW a doba, po kterou trvá, než dosáhne požár nejvyššího HRR, se pohybuje od 5 do 80 minut. [2]

Ve mnoha případech je známá pouze rychlost odhořívání tepla a doba trvání požáru, bez jakékoliv závislosti na teplotní křivce. Protože neexistuje fyzikální vztah, kterým by šel tento případ vyjádřit, a to hlavně z několika proměnných:

- Místa požáru v tunelu
- Rychlosti ventilace
- Gradientu teploty
- Plochou příčného řezu
- Doby trvání požáru



## 5. MODELOVÁNÍ POŽÁRU V TUNELU

Jak již bylo zmíněno, posouzení požární bezpečnosti v tunelech, možnosti evakuace či požární odolnosti stavebních konstrukcí je velmi nepředvídatelné. I přes to, že existuje několik teplotních křivek v závislosti na čase určující požár v tunely oproti požáru pozemních staveb, kde se používá převážně nominální teplotní křivka ISO 834, neexistuje žádná platná metodika nebo doporučení, která by upřesnila typ teplotní křivky v závislosti na parametrech a využití tunelu. Nominální teplotní křivky nejsou například vhodné na posouzení evakuace, protože se charakterizují plně rozvinutým požárem, který už po několika vteřinách vystavuje osoby podmínkám neslučitelných se životem, zejména tunelové křivky, které mají velmi vysoký nárůst teploty.

### 5.1 Použitý zpřesněný model

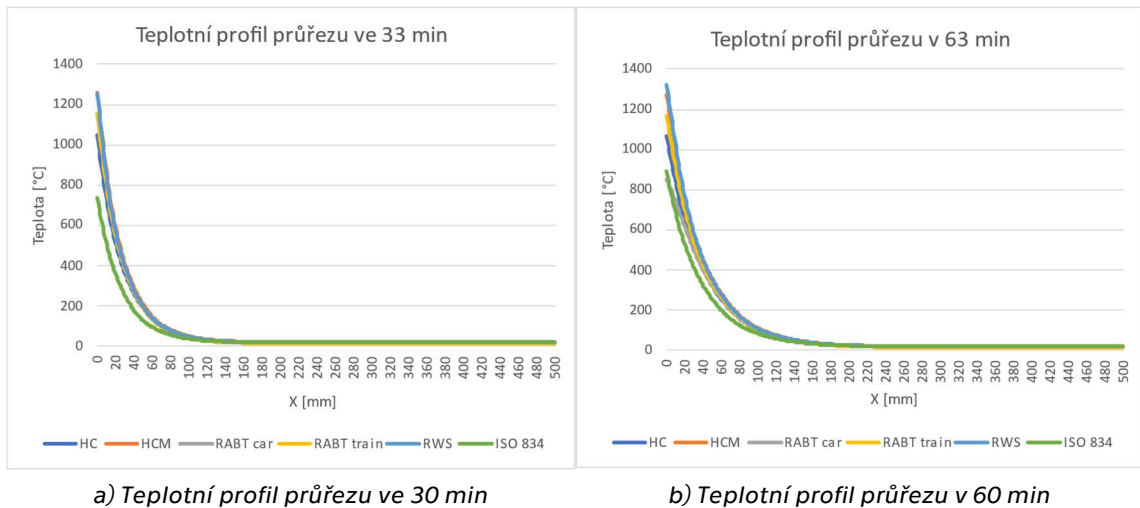
Program PyroSim slouží jako efektivní grafické rozhraní pro FDS 6.8.0, což je výpočetní program pro modelování dynamiky požáru vyvinutý Národním institutem pro standardy a technologie (NIST) Ministerstva obchodu USA. Společně s PyroSim je instalován i Smokeview (SMV) 2023.3.1206, také vytvořený v NIST, určený k vizualizaci výsledků. PyroSim umožňuje uživatelům detailně vytvářet a definovat modelované scénáře, které jsou poté exportovány do zdrojového kódu. V rámci softwarového ekosystému PyroSim funguje jako preprocesor pro vytváření modelů, zatímco FDS slouží jako hlavní procesor a Smokeview pak jako postprocesor pro vizualizaci dat.

V oblasti požárního inženýrství jsou oba programy klíčové pro modelování dynamiky požárů pomocí CFD modelů. FDS používá pro své simulace specifické výpočetní sítě, které rozdělují modelovanou oblast do množství trojrozměrných kontrolních objemů (buněk), vytvářejících prostorové sítě. [39, 40]

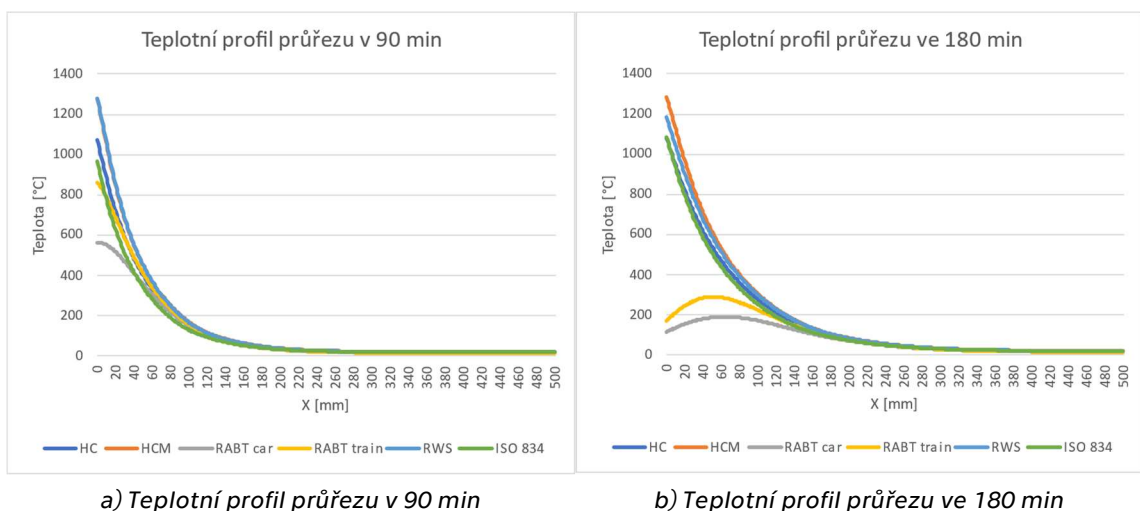
### 5.2 Porovnání teplot v konstrukci po zatížení různými teplotními křivkami

Nominální teplotní křivky jsou tedy vhodné pro posouzení konstrukcí, ale jak ukazuje Obr. 13, většina křivek je konzervativní, protože nemají fázi ochlazování. Pro přesnější výsledky jsou vhodnější zpřesněné modely požáru.

Bylo provedeno porovnání nominálních teplotních křivek a jejich vlivu na nosné konstrukce tunelu (ostění). Z Obr. 17 a Obr. 18 je patrné že pro ostění tloušťky 0,5 m jsou nepatrné rozdíly v teplotním profilu konstrukce po namáhání všemi jmenovanými teplotními křivkami. Odlišný teplotní profil je pouze u křivek RABT – car, RABT – train, které se po 30 nebo 60 minutách ochlazují. Tímto je ale konstrukce namáhána dalšími významnými napětími vlivem teplotních změn, které mohou mít zásadní vliv na stabilitu celé konstrukce. [41]



Obr. 17 Teplotní profil tunelového ostění 0,5 m po namáhání různými teplotními křivkami získané z programu TAs



Obr. 18 Teplotní profil tunelového ostění 0,5 m po namáhání různými teplotními křivkami získané z programu TAs

I přesto že křivky RABT dosahují velmi rychle teploty až 1200 °C a po 30 minutách (RABT car) nebo 60 minutách (RABT train) maximální teploty v konstrukci dosahují nejvyšší teploty přes 1200 °C těsně po začátku fáze ochlazování díky tepelné setrvačnosti. Na Obr. 17 jsou znázorněny maximální teploty v konstrukci zejména pro teplotní křivky RABT car a RABT train, poté následuje fáze ochlazování. Pro křivku RWS dosahují maximální teploty v konstrukci také po 60 min. kvůli tepelné setrvačnosti, nicméně už nedochází k takovému ochlazování jako u křivek RABT. Ostatní nominální teplotní křivky mají po určité fázi konstantní průběh, proto jsou maximální teploty vykresleny ve 180. minutě.



Je vidět, že teplotní křivky jsou pro posouzení konstrukce ostění tunelové trouby konzervativní. V různých časech nevznikají výrazné rozdíly v teplotách v konstrukci, kromě křivek, ve kterých dochází k ochlazení.

V další části práce je provedena analýza povrchové teploty konstrukce po zatížení několika křivek HRR, podle druhu dopravního prostředku a závislosti na využití tunelu pomocí 3D numerického modelu typu Fire Dynamic Simulator (FDS) verze 6.8.0 a programu Pyrosim 2023.2.0816 [42], který je využívám pro grafické a uživatelské rozhraní.

## 5.3 Popis zpřesněného modelu

V rámci diplomové práce budou pomocí zpřesněného modelu řešeny následující modelové situace:

1. Požár vybraných dopravních prostředků v tunelu bez proudění vzduchu:
  - a) požár osobního automobilu bez proudění vzduchu v tunelu,
  - b) požár autobusu bez proudění vzduchu v tunelu,
  - c) požár nákladního automobilu bez proudění vzduchu v tunelu,
  - d) požár vlakové soupravy bez proudění vzduchu v tunelu.
2. Požár vybraných dopravních prostředků v tunelu s prouděním vzduchu o rychlosti 3 m/s:
  - a) požár osobního automobilu s prouděním vzduchu v tunelu o rychlosti 3 m/s,
  - b) požár autobusu s prouděním vzduchu v tunelu o rychlosti 3 m/s,
  - c) požár nákladního automobilu s prouděním vzduchu v tunelu o rychlosti 3 m/s,
  - d) požár vlakové soupravy s prouděním vzduchu v tunelu o rychlosti 3 m/s.
3. požár osobního automobilu s prouděním vzduchu v tunelu o rychlosti 5 m/s.

Jak je popsáno výše, průměrné délky silničních tunelů v ČR dosahují délky 780 m a železničních tunelů 330 m. Proto pro zmíněné modely byla uvažována střední hodnota, tedy celková délka tunelů 500 m. Na navrhovanou celkovou délku tunelů měla také vliv rychlost výpočtů v programu FDS. Výpočet jednoho modelu trval přibližně 190 h. S ohledem na časovou náročnost byly proto zvoleny následující parametry.

Obr. 20 a Obr. 21 ukazují grafické znázornění silničního a železničního tunelu z programu Pyrosim.

Pro diplomovou práci byly vytvořeny 2 základní 3D modely tunelů podle způsobu provozu. Tedy silniční a železniční model. Základní šířkové a výškové uspořádání je navrženo podle základních norem pro navrhování [8, 15] jak ukazuje Obr. 19. Dispozice modelového prostoru je vymodelována a znázorněna na Obr. 20 a Obr. 21. Celý model tunelu je vymodelován z prostého betonu a portály tunelů zůstávají otevřené.

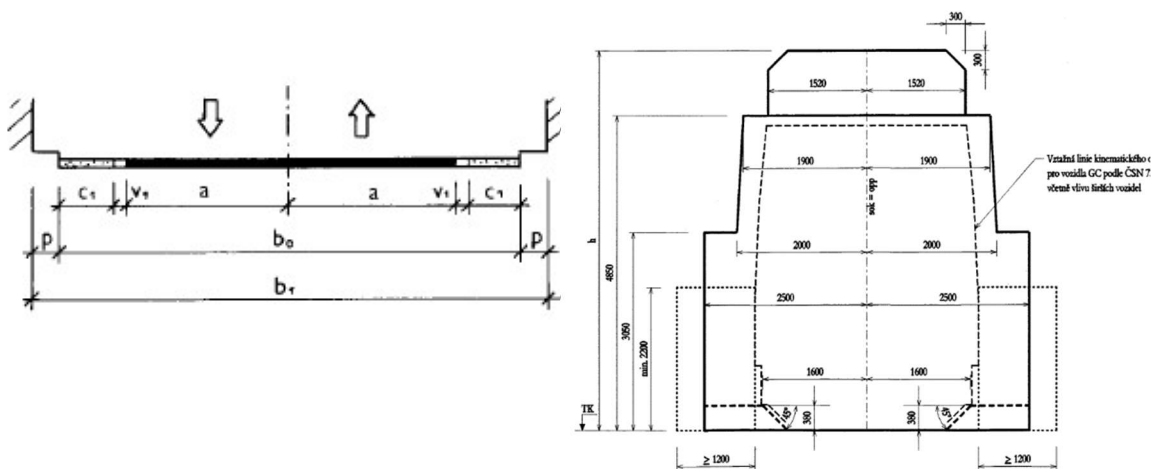




Zdroj požáru (dopravní prostředek) je umístěn doprostřed tunelu, hodnoty požáru jsou definovány pomocí křivek HRR pro každý dopravní prostředek zvlášť. Je uvažován idealizovaný požár bez hašení.

Jako chemická reakce požáru je zvolena polyuretanová reakce se vzorcem  $C_{6,3}H_{7,1}O_{2,1}N_1$ , která znázorňuje požár sedadla automobilu, případně sedadla v dalších dopravních prostředcích. [30]

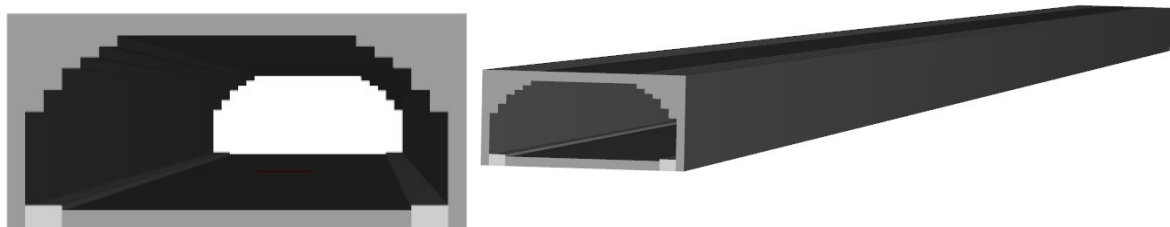
- Kritická teplota plamene = 1427 °C;
- Produkce CO = 0,2 kg/kg;
- Podíl tvorby částic kouře = 0,1 kg/kg.



a) Silniční tunel

b) Železniční tunel

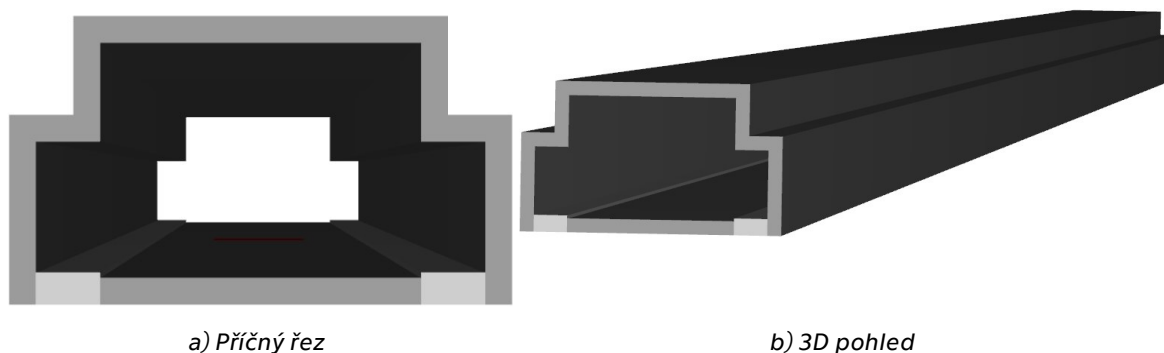
Obr. 19 Schematicky zobrazené šířkové uspořádání tunelové trouby



a) Příčný řez

b) 3D pohled

Obr. 20 Grafické zobrazení modelu silničního tunelu



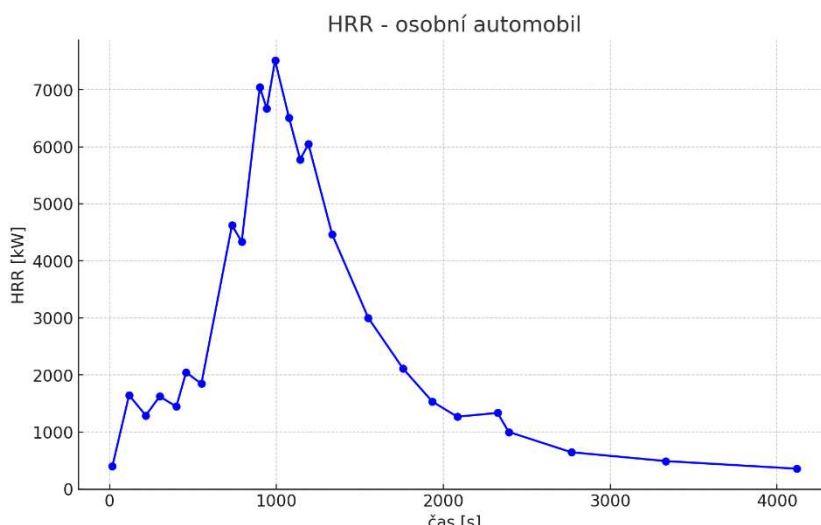
Obr. 21 Grafické zobrazení modelu železničního tunelu

V podzemních silničních tunelech se vozidla většinou skládají z osobních automobilů, autobusů a nákladních automobilů. Cisterny s pohonnými hmotami jsou obecně zakázány v městských podzemních silničních tunelech, a proto se s nimi neuvažuje. V následující části jsou popsány a graficky znázorněny neměřené hodnoty HRR pro každý typ dopravního prostředku, který je pro práci uvažován. HRR je vyjádřeno jako množství energie uvolněné za jednotku času v kilowattech (kW). [3, 37, 43, 44]

### 5.3.1 HRR pro osobní automobil

V 95 % případů je HRR pro dva nebo tři osobní automobily nižší než 10 MW. Doba dosažení maximálního HRR je 10 až 60 minut pro dva a tři vozy, což je delší než u jednoho vozidla (8–30 minut).

U elektrických vozidel testy ukázaly podobný vývoj požáru mezi elektromobily a vozidly se spalovacím motorem, s mírně nižším maximálním HRR u elektromobilů. Při požárech elektromobilů nebyly pozorovány výbuchy baterií. Významný nárůst produkce fluorovodíku (HF) byl zaznamenán po 25 minutách, což je spojeno s materiály v Li-ion bateriích. [3]

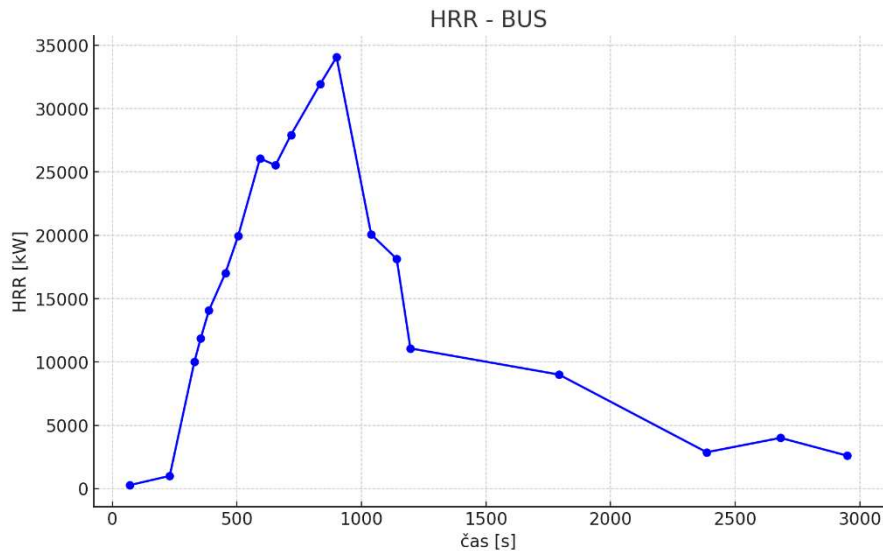


Obr. 22 Uvažovaná křivka HRR osobního automobilu



### 5.3.2 HRR pro autobus

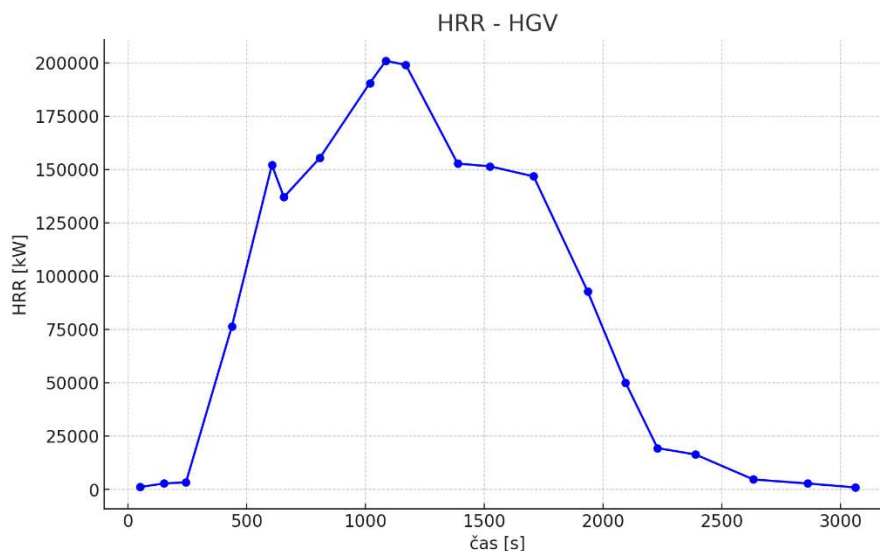
Maximální HRR pro vozidla autobusů se pohybují kolem 30 MW. V raných fázích není vývoj požáru většinou rychlejší než ultrarychlá křivka rozvoje požáru.[3]



Obr. 23 Uvažovaná křivka HRR autobusu

### 5.3.3 HGV – nákladní automobil

Velikost požáru u těžkého nákladního vozidla je obvykle mnohem větší než u požáru automobilu nebo autobusu což ukazuje Obr. 24. Maximální HRR se pohybují v rozmezí 60 – 200 MW. V počátečních fázích se oheň šíří ještě rychleji než ultrarychlá křivka. [3]



Obr. 24 Uvažovaná křivka HRR nákladního automobilu



### 5.3.4 HRR – vlaková souprava

U požárů vlakových souprav hraje klíčovou roli pro určení HRR počet dveří a oken, kterými proudí vzduch. Dokud se okna nerozbijí nebo nevypadnou (a nejsou tam žádné další velké otvory), oheň se bude vyvíjet pomalu. Na druhou stranu, pokud se okna rozbijí, oheň se může velmi rychle šířit a zvyšovat intenzitu. Maximální HRR může být tedy mnohem vyšší než to, které odpovídá úplné spotřebě kyslíku proudícího do vozu právě těmito otvory.[3]



Obr. 25 Uvažovaná křivka HRR vlakové soupravy

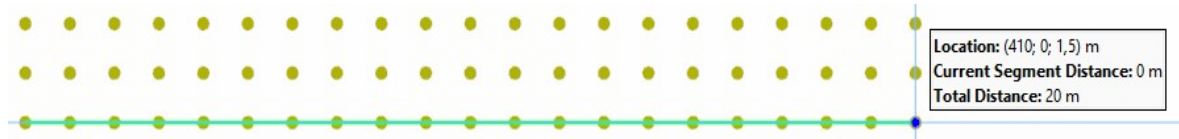
## 5.4 Výstupy z programu FDS

Data získaná z modelů jsou zpracována a prezentována prostřednictvím grafických výstupů. Pro lepší pochopení výsledků byly vytvořeny 3D vizualizace, které přehledně ukazují průběh a vývoj modelovaných situací. Kromě grafických vizualizací byly klíčové parametry zaznamenány a uspořádány v tabulkovém editoru.

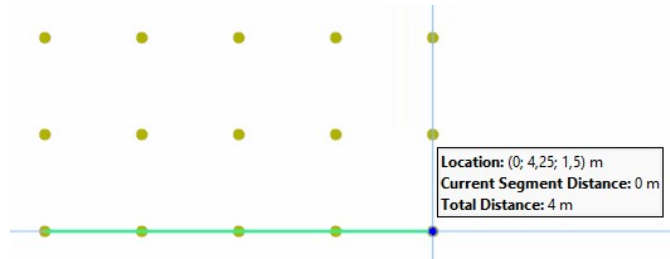
Sledované parametry byly měřeny pomocí rovin (2D slices), termočlánků (devices) a celého objemu tunelové trouby (3D slices).

2D Slices jsou znázorněny graficky pomocí izoterm v programu Smokeview, bylo sledováno průběh teploty viditelnost ve střední části tunelu a na středu únikových chodníků.

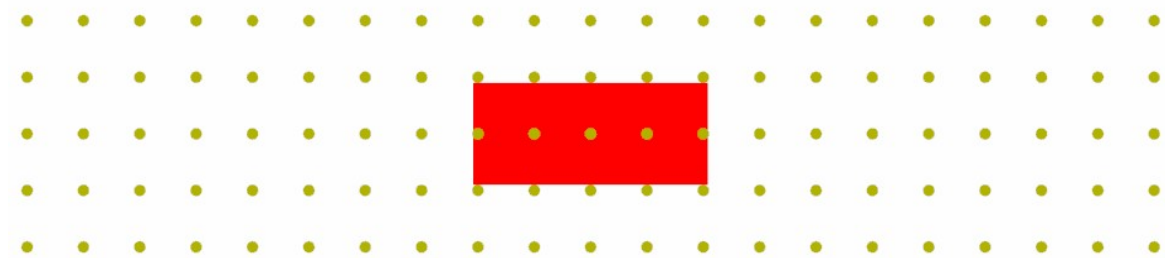
Termočlánky byly umístěny v rastru 1 m v délce 20 m po celé výšce i šířce nad požárem pro dosažení co nejpřesnějších výsledků. Dále jsou termočlánky umístěny na výšku tunelu po celé délce ve střední části po 5 až 10 m. Stejně tak jsou termočlánky umístěny na ostění tunelu po celé délce.



Obr. 26 Rozmístění měřících bodů v rastru po 1 m ( $\xi, d, v - 4 \times 20 \times 2$ ) – Podélný řez



Obr. 28 Rozmístění měřících bodů v rastru po 1 m ( $\xi, d, v - 4 \times 20 \times 2$ ) – Příčný řez



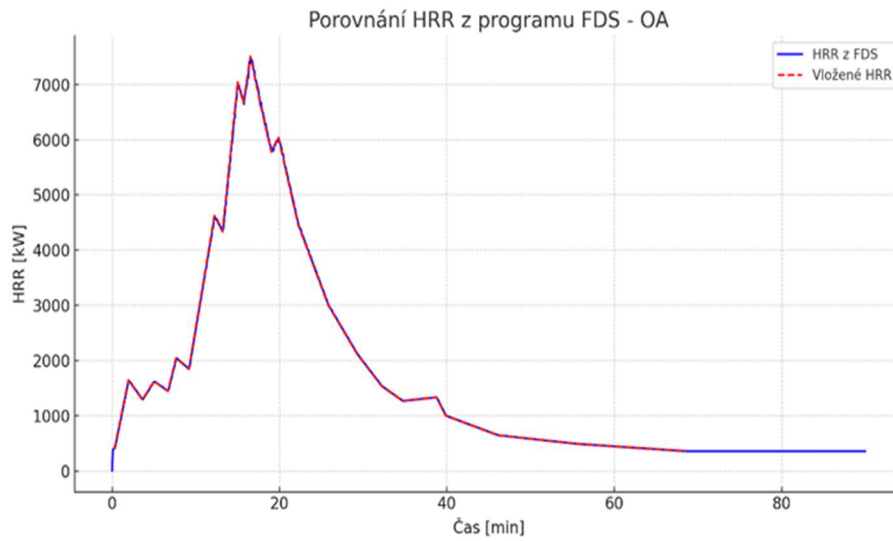
Obr. 27 Rozmístění měřících bodů v rastru po 1 m ( $\xi, d, v - 4 \times 20 \times 2$ ) – Půdorys

### 5.4.1 Výstupy z první modelové situace

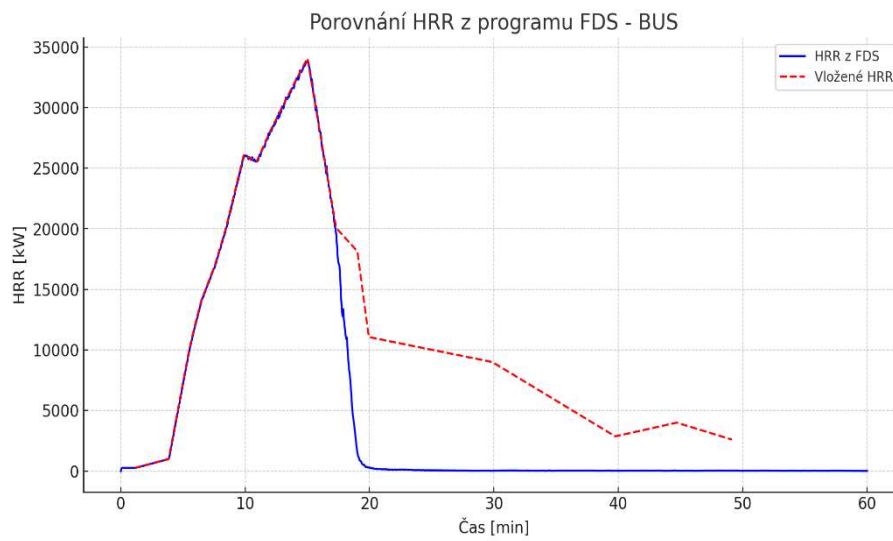
První modelová situace představuje silniční i železniční tunel délky 500 m bez proudění vzduchu, ve kterých byl namodelován požár podle výše uvedených křivek HRR.



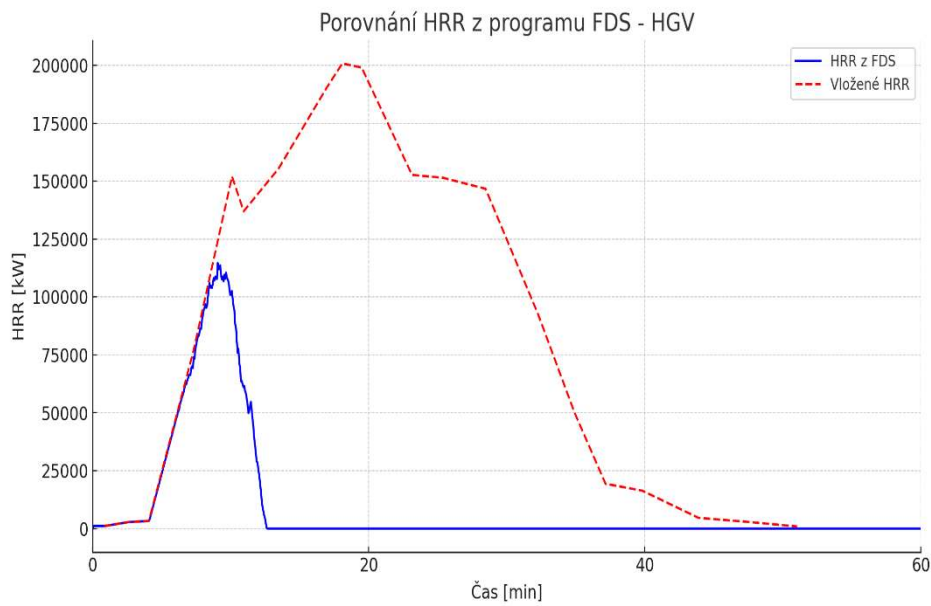
## Porovnání vstupních hodnot HRR s vypočteným HRR programem FDS:



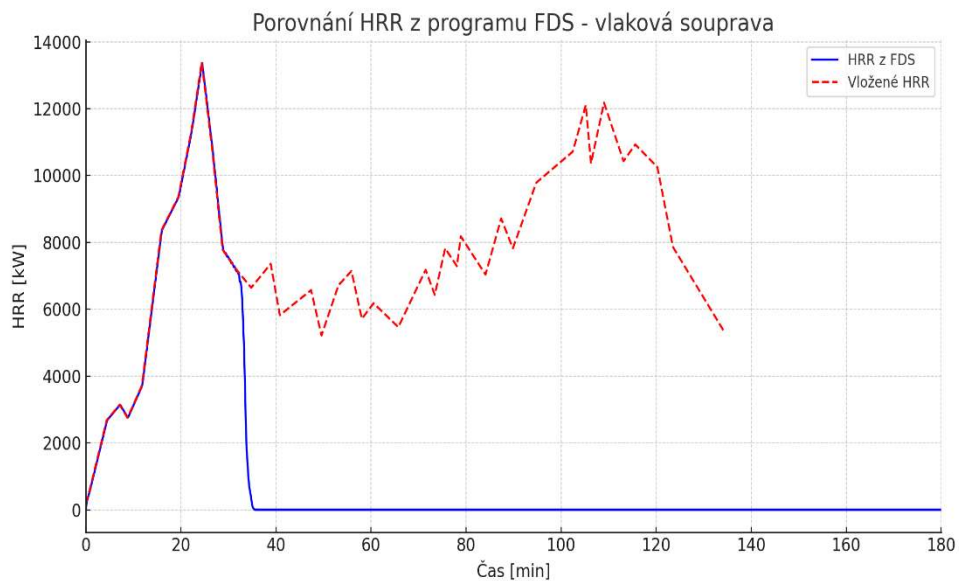
Obr. 29 Porovnání HRR z programu FDS – OA



Obr. 30 Porovnání HRR z programu FDS – BUS



Obr. 32 Porovnání HRR z programu FDS – HGV

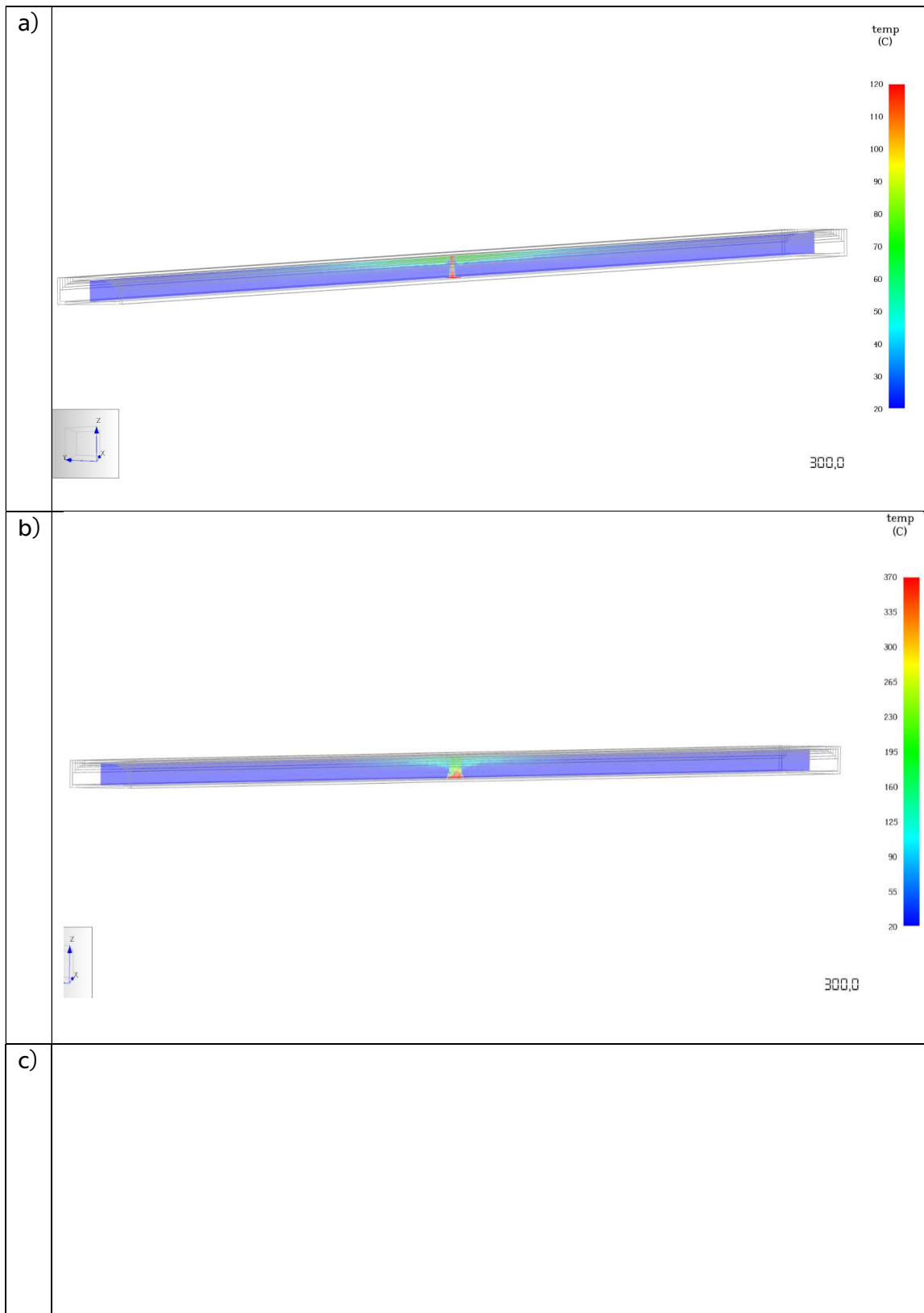


Obr. 31 Porovnání HRR z programu FDS – vlaková souprava

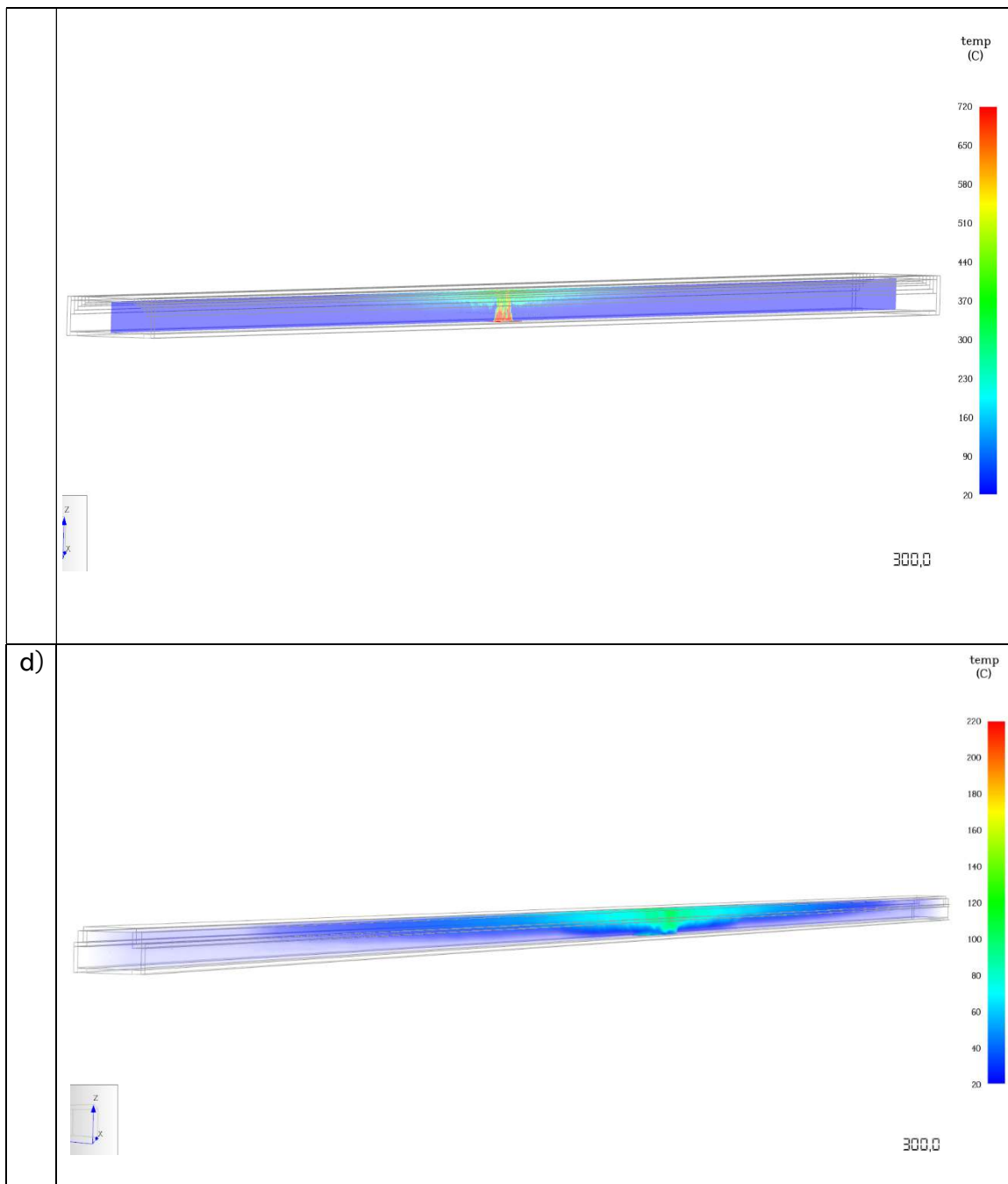
Jak ukazují Obr. 29 až Obr. 31, tak ve většině případů se v důsledku téměř žádného proudění vzduchu nedokázaly křivky HRR dosáhnout takového výkonu jako je ve vložených hodnotách, tedy ve výpočetním modelu nebylo dostatek kyslíku pro udržení požáru. Pouze výpočet osobního automobilu proběhl přesně podle vložených hodnot, protože má nejmenší hodnoty HRR.



Grafické vykreslení teplot v čase 300 s:





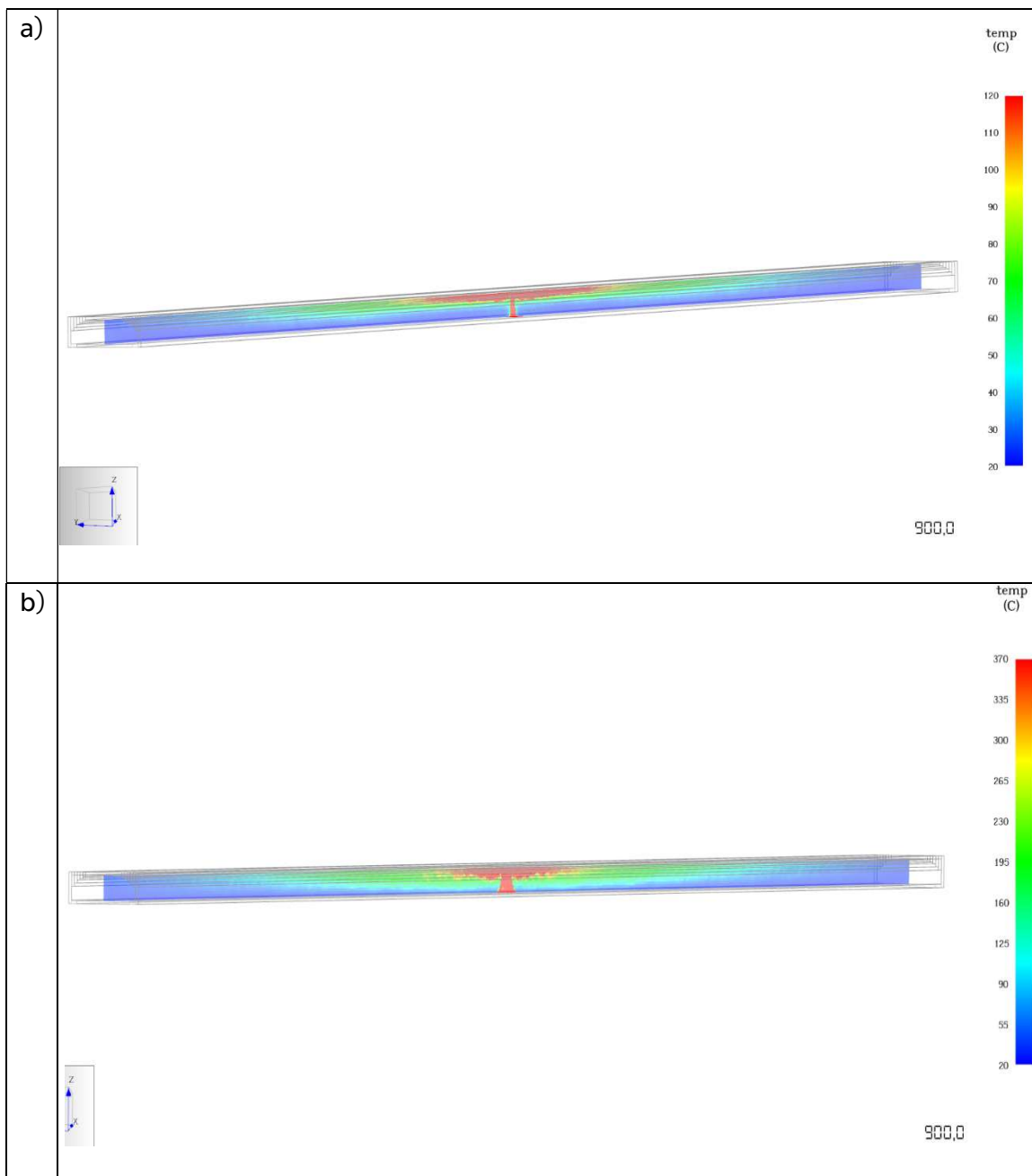


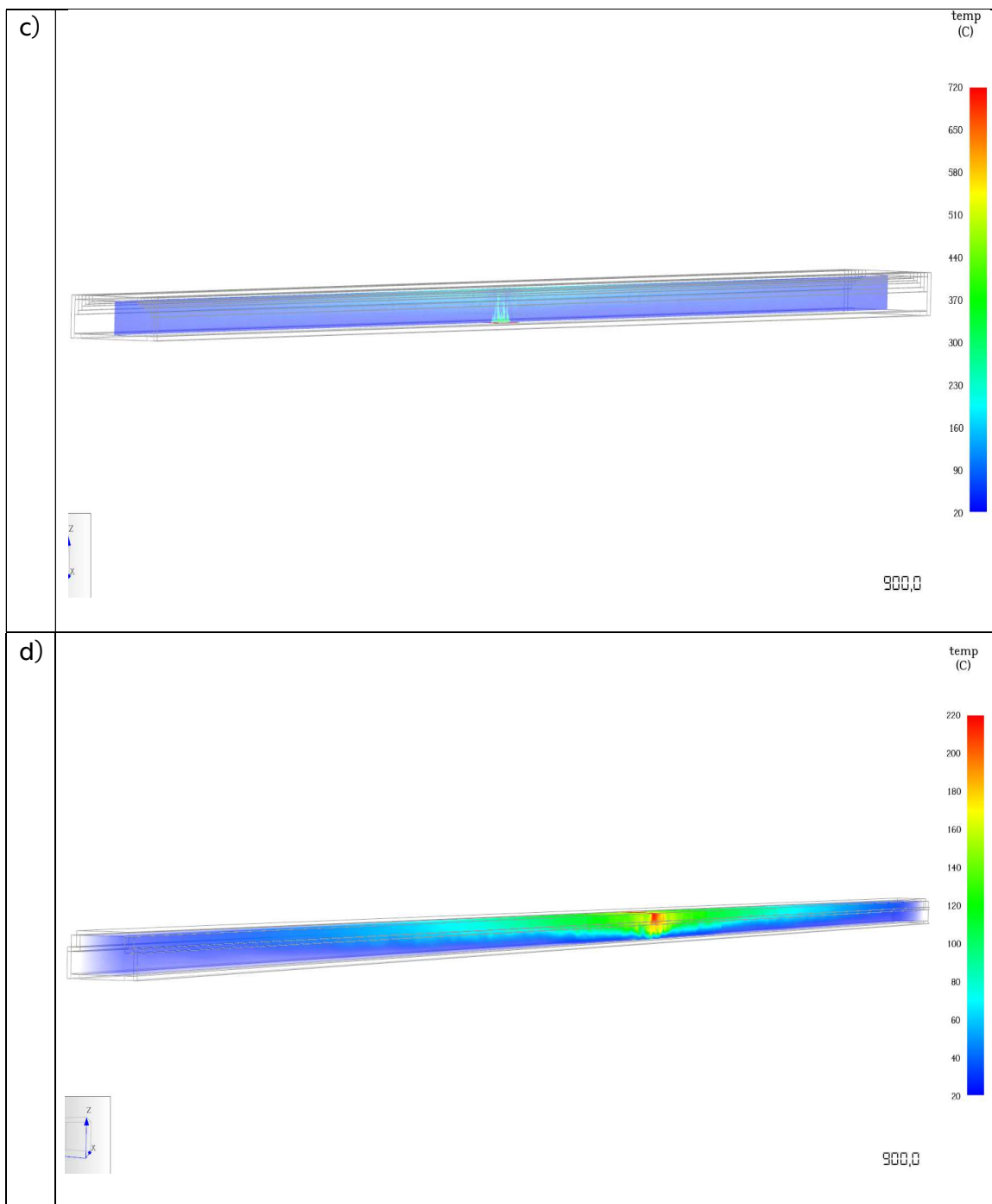
Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 33 Grafické znázornění teplot v čase 300 s



Grafické vykreslení teplot v čase 900 s:



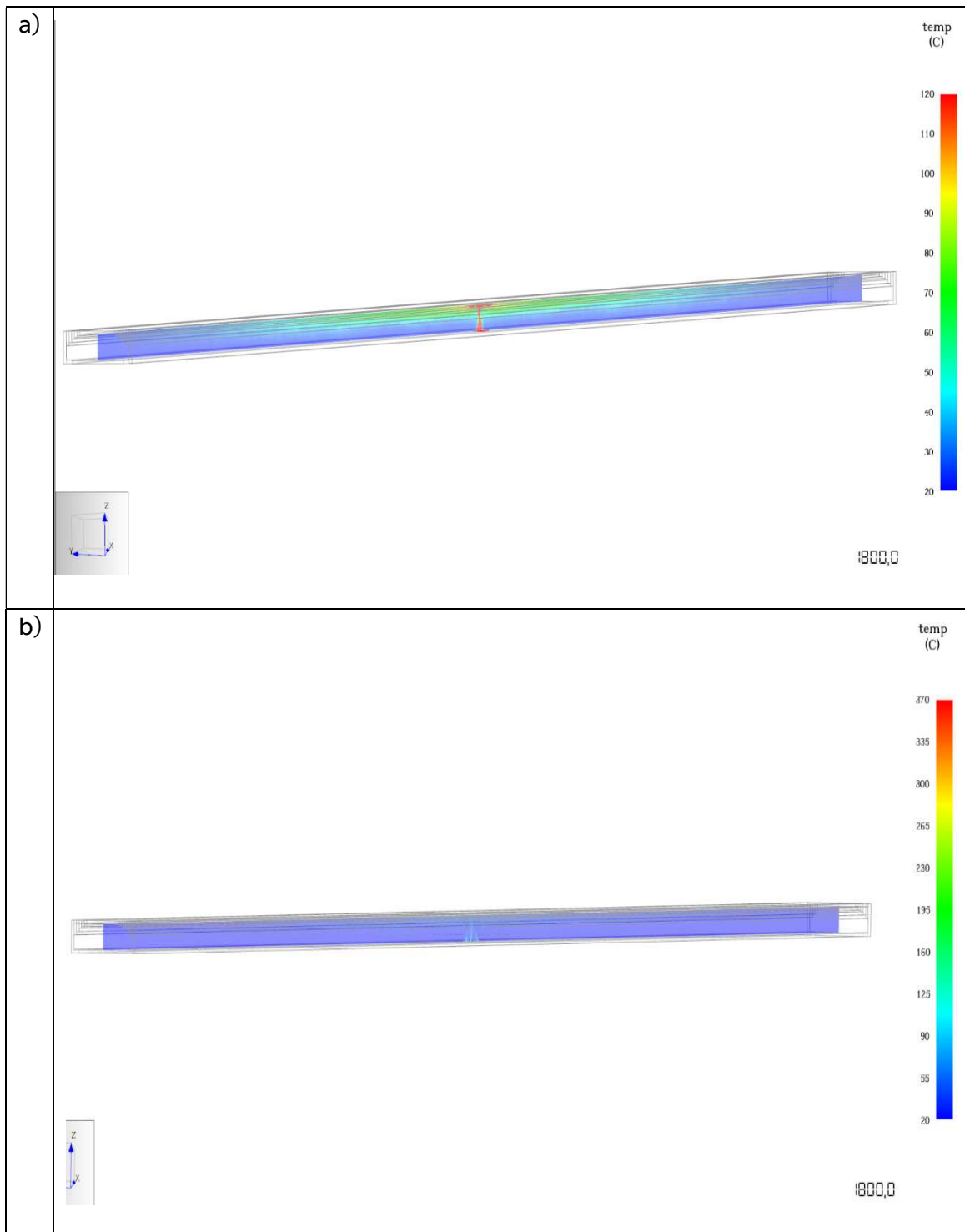


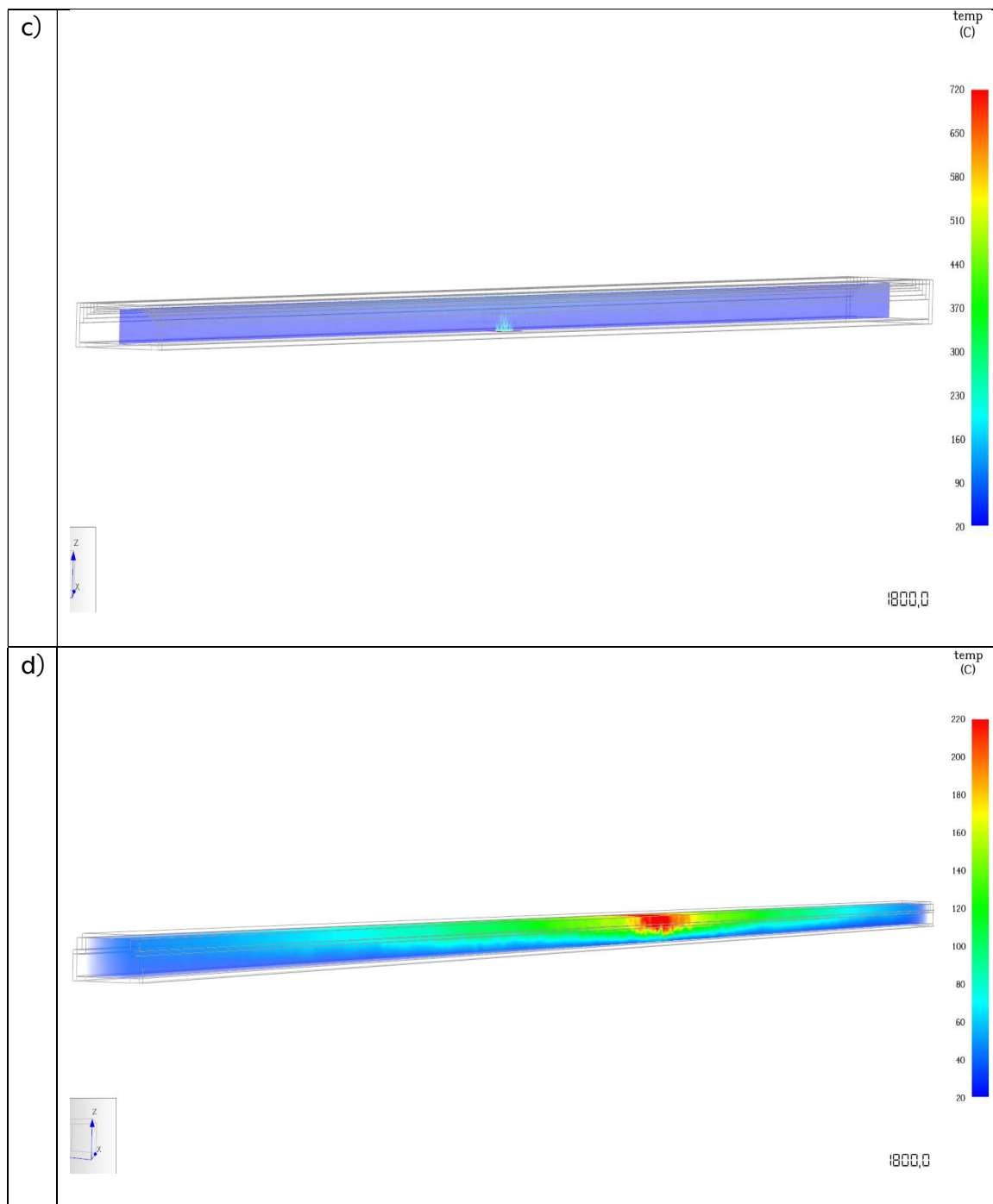
Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 34 Grafické znázornění teplot v čase 900 s



Grafické vykreslení teplot v čase 1800 s:



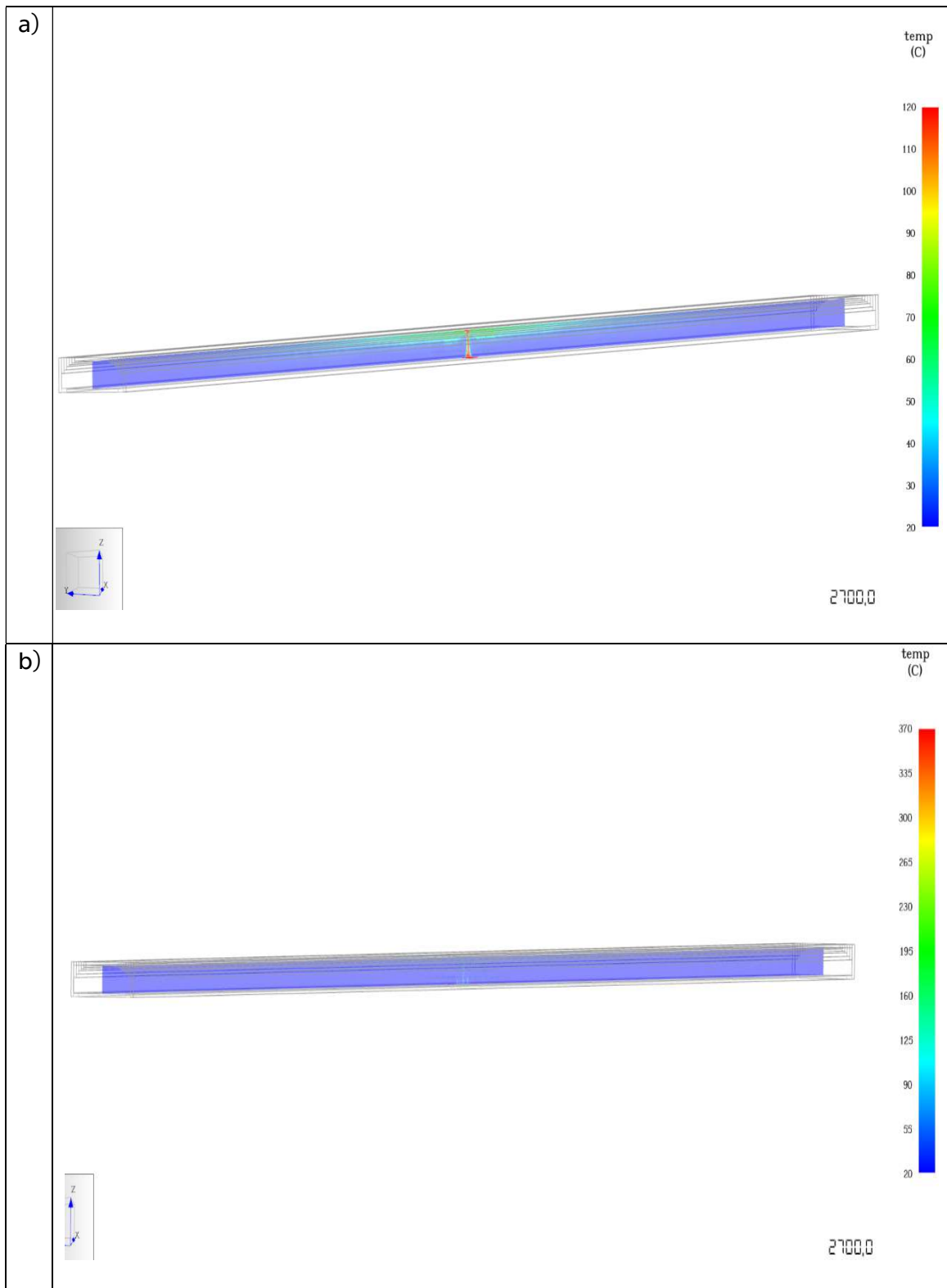


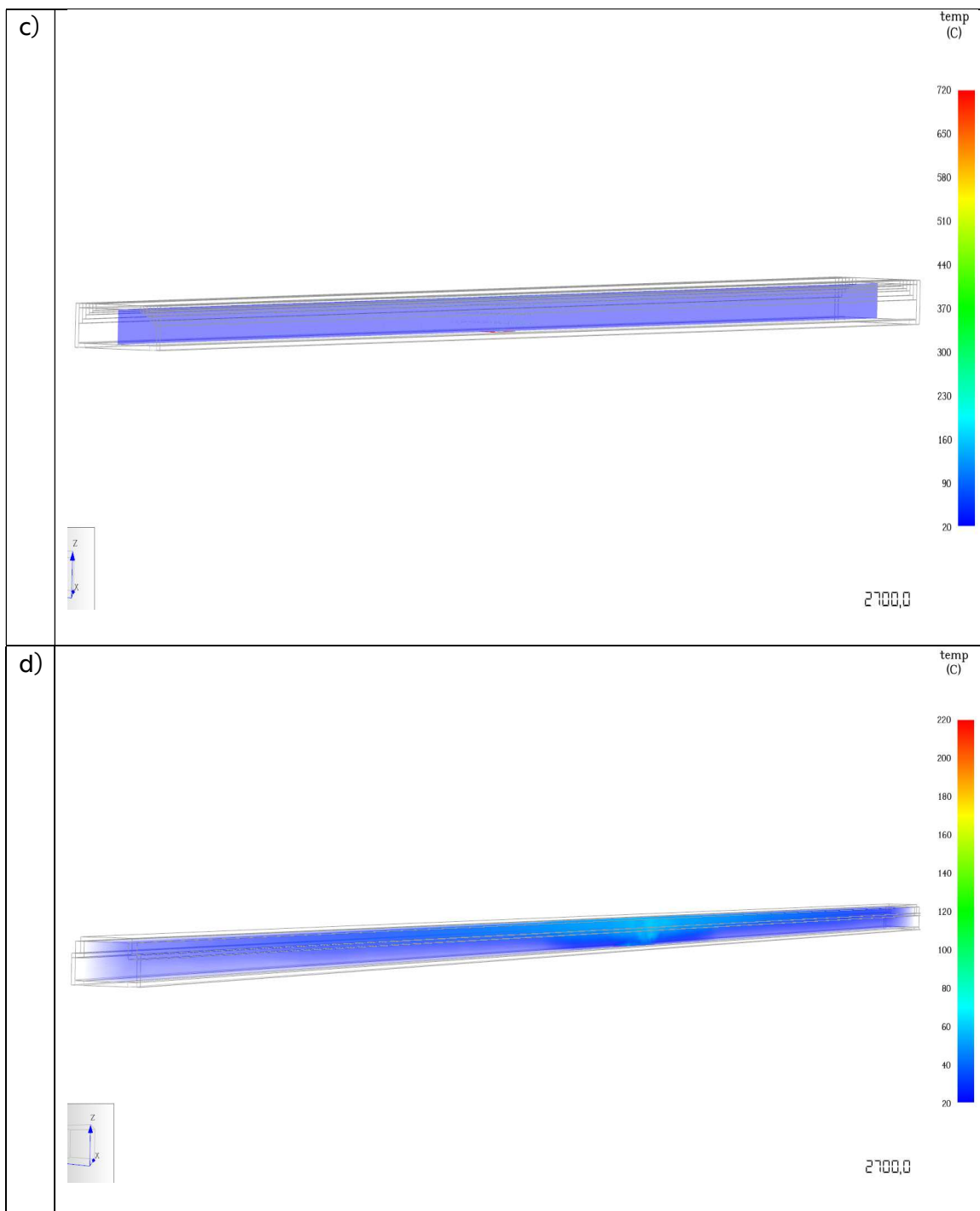
Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 35 Grafické znázornění teplot v čase 1800 s



Grafické vykreslení teplot v čase 2700 s:



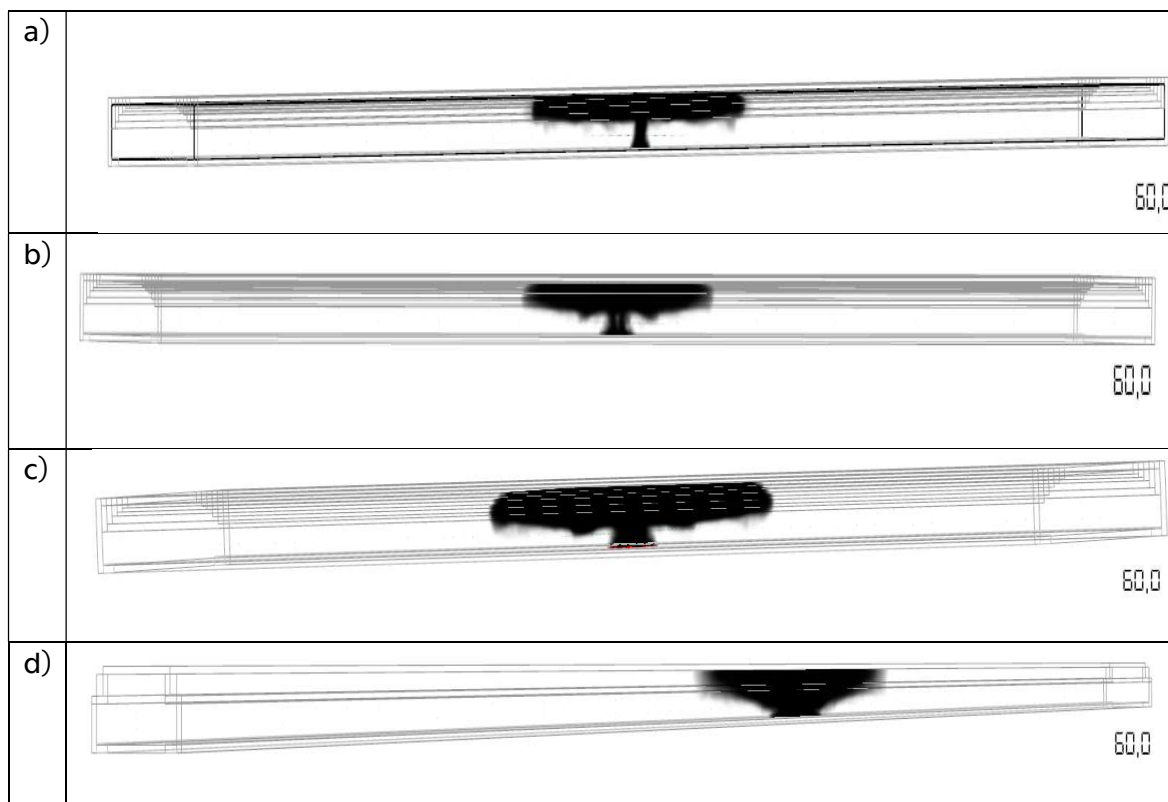


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 36 Grafické znázornění teplot v čase 2700 s



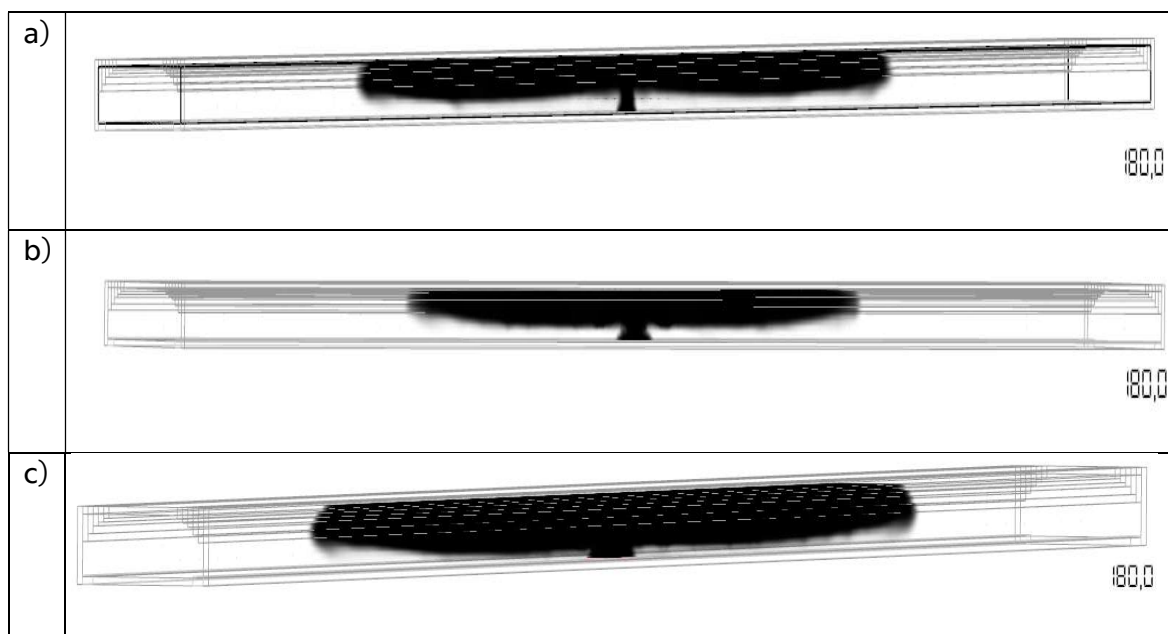
**Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 60 s:**



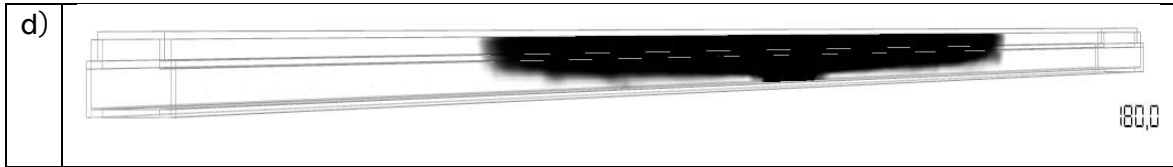
Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 37 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 60 s

**Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 180 s:**



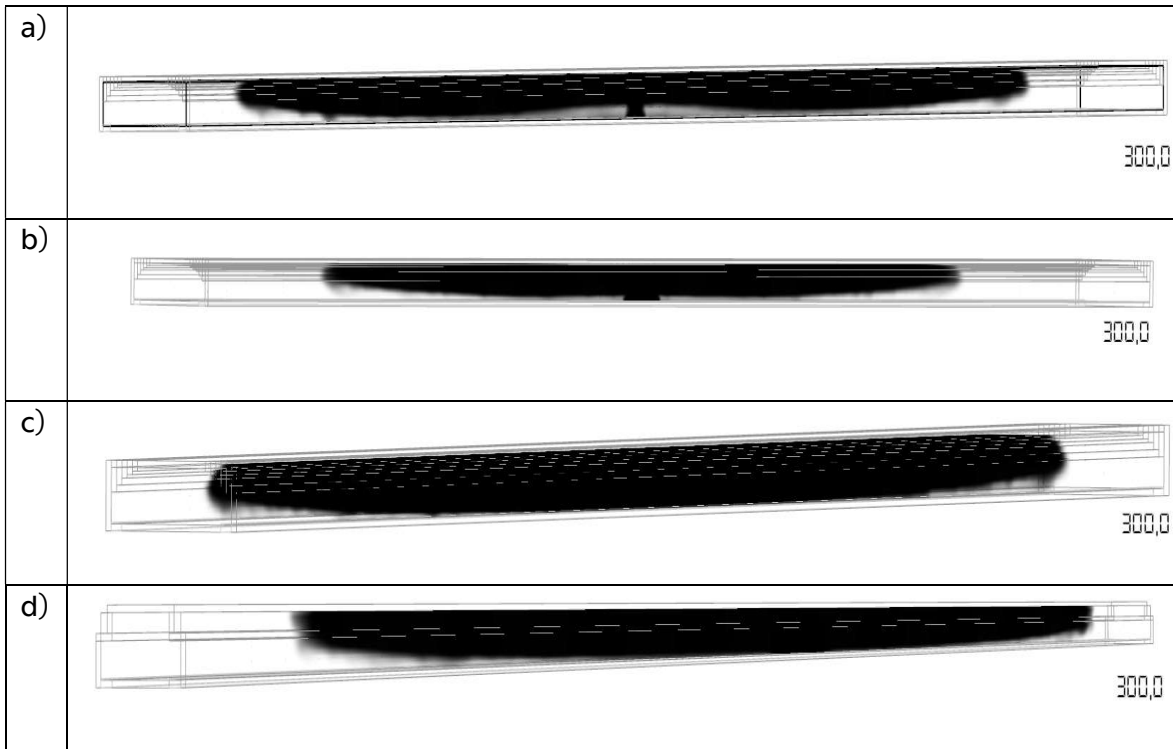




Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 38 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 180 s

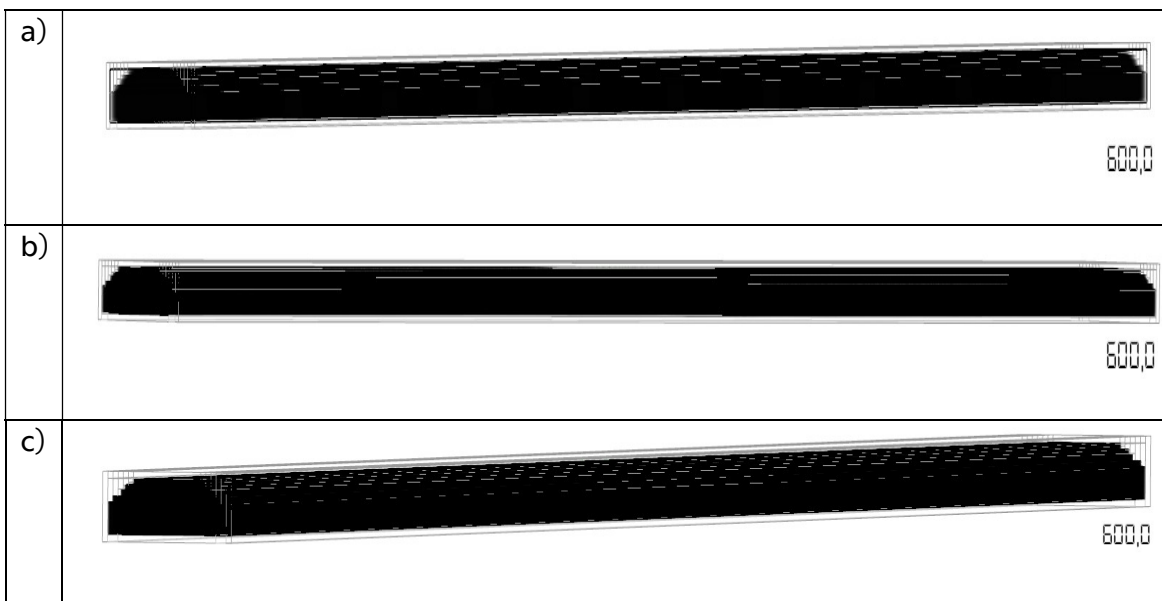
**Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 300 s:**

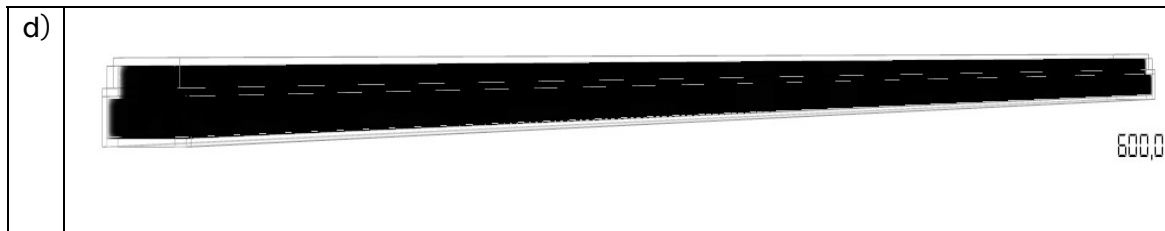


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 39 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 300 s

**Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 600 s:**



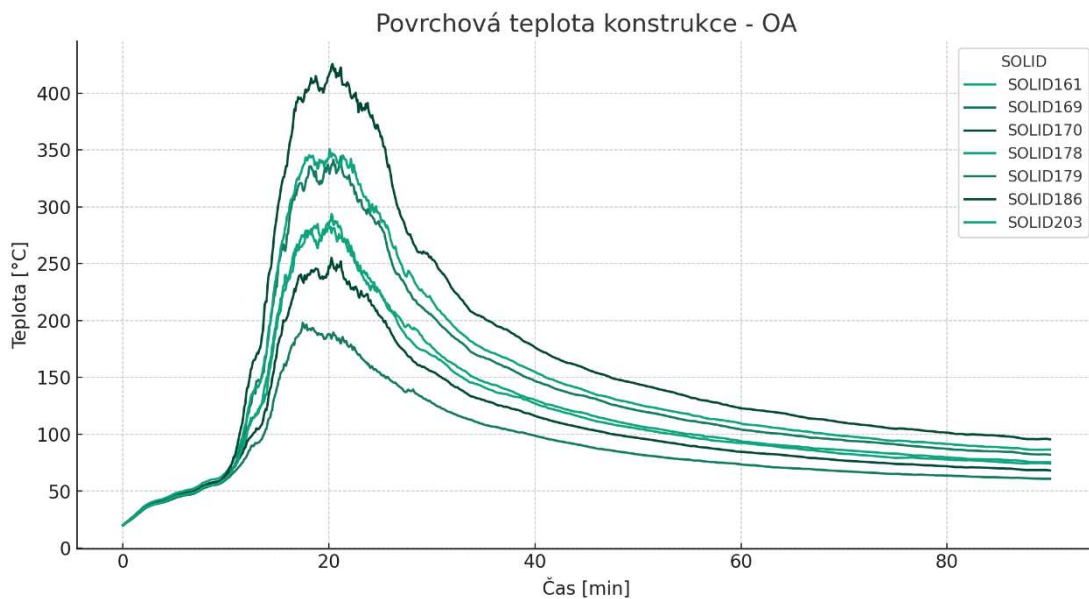


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

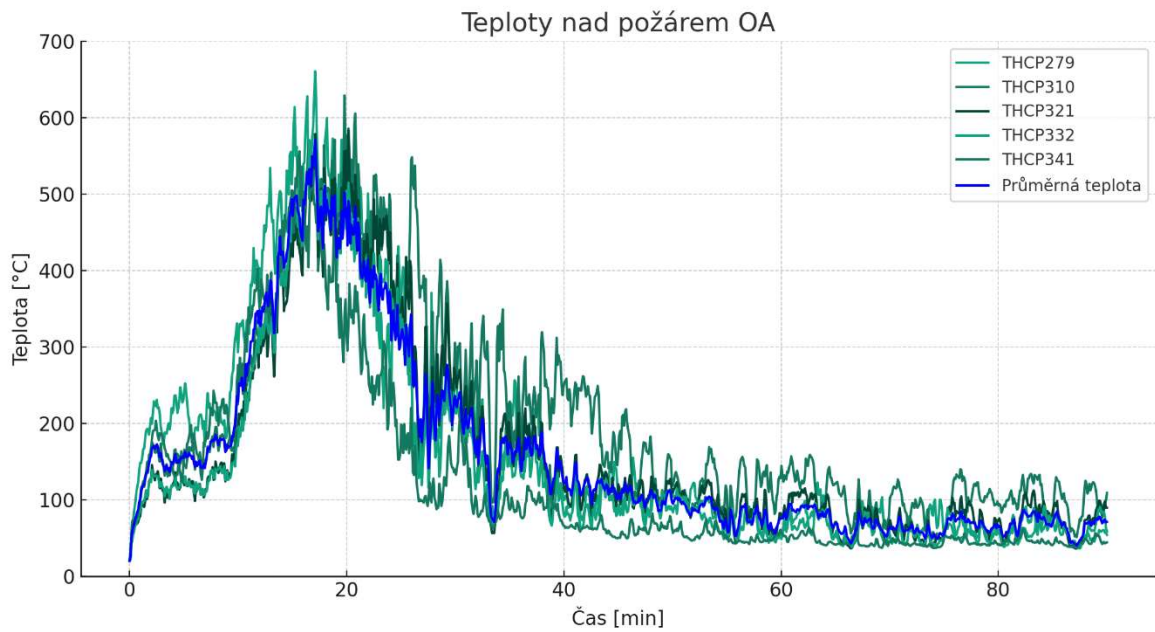
Obr. 40 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 600 s

### Křivkové zobrazení teplot:

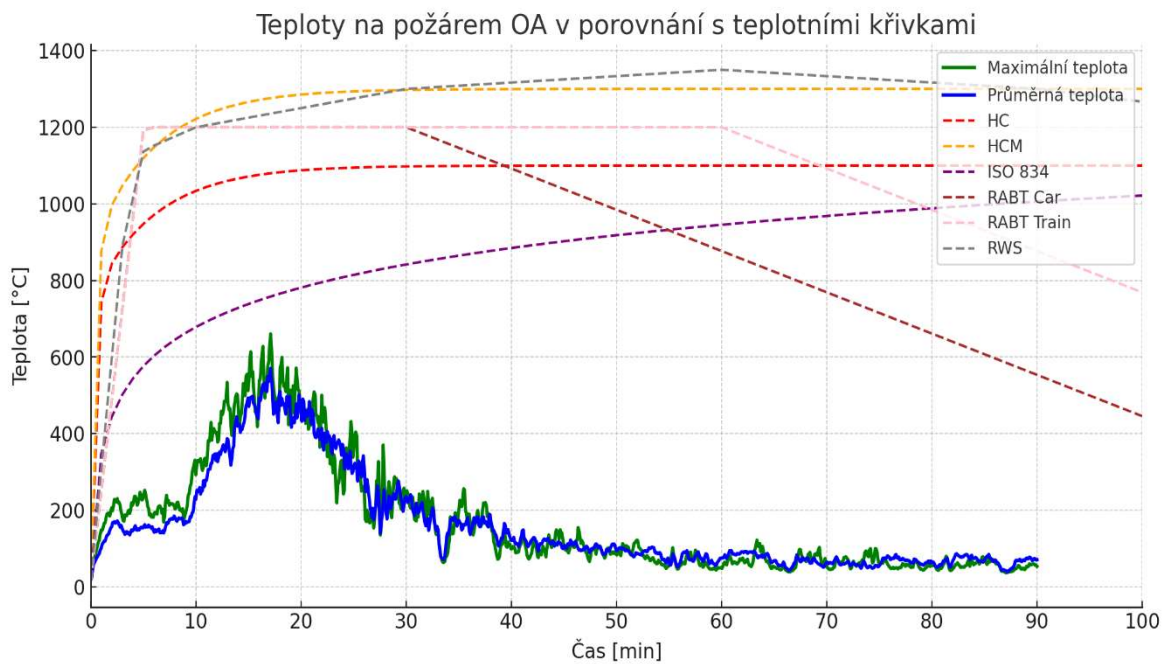
Hodnoty pro vykreslení následujících grafů jsou brány z termočlánků nad požárem každého dopravního prostředku. Termočlánky THCP, které měří teploty plynu jsou rozmístěné v ose nad požárem až do výšky ostění, kde jsou umístěny termočlánky SOLID, které měří povrchovou teplotu konstrukce.



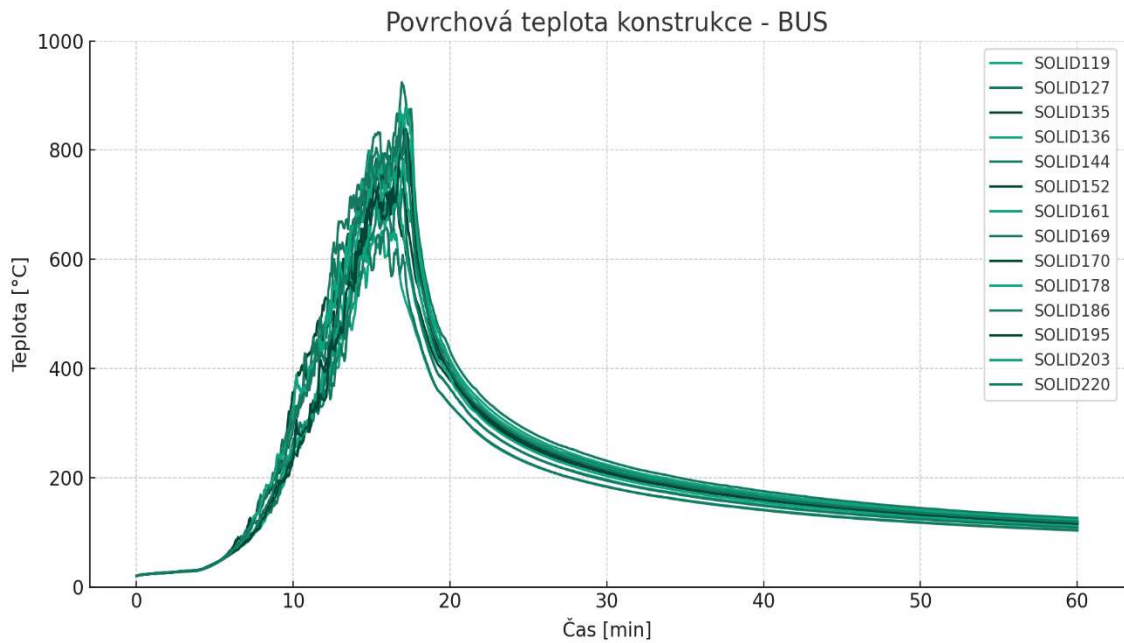
Obr. 41 Povrchová teplota ostění nad požárem OA



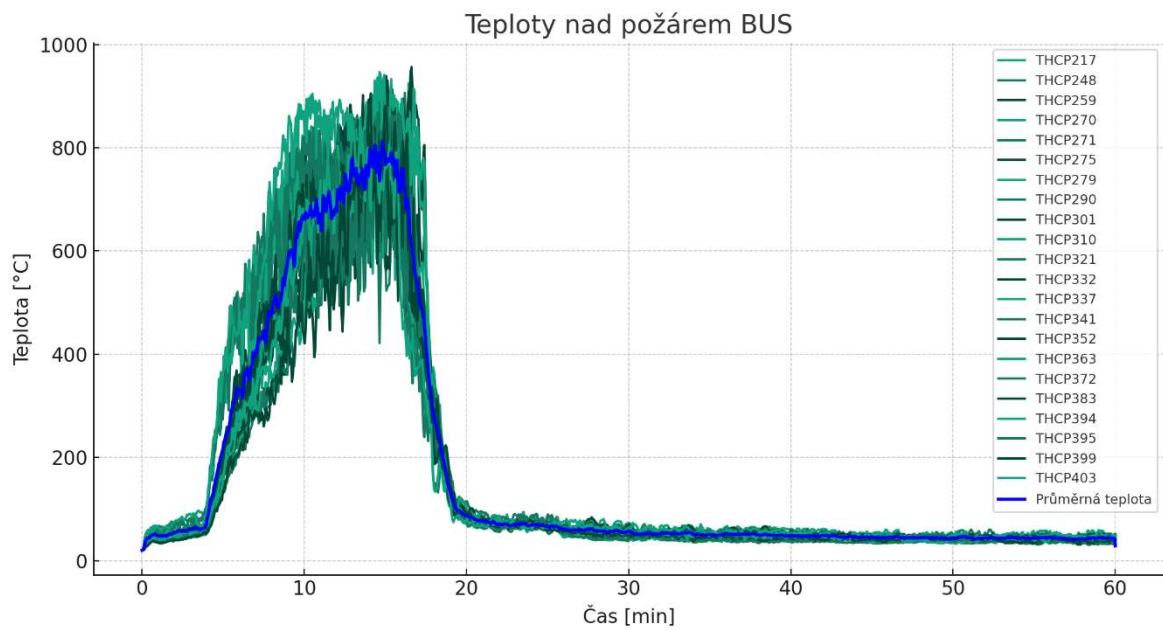
Obr. 42 Maximální teploty nad požárem OA



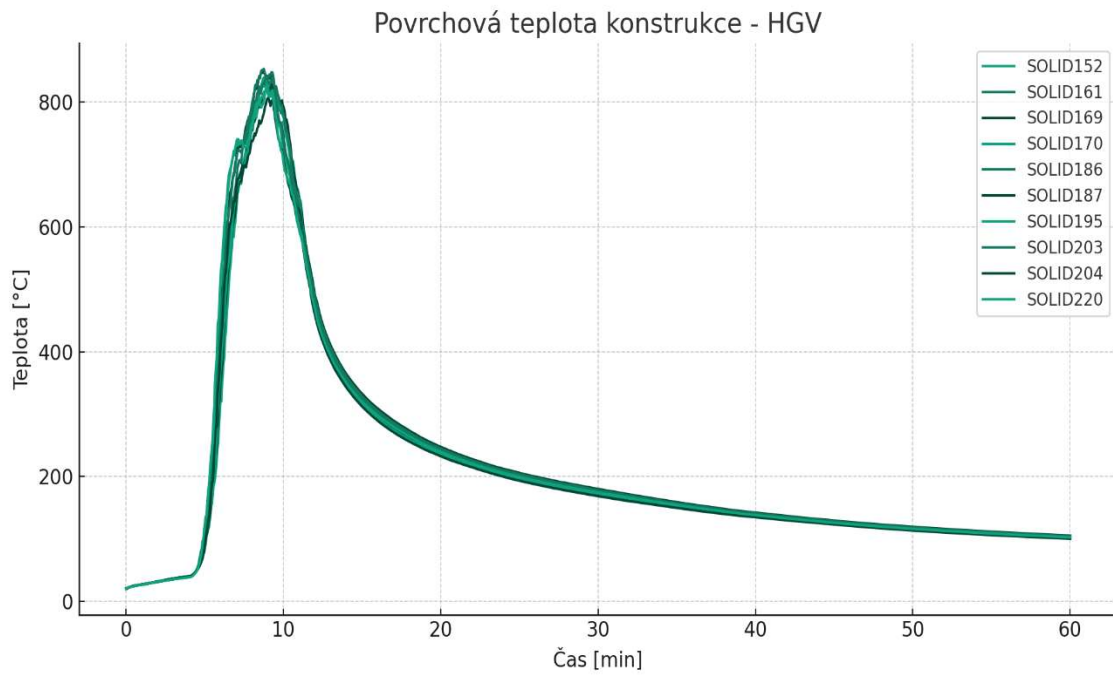
Obr. 43 Teploty nad požárem OA v porovnání s teplotními křivkami



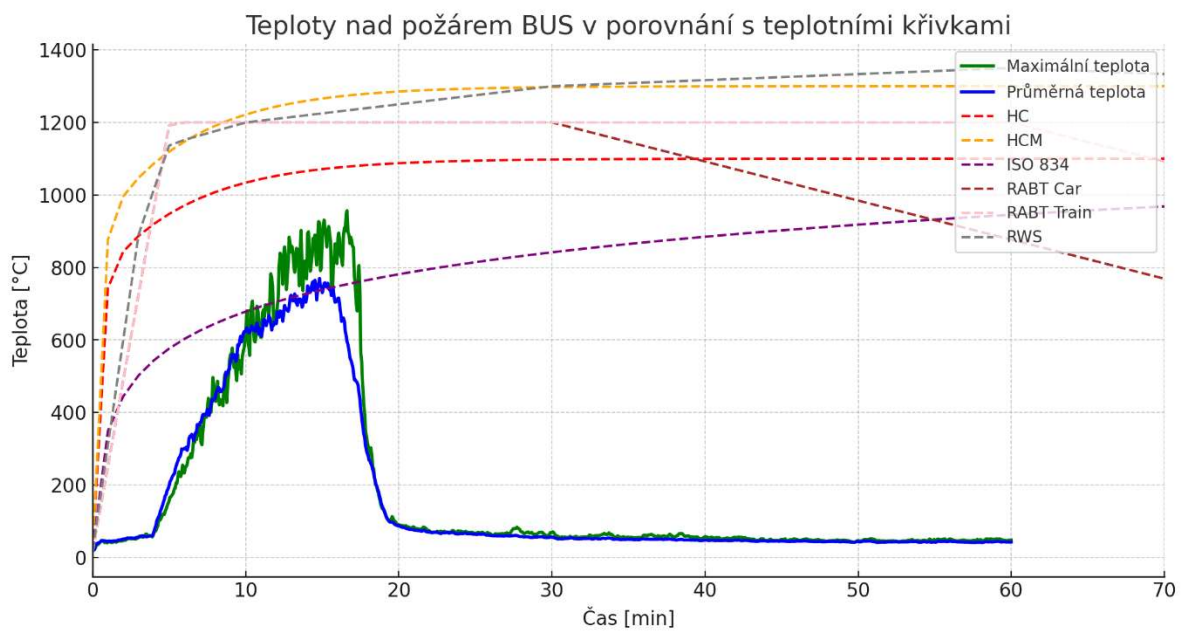
Obr. 44 Povrchová teplota ostění nad požárem BUS



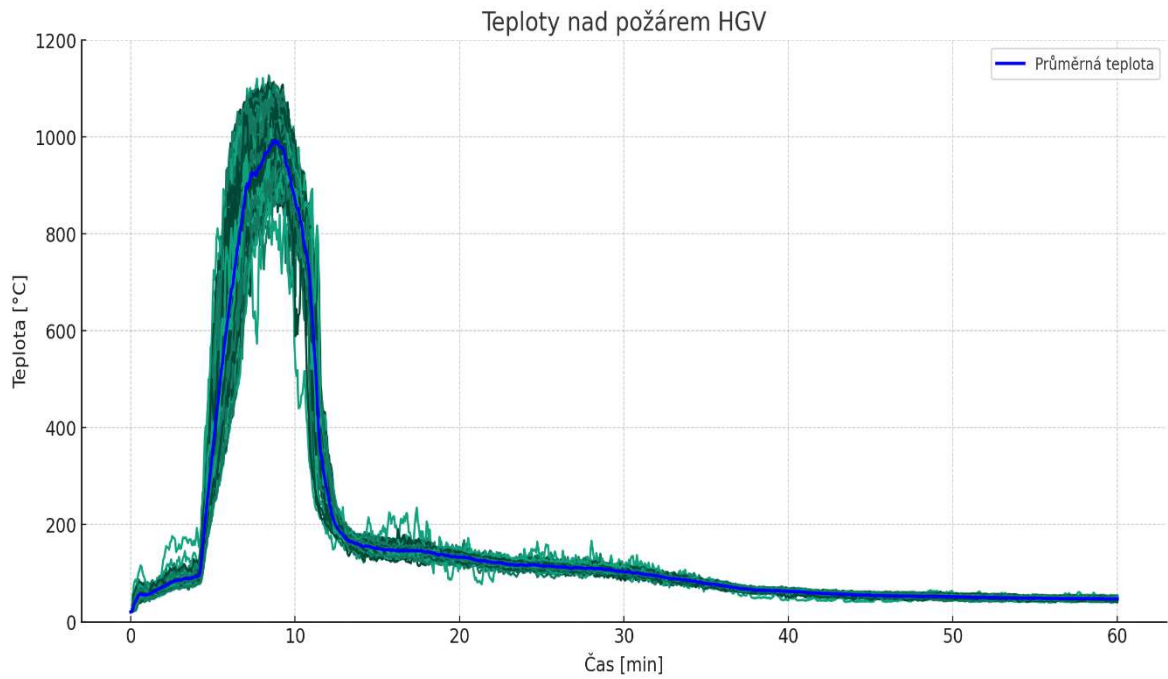
Obr. 45 Maximální teploty nad požárem BUS



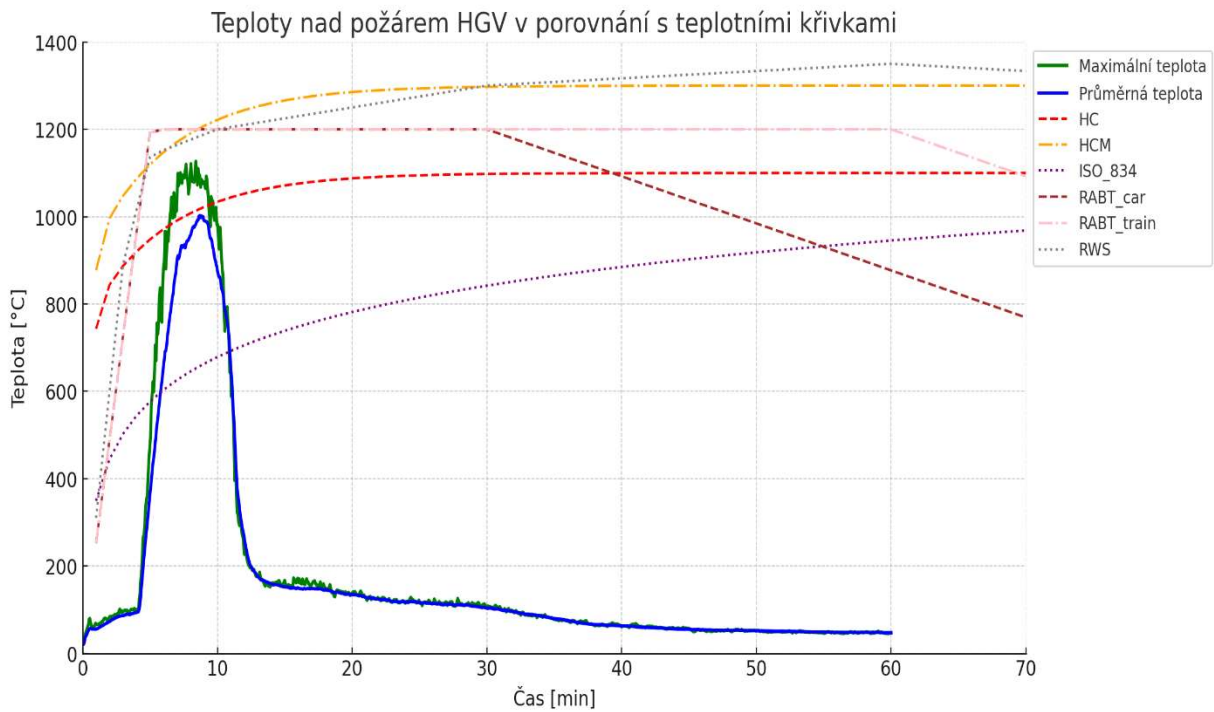
Obr. 47 Teploty nad požárem BUS v porovnání s teplotními křivkami



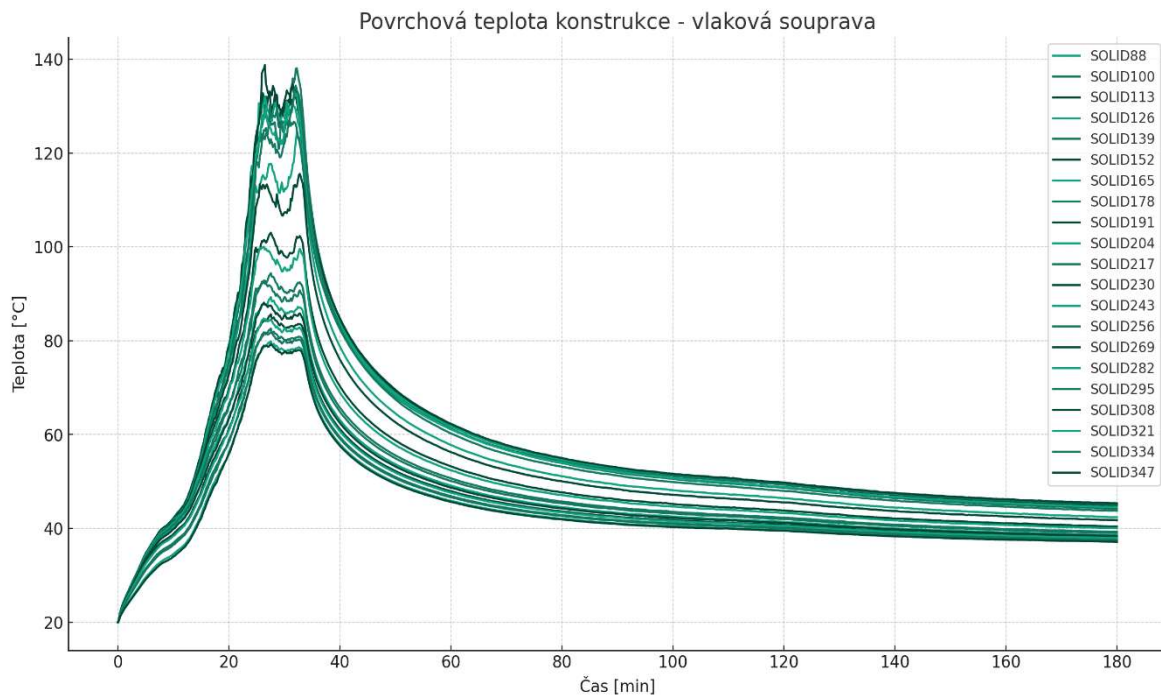
Obr. 46 Povrchová teplota ostění nad požárem HGV



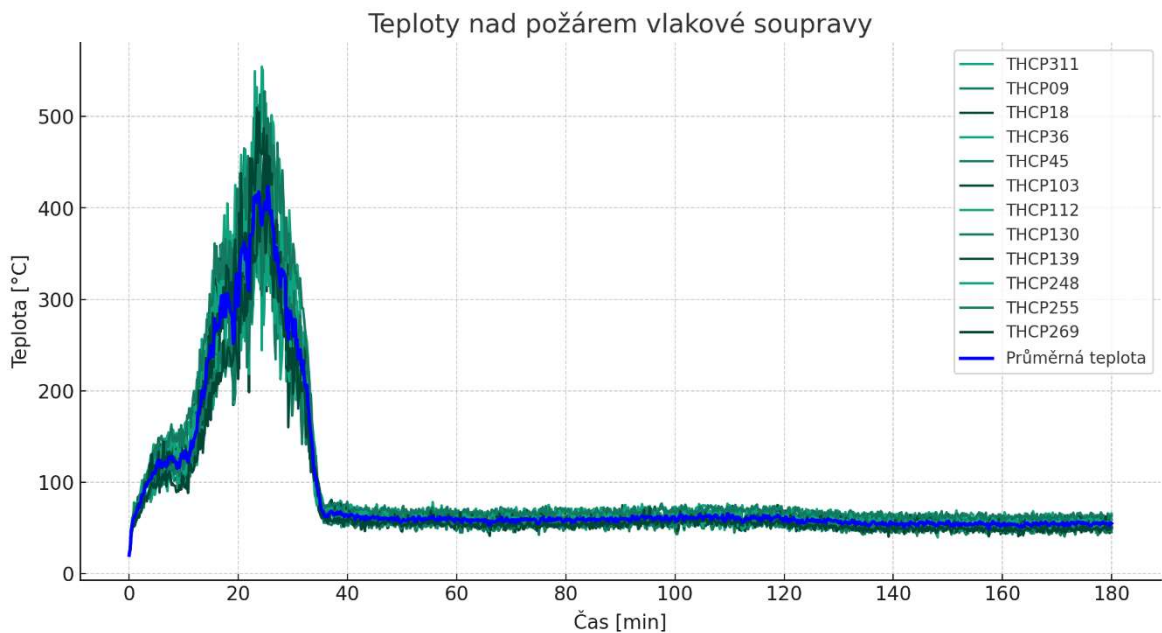
Obr. 48 Maximální teploty na požárem HGV



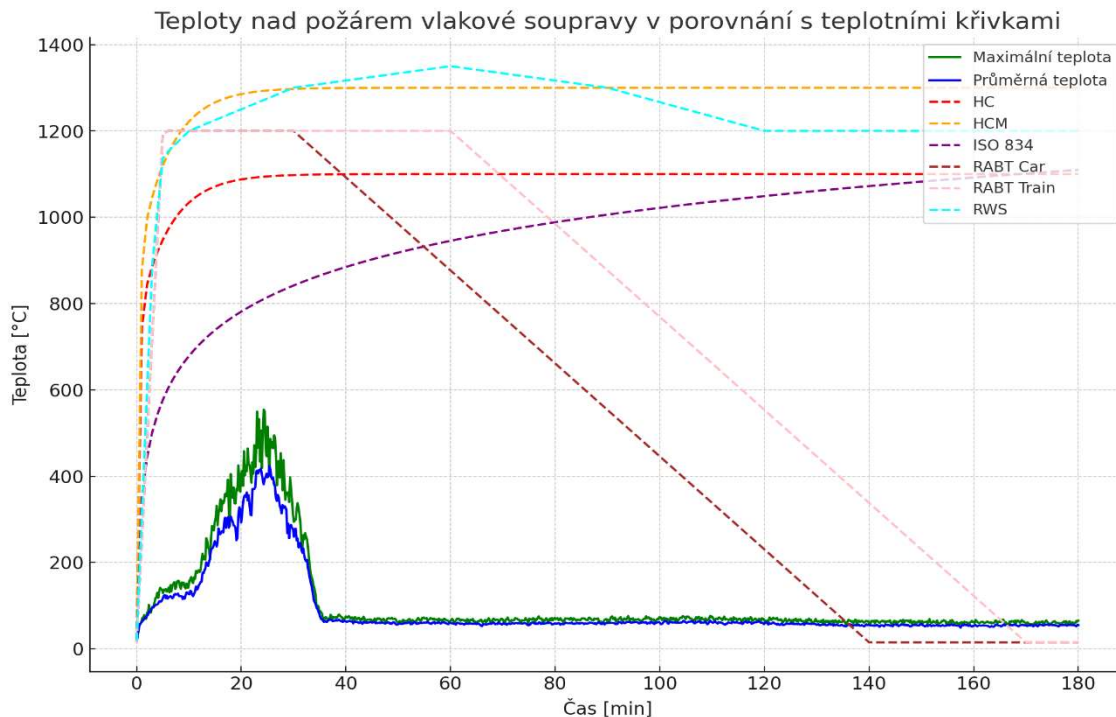
Obr. 49 Teploty nad požárem HGV v porovnání s teplotními křivkami



Obr. 50 Povrchová teplota ostění nad požárem vlakové soupravy



Obr. 51 Maximální teploty nad požárem vlakové soupravy

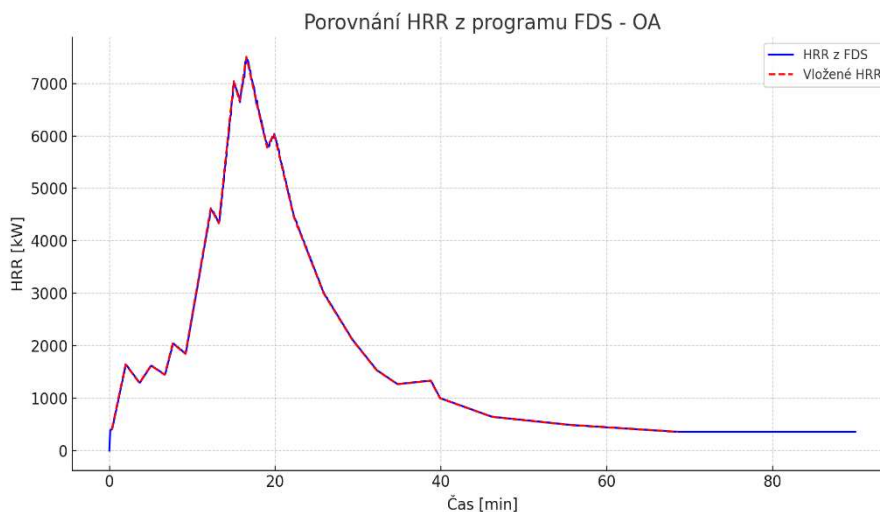


Obr. 52 Teploty nad požárem vlakové soupravy v porovnání s teplotními křivkami

### 5.4.2 Výstupy z druhé modelové situace

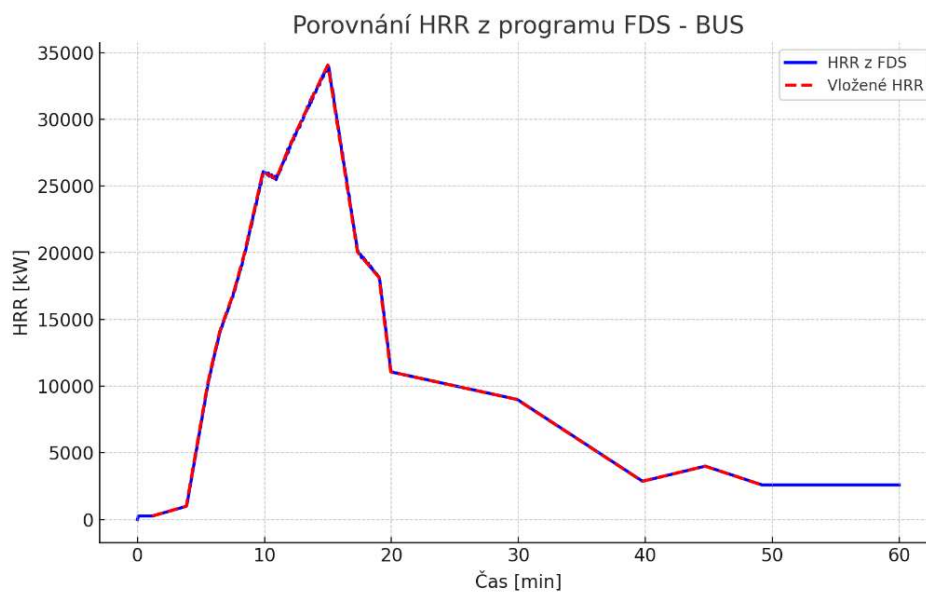
Druhá modelová situace představuje silniční i železniční tunel délky 500 m s prouděním vzduchu o rychlosti 3 m/s, ve kterých byl namodelován požár podle výše uvedených křivek HRR.

**Porovnání vstupních hodnot HRR s vypočteným HRR programem FDS:**

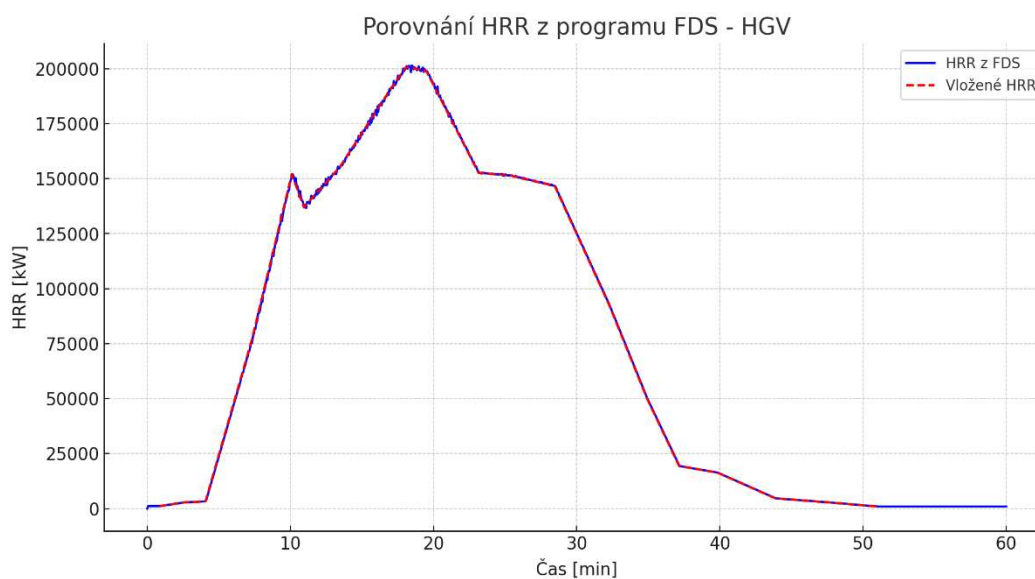


Obr. 53 Porovnání HRR při požáru s prouděním vzduchu – OA





Obr. 54 Porovnání HRR při požáru s prouděním vzduchu – BUS

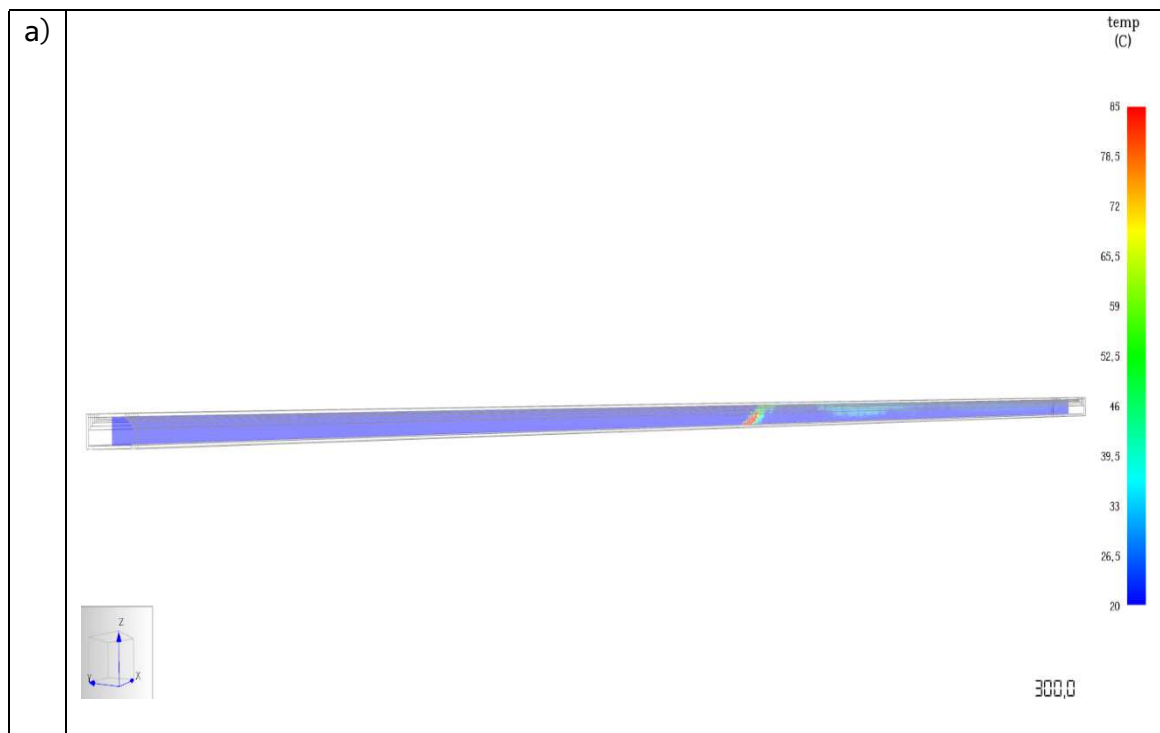


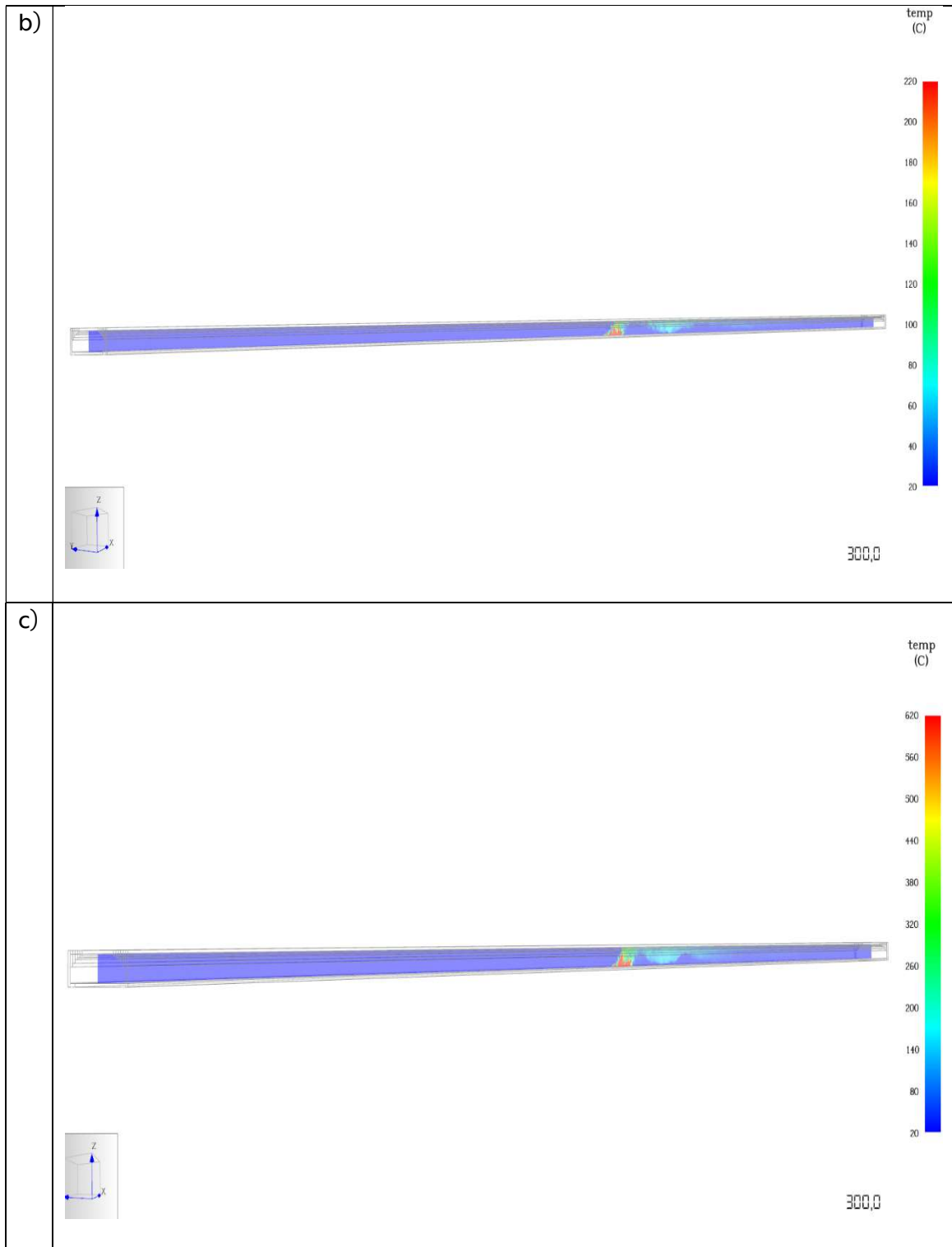
Obr. 55 Porovnání HRR při požáru s prouděním vzduchu – HGV

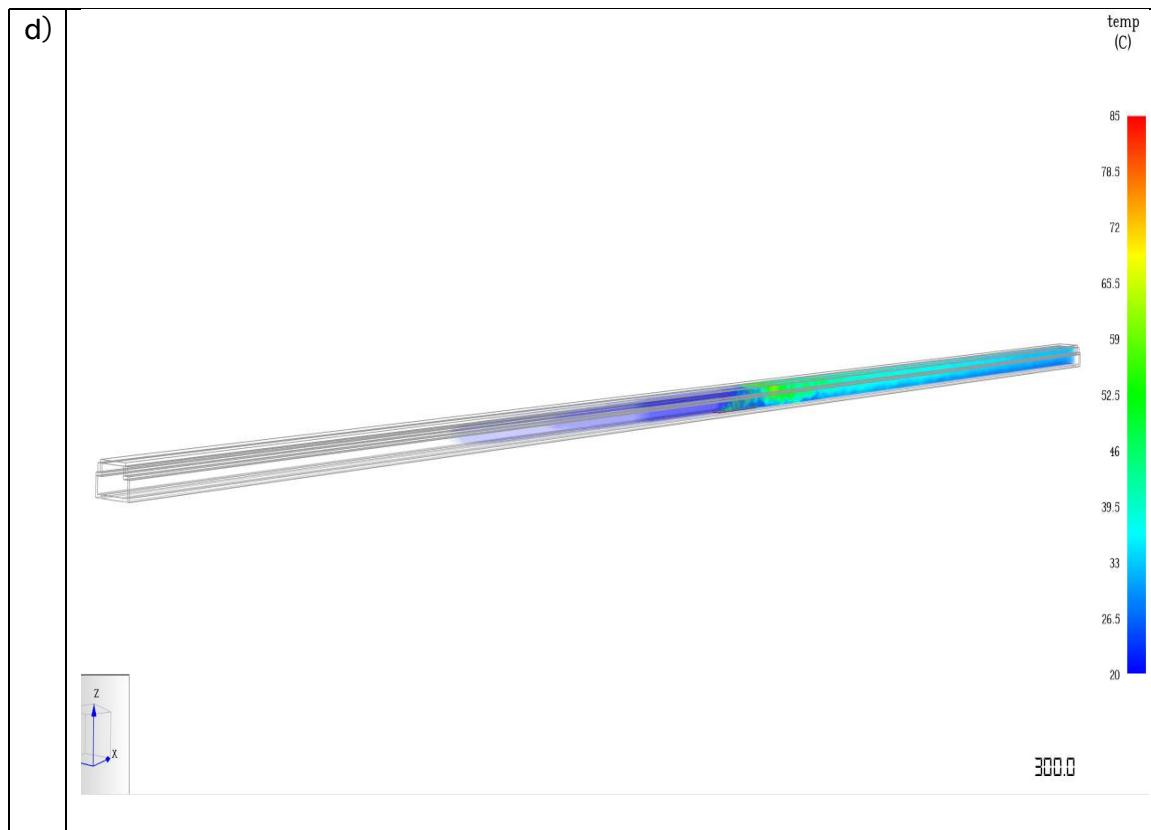


Obr. 56 Porovnání HRR z programu FDS – vlaková souprava

Grafické vykreslení teplot v čase 300 s:



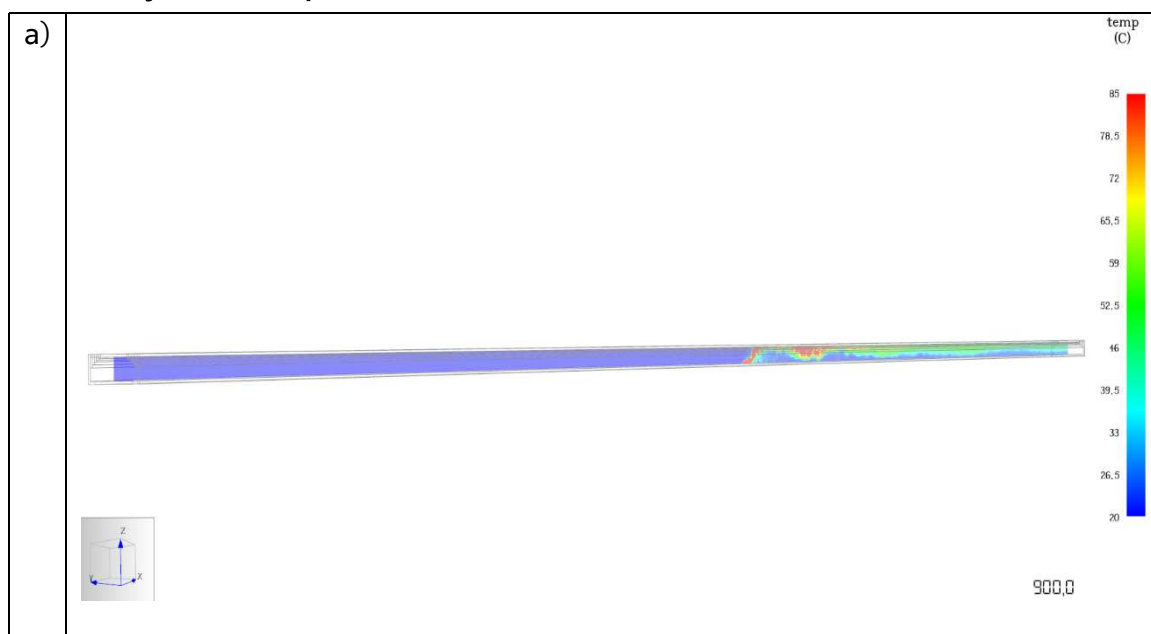


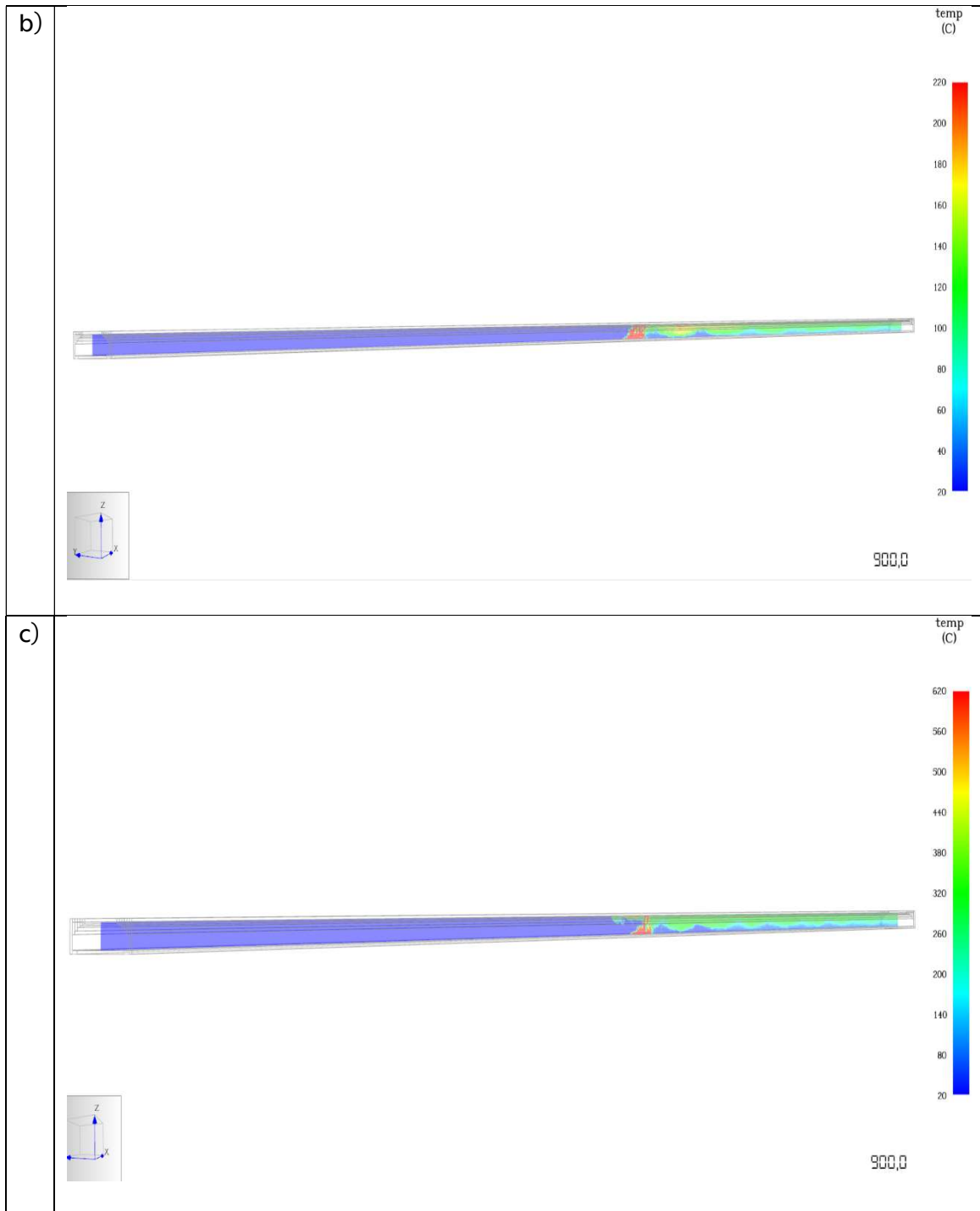


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 57 Grafické vykreslení teplot v čase 300 s

Grafické vykreslení teplot v čase 900 s:

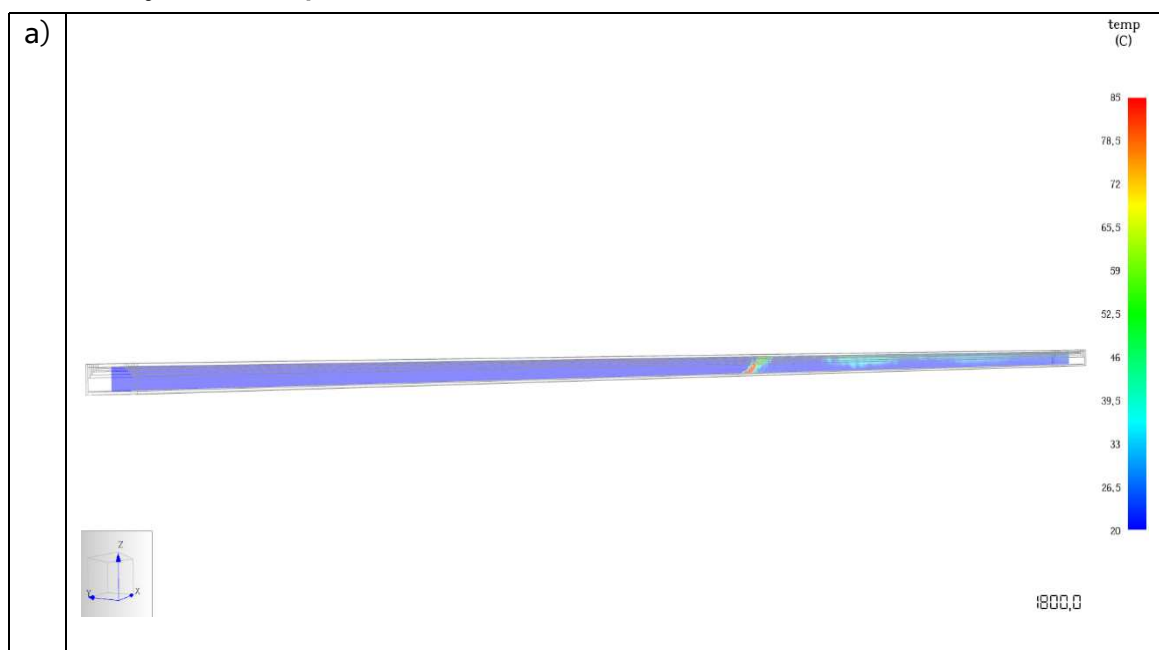


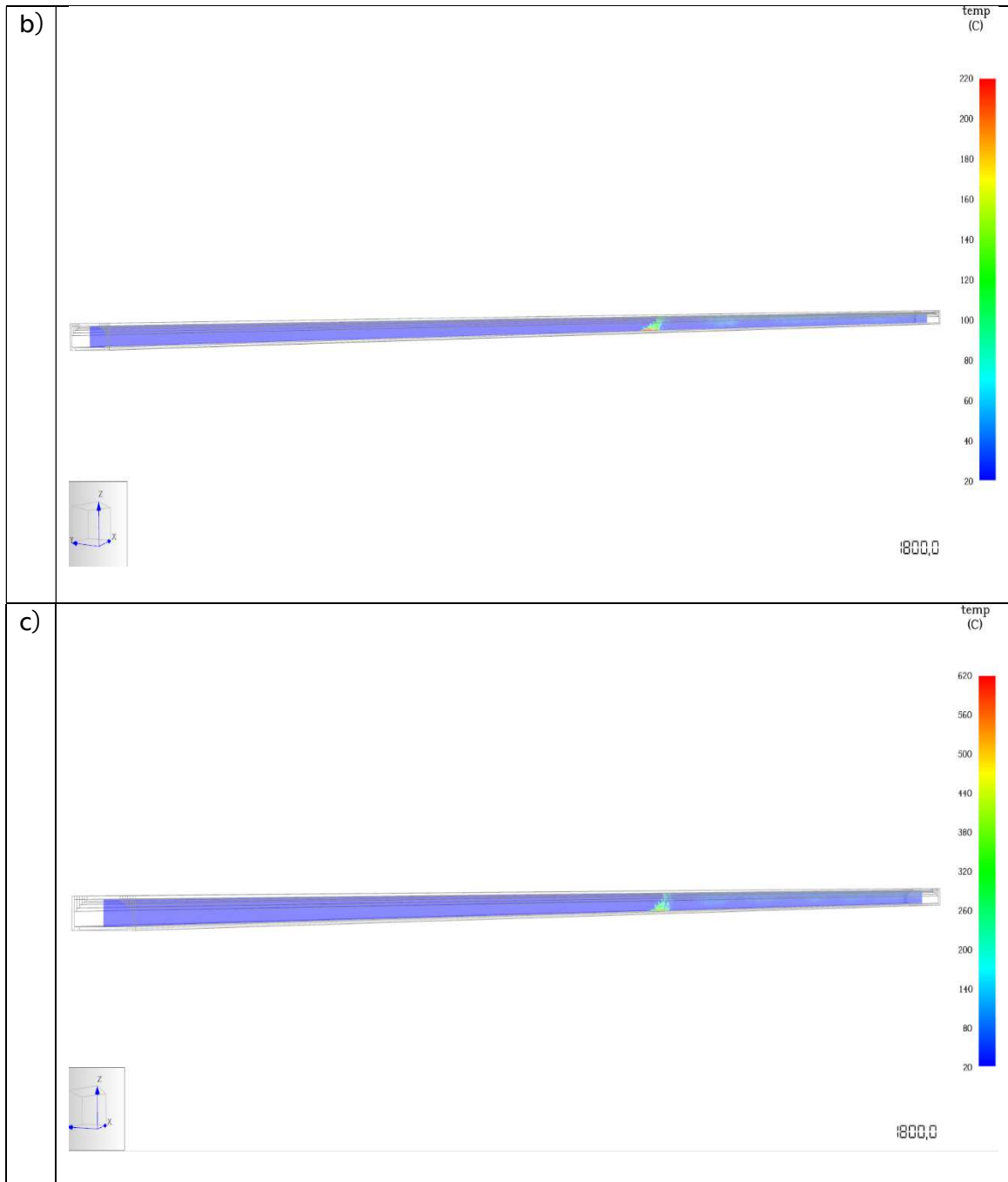


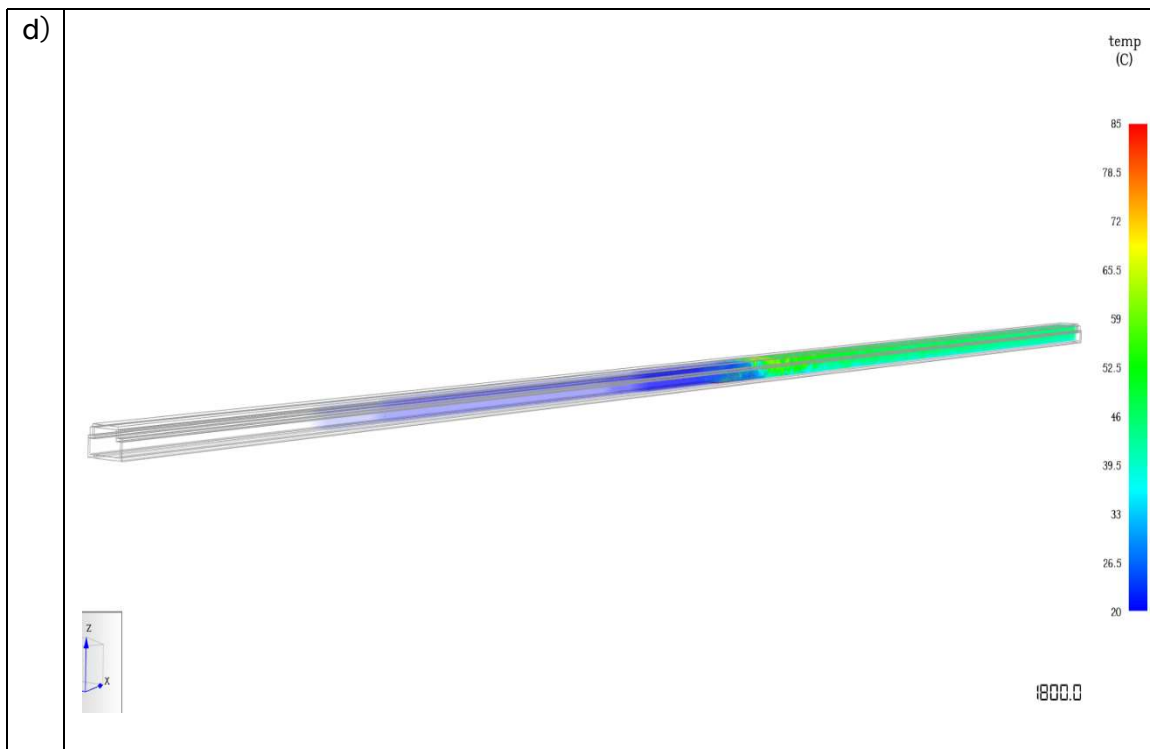


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

### Grafické vykreslení teplot v čase 1800 s:



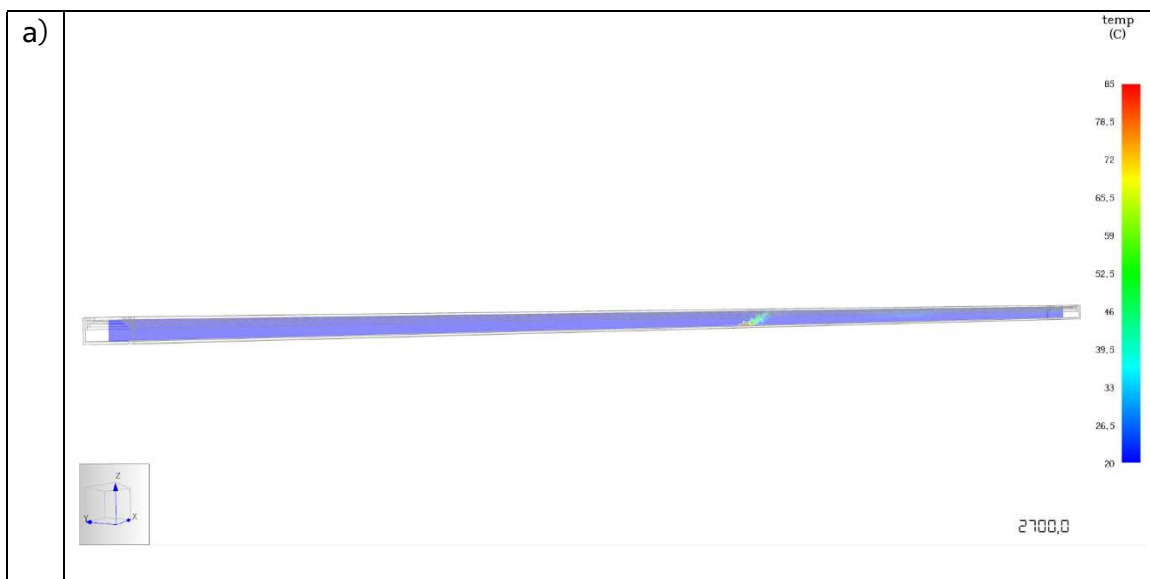




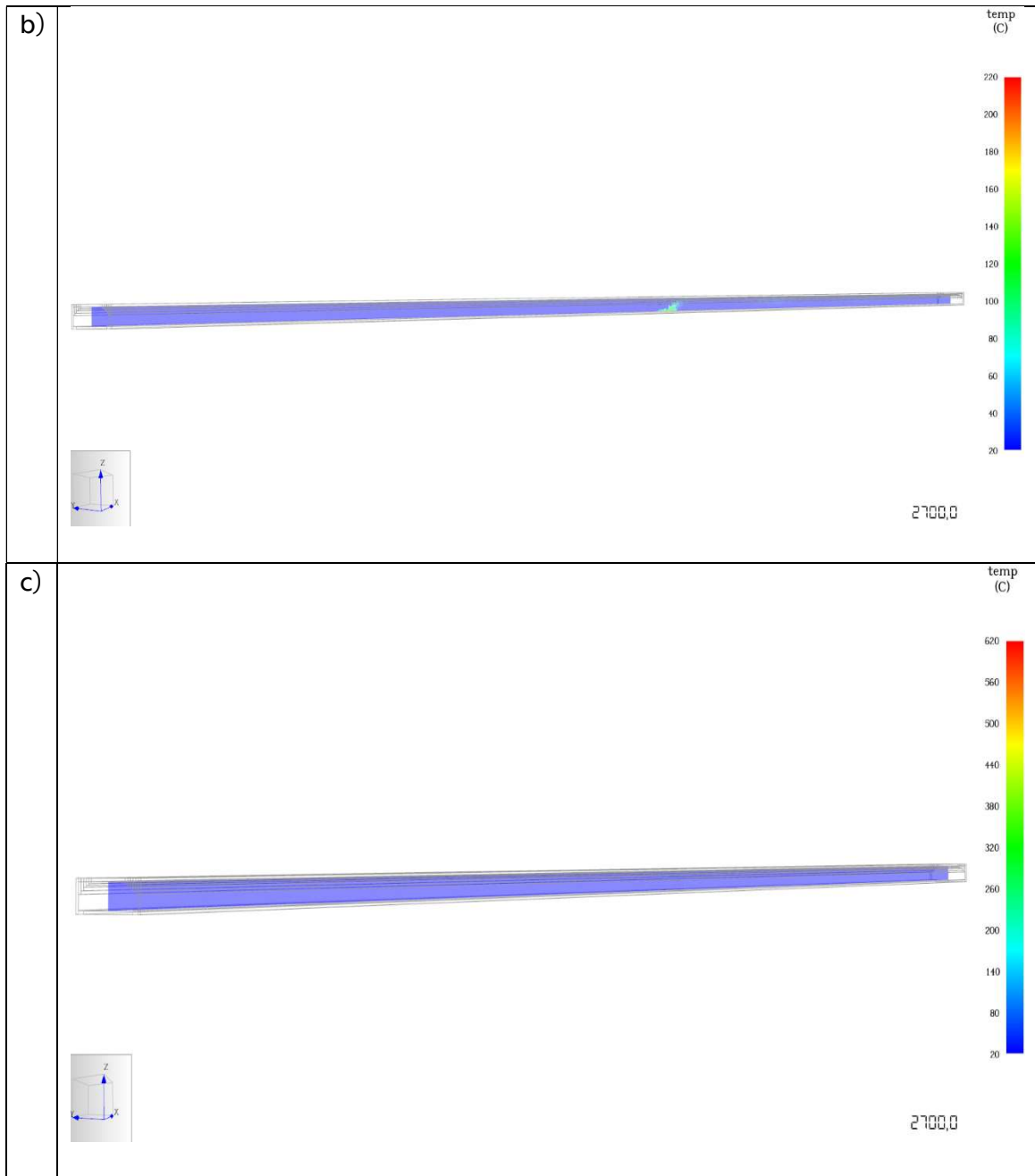
Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

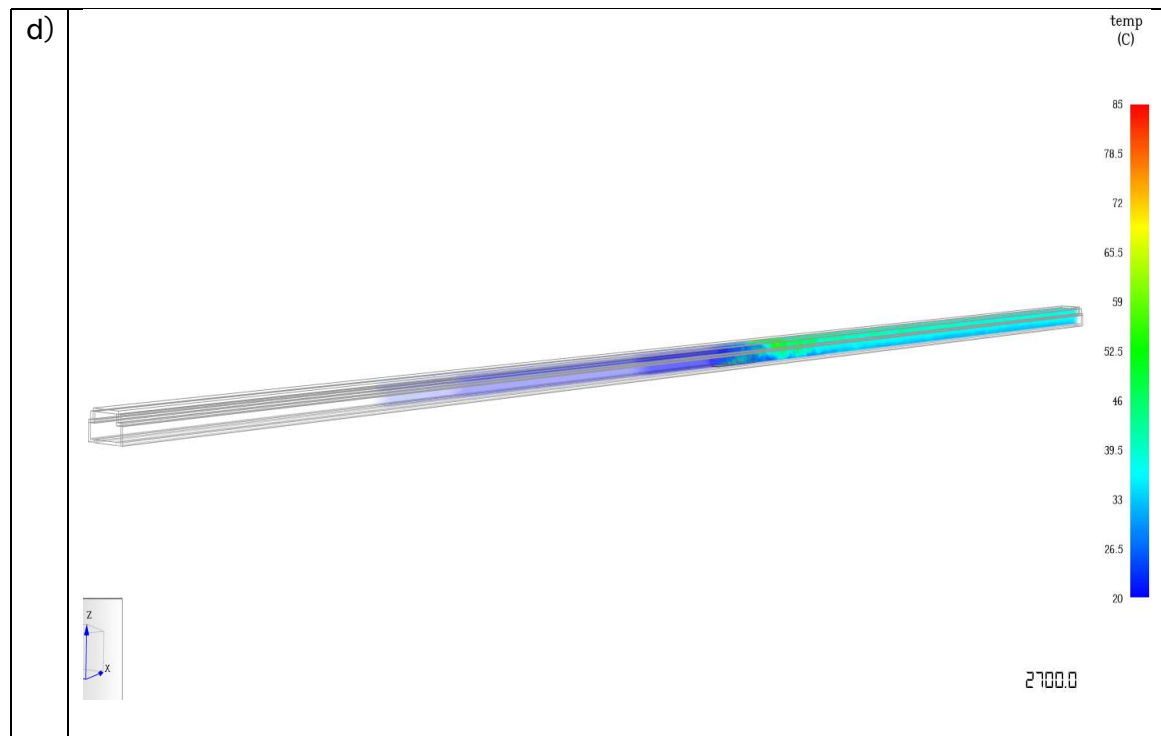
Obr. 59 Grafické vykreslení teplot v čase 1800 s

Grafické vykreslení teplot v čase 2700 s:







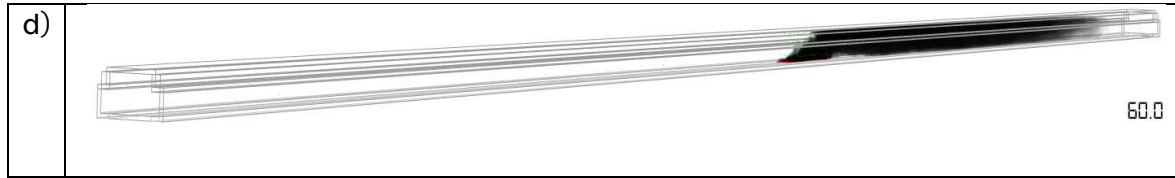


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 60 Grafické vykreslení teplot v čase 2700 s

### Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 60 s:

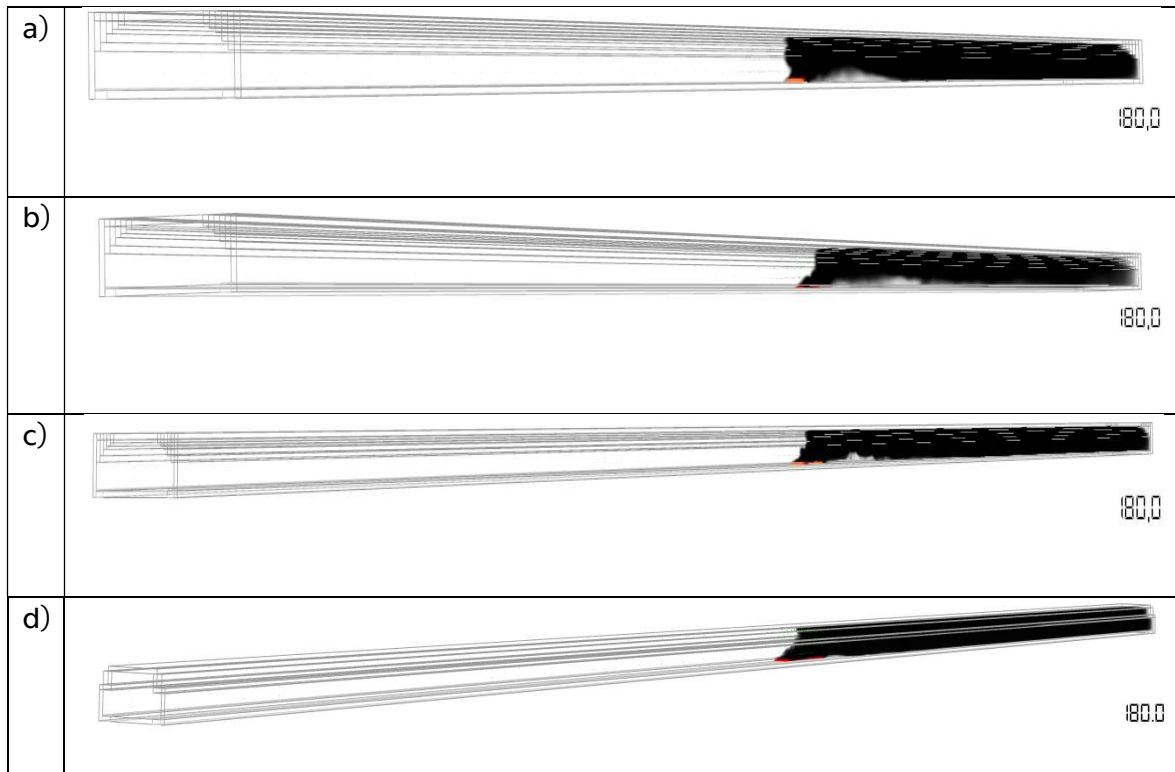




Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 61 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 60 s

**Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 180 s:**

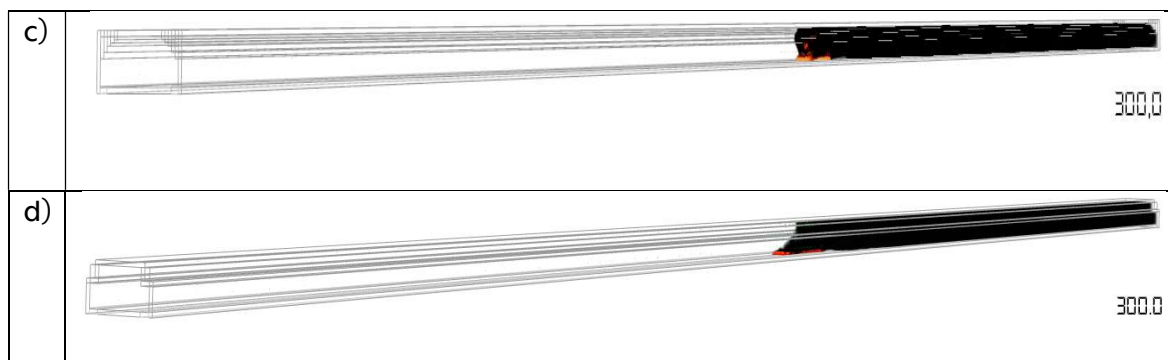


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 62 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 180 s

**Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 300 s:**





Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

Obr. 63 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 300 s

### Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 600 s:

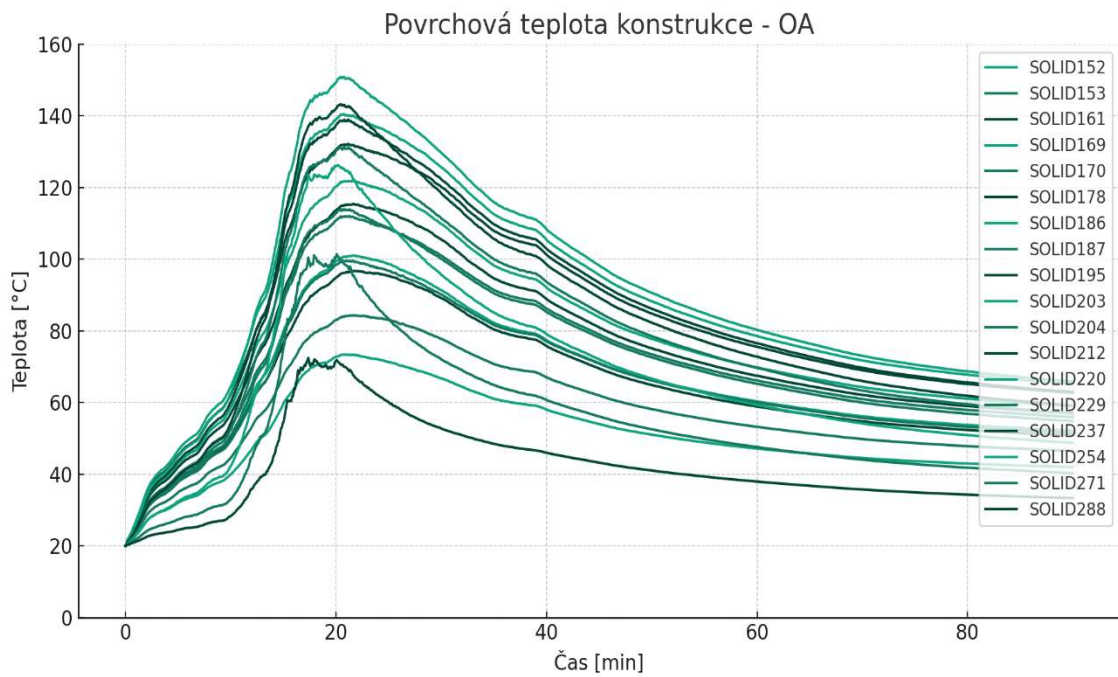


Pozn.: a) osobní automobil, b) BUS, c) HGV, d) vlaková souprava

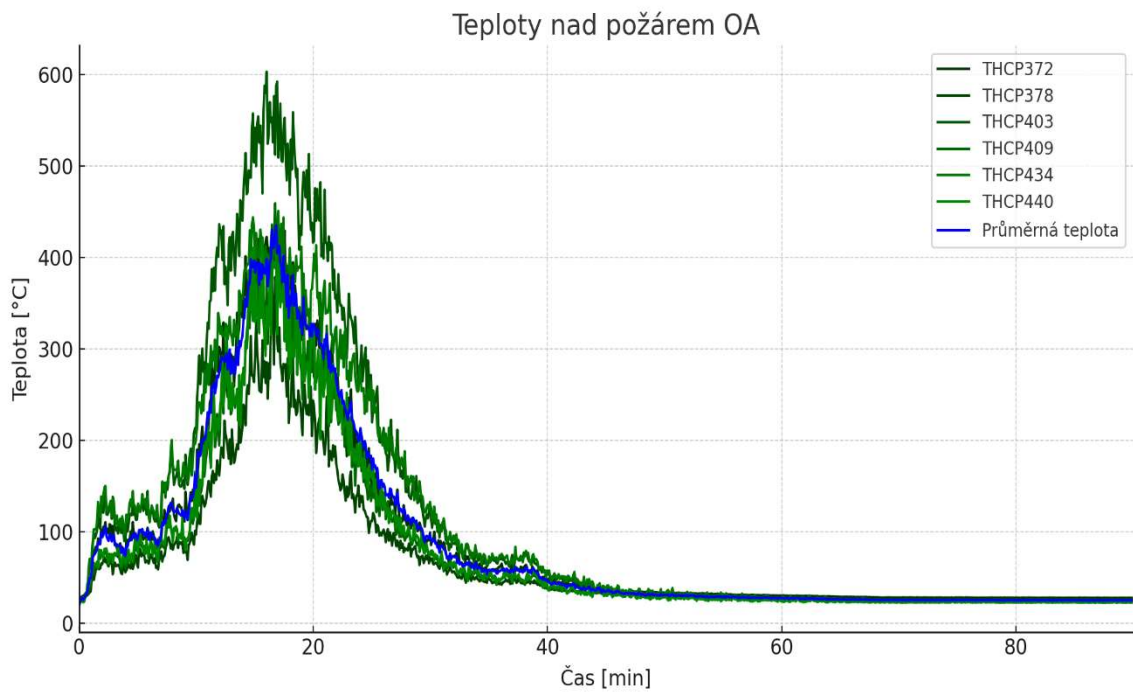
Obr. 64 Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 600 s



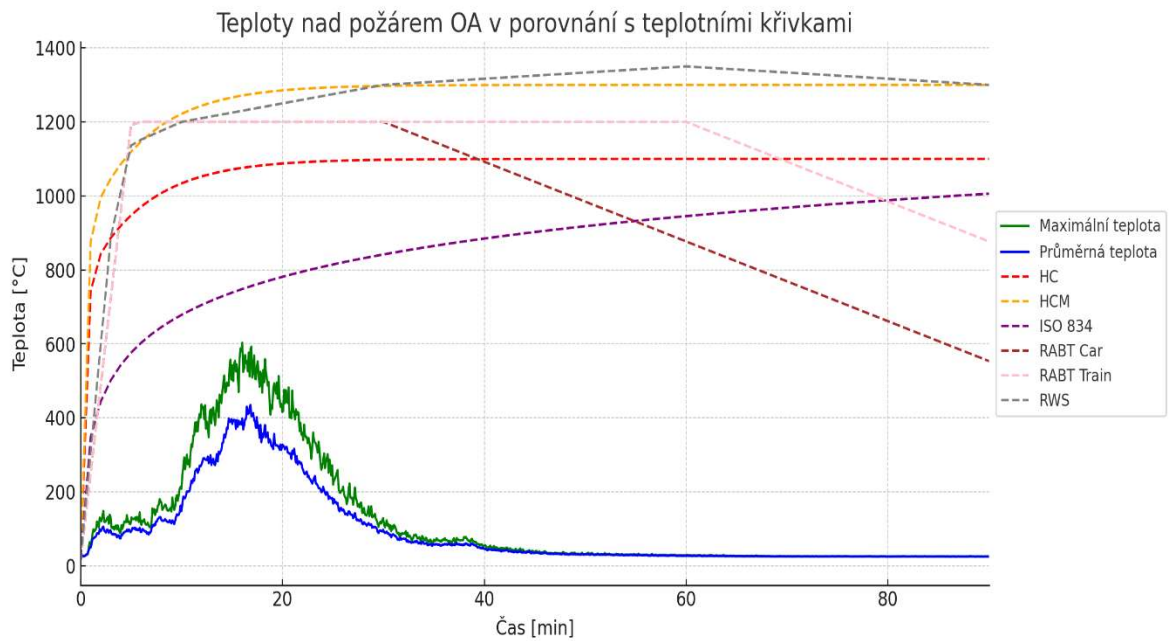
**Křivkové zobrazení teplot:**



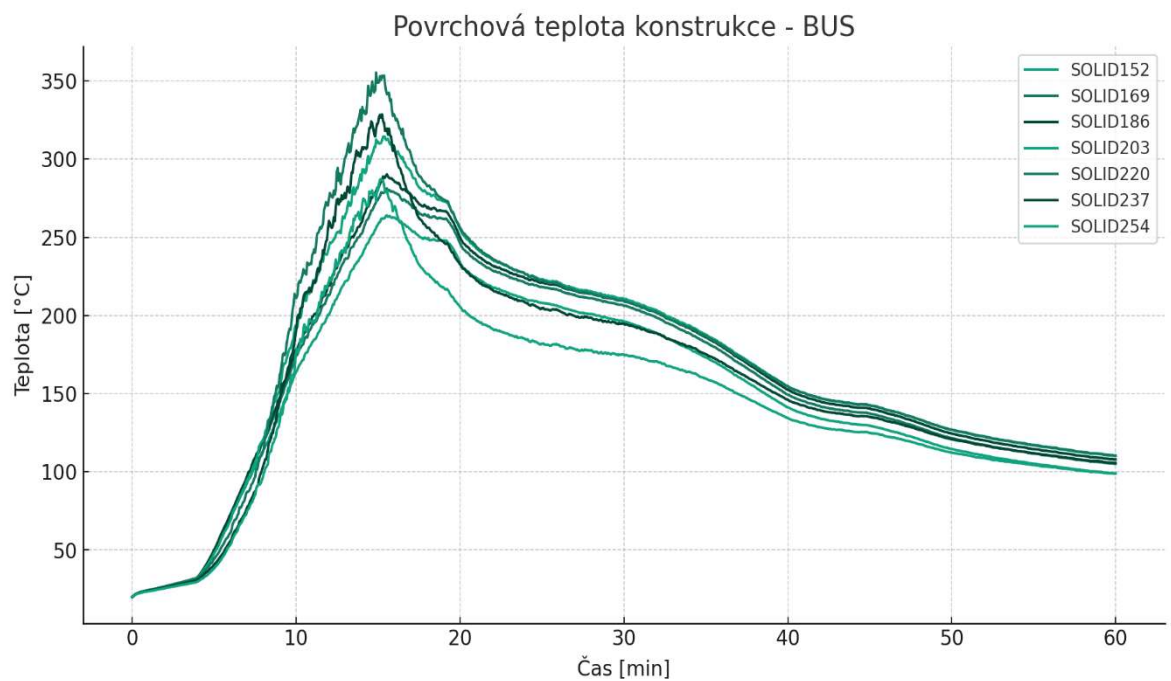
Obr. 65 Povrchová teplota ostění nad požárem OA



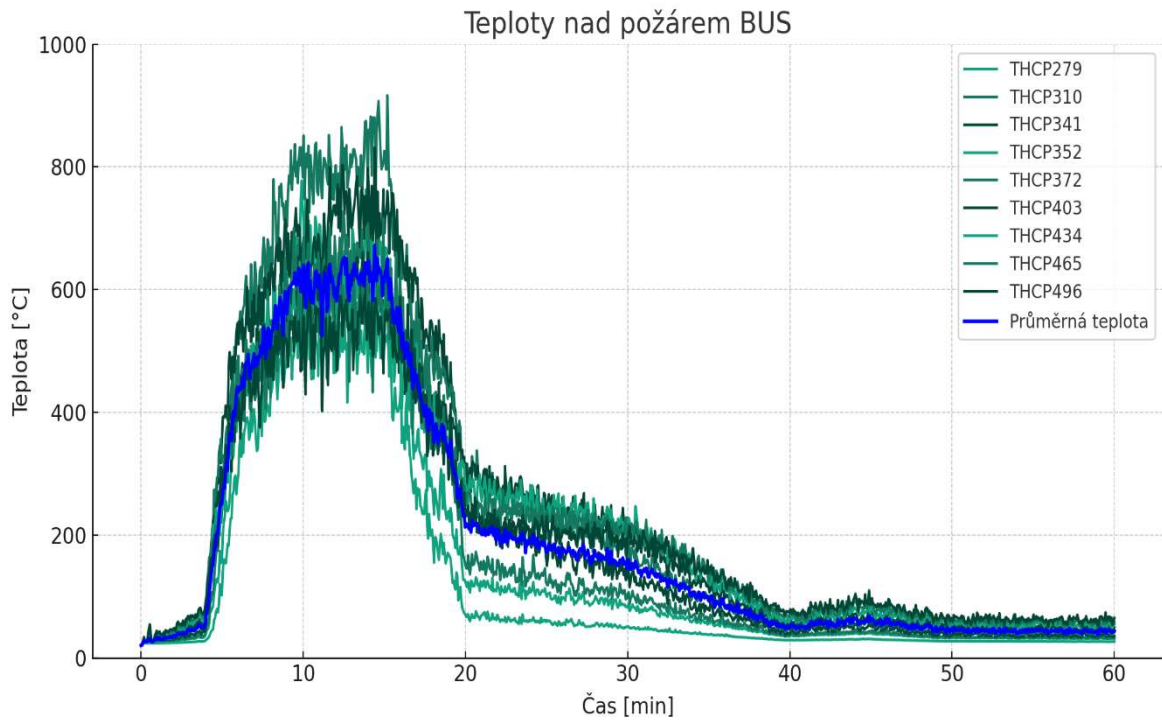
Obr. 66 Maximální teploty nad požárem OA



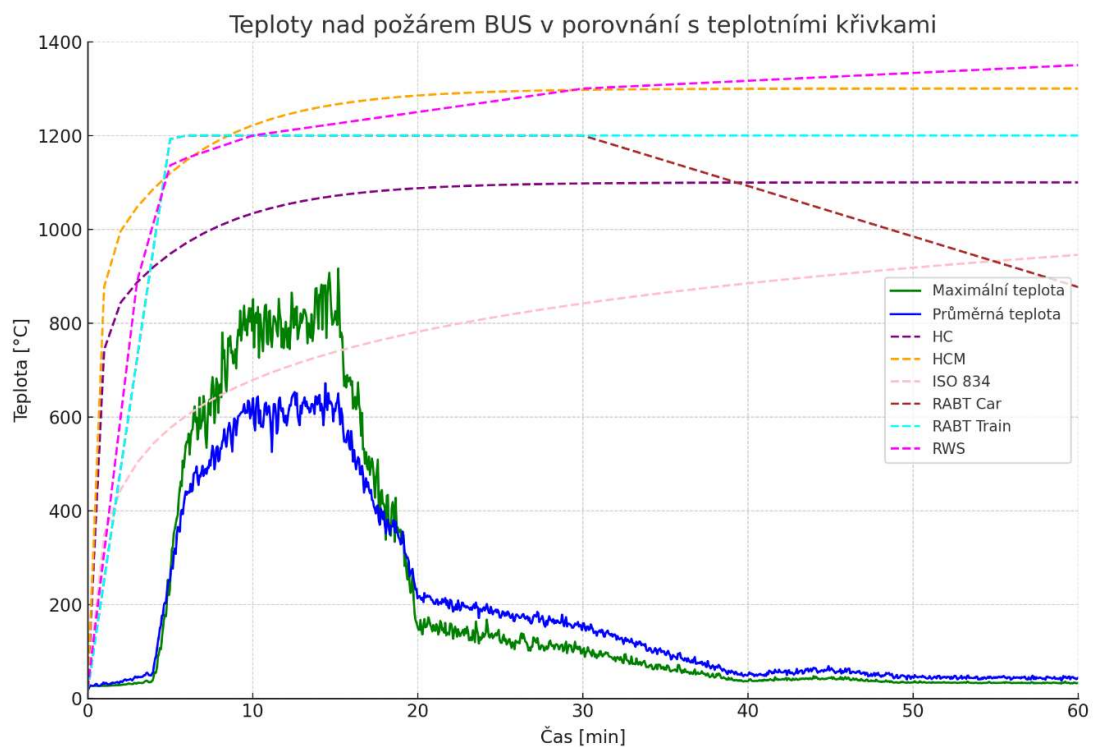
Obr. 67 Teploty nad požárem OA v porovnání s teplotními křivkami



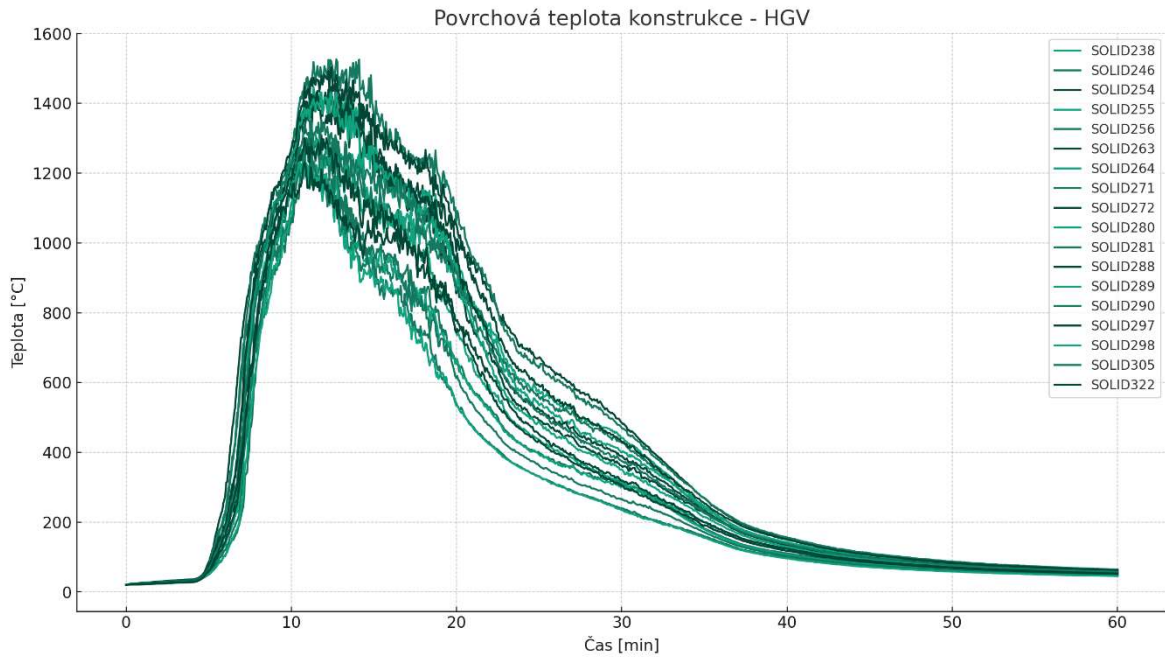
Obr. 68 Povrchové teploty ostění nad požárem BUS



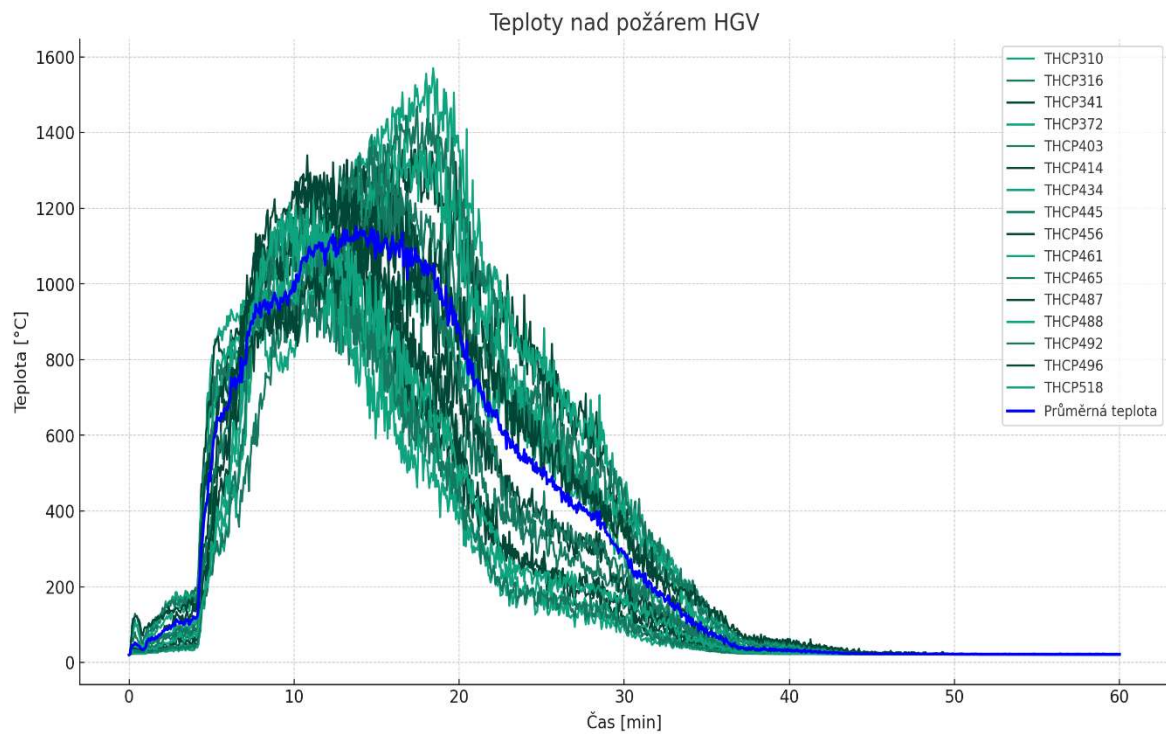
Obr. 70 Maximální teploty nad požárem BUS



Obr. 69 Teploty nad požárem BUS v porovnání s teplotními křivkami

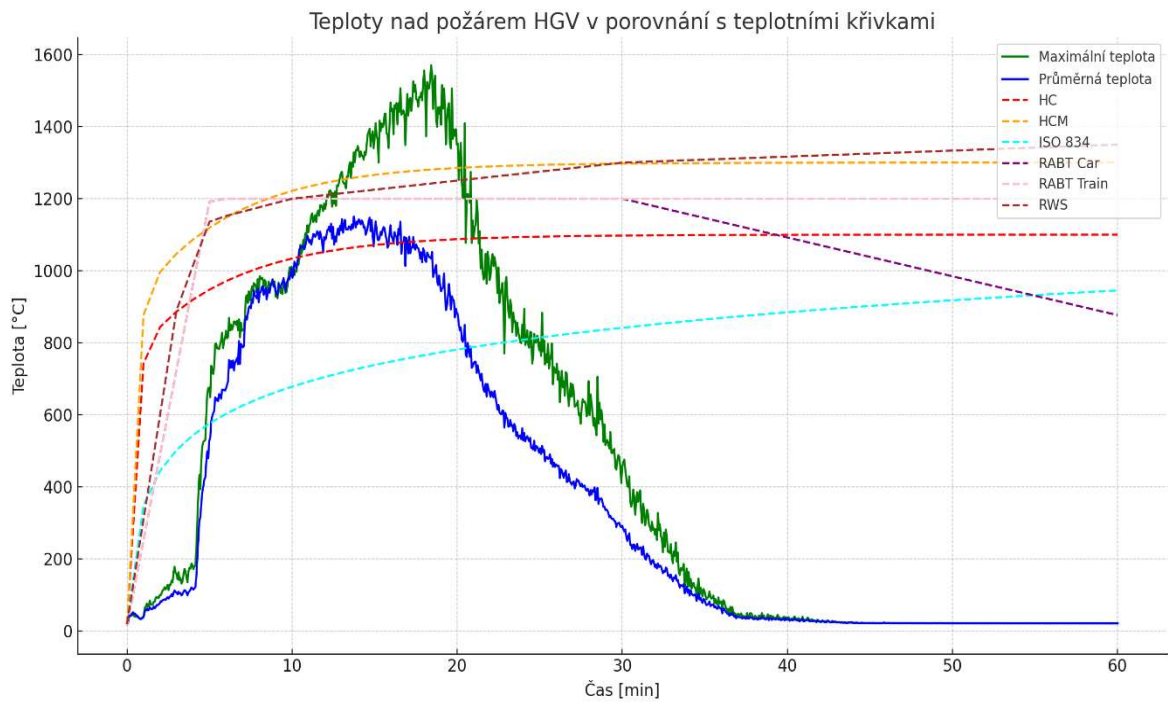


Obr. 71 Povrchové teploty ostění nad požárem HGV

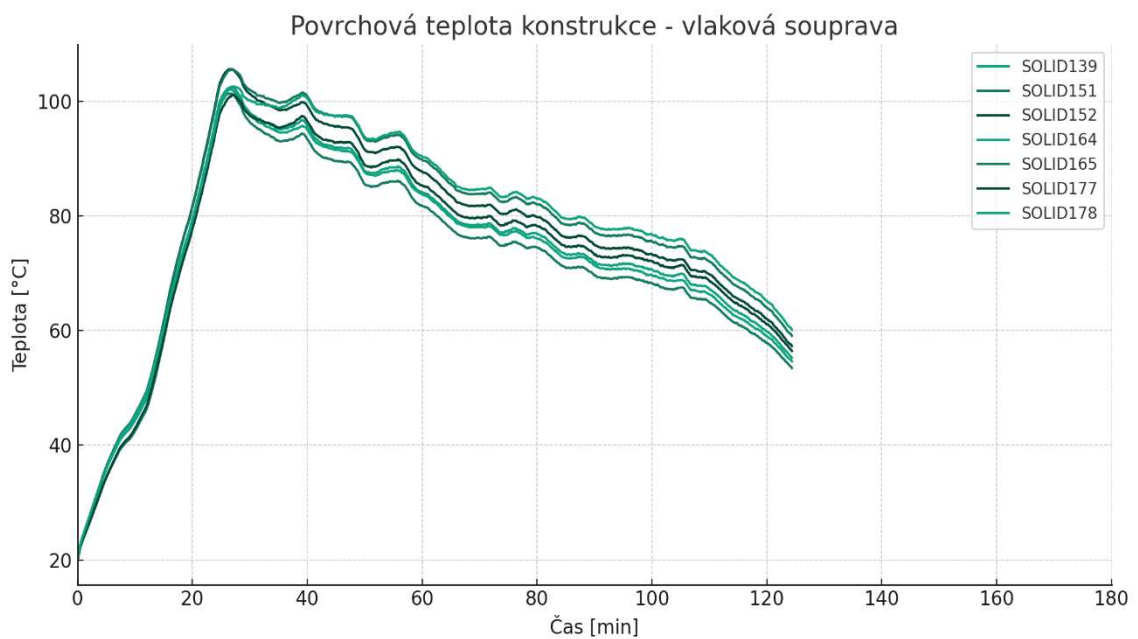


Obr. 72 Maximální teploty nad požárem HGV

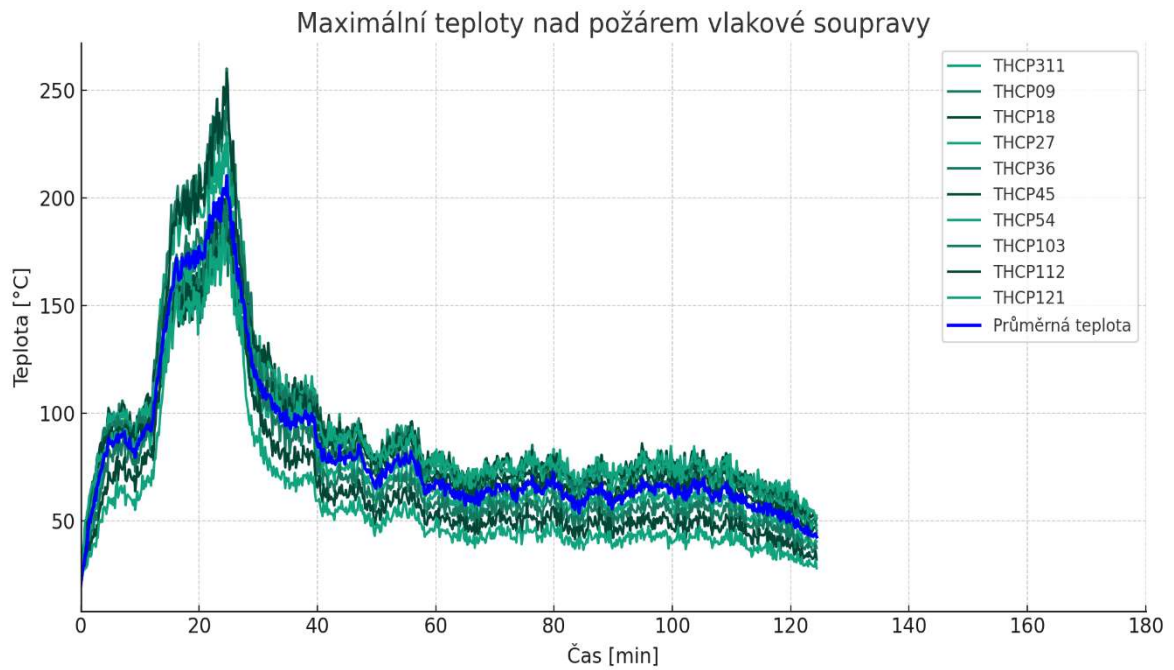




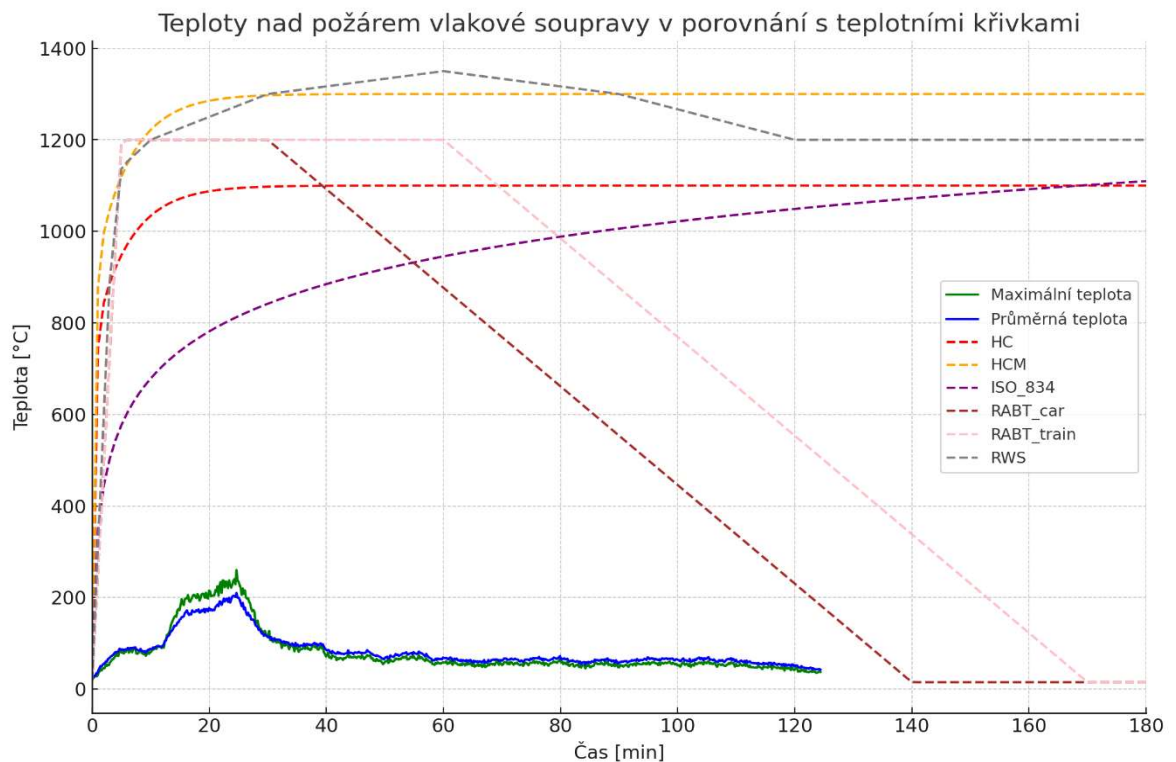
Obr. 73 Teploty nad požárem HGV v porovnání s teplotními křivkami



Obr. 74 Povrchové teploty ostění nad požárem vlakové soupravy



Obr. 75 Maximální teploty nad požárem vlakové soupravy



Obr. 76 Teploty nad požárem vlakové soupravy v porovnání s teplotními křivkami



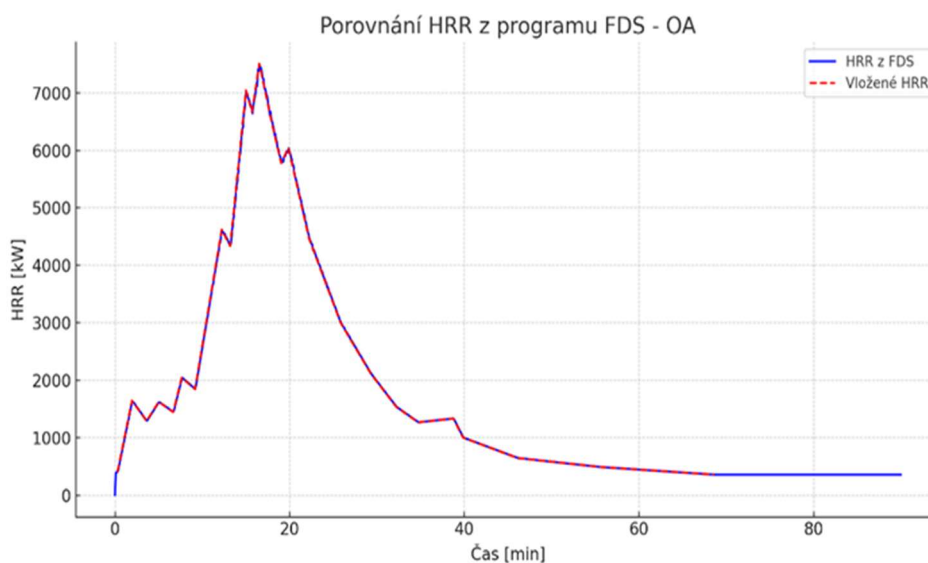
Z první modelové situace, požáru dopravních prostředků v tunelech s nulovým prouděním vzduchu je patrné, že se ve většině případů nepodařilo simulovat požár tak, jak byl definován křivkou HRR. Požár tedy nedosahoval maximálních hodnot, i když teploty vzduchu nad požárem dosahovaly vyšších hodnot než s větráním. Tato situace je při reálném požáru v tunelu nepravděpodobná, protože v tunelech bude vždy alespoň minimální proudění vzduchu.

Právě díky druhé modelové situaci s prouděním vzduchu v celé délce tunelu 3 m/s měl program FDS dostatek kyslíku pro výpočet celého požáru definovaným křivkou HRR pro všechny dopravní prostředky. Tím jsme získali mnohem vyšší hodnoty teplot zejména u požáru HGV, který dosahuje hranice 200 MW výkonu. Ale u ostatních se díky větrání teploty rozproudivly do prostoru a tím se prostor nad požárem ochlazoval oproti tunelu bez větrání.

Kvůli časové náročnosti výpočtů byl zpracován už jen jeden model požáru osobního automobilu s prouděním vzduchu v tunelu 5 m/s. Díky tomu získáme další porovnání pro posouzení teplot v tunelu v důsledku rychlosti proudění vzduchu.

### 5.4.3 Výstupy z třetí modelové situace

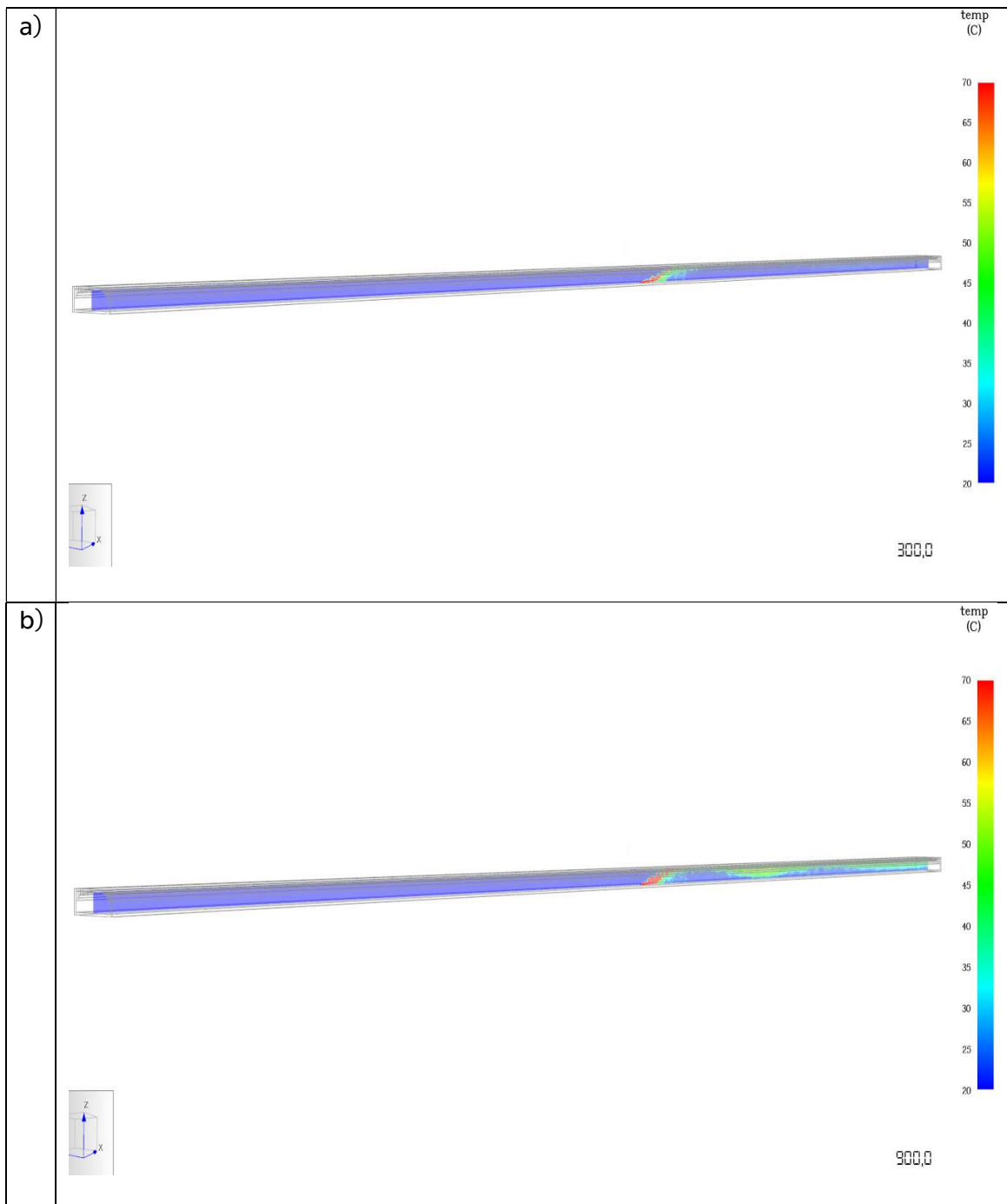
**Porovnání vstupních hodnot HRR s vypočteným HRR programem FDS:**

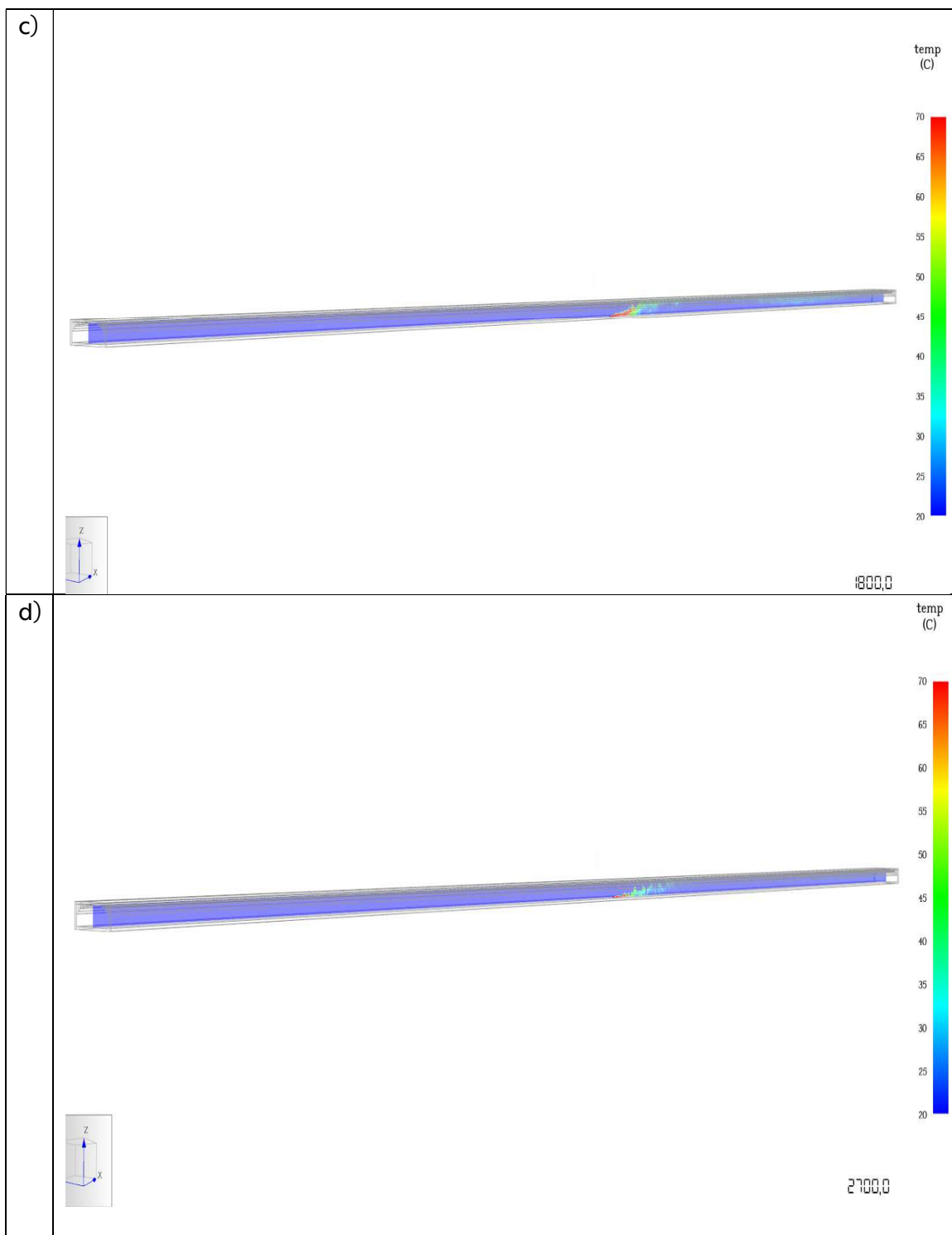


Obr. 77 Porovnání HRR z programu FDS – OA



Grafické vykreslení teplot:



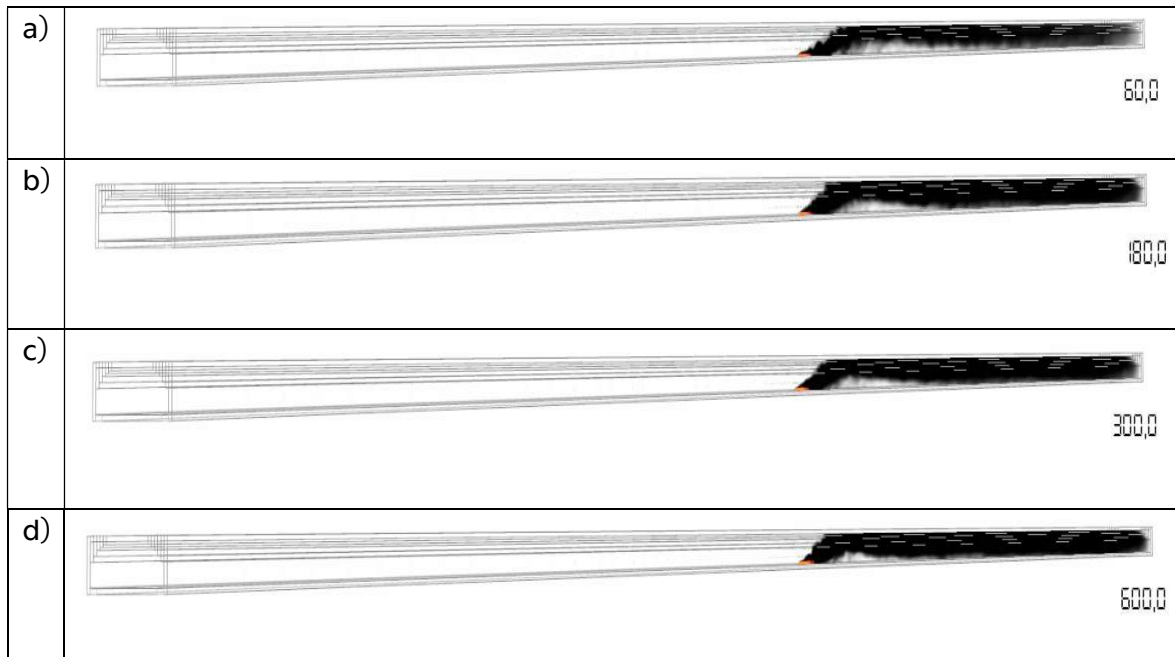


Pozn.: a) 300 s, b) 900 s, c) 1800 s, d) 2700 s

Obr. 78 Grafické vykreslení teplot požáru OA s větráním 5 m/s



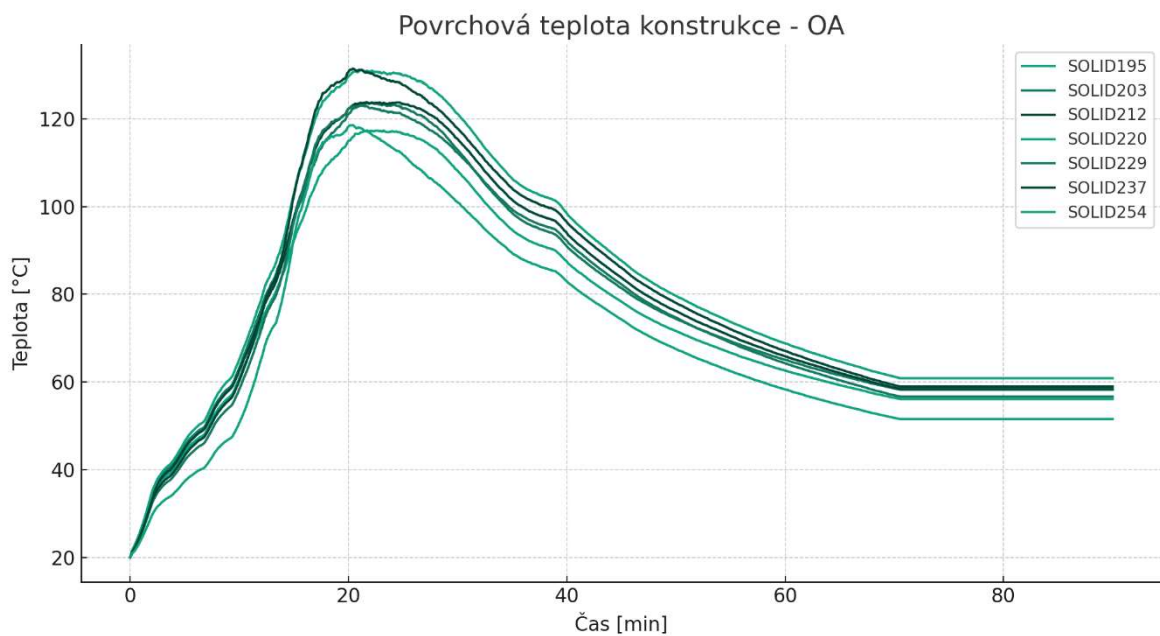
### Grafické vykreslení zakouření prostoru:



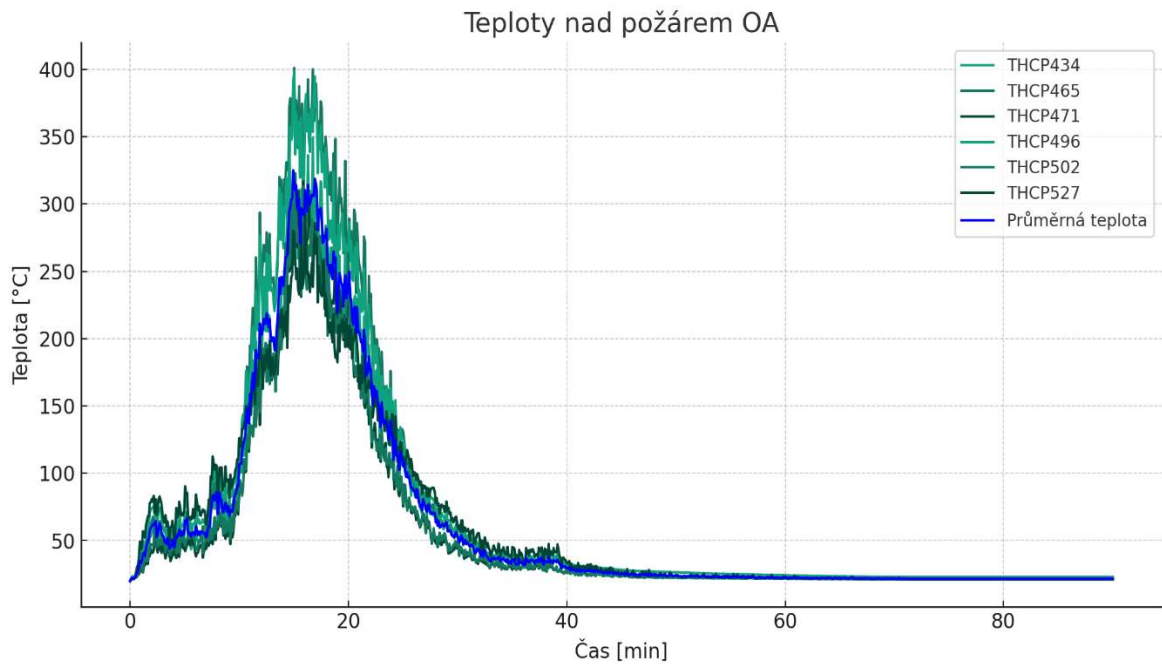
Pozn.: a) 60 s, b) 180 s, c) 300 s, d) 600 s

Obr. 79 Grafické vykreslení zakouření prostoru požáru OA s větráním 5 m/s

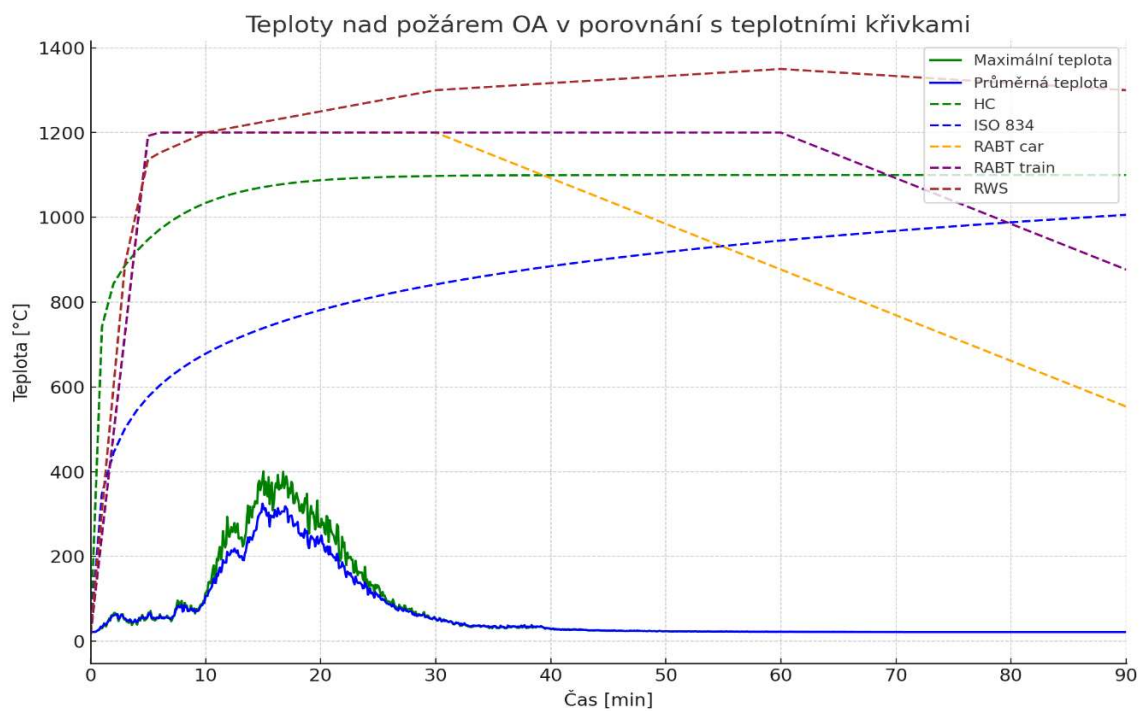
### Křivkové zobrazení teplot:



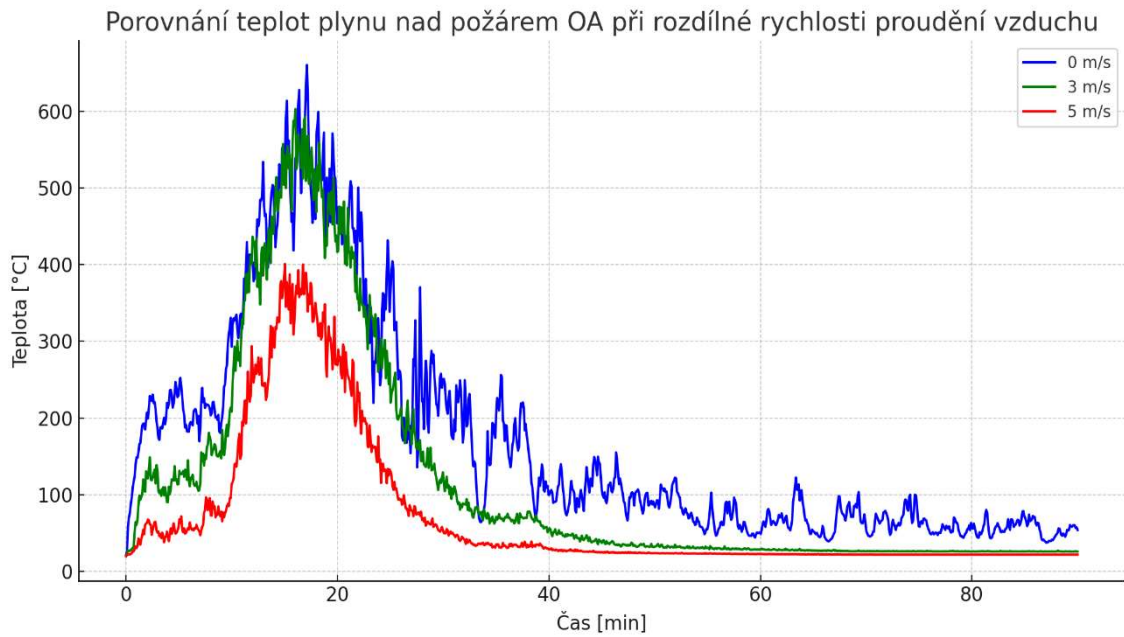
Obr. 80 Povrchová teplota ostění nad požárem OA



Obr. 81 Maximální teploty nad požárem OA

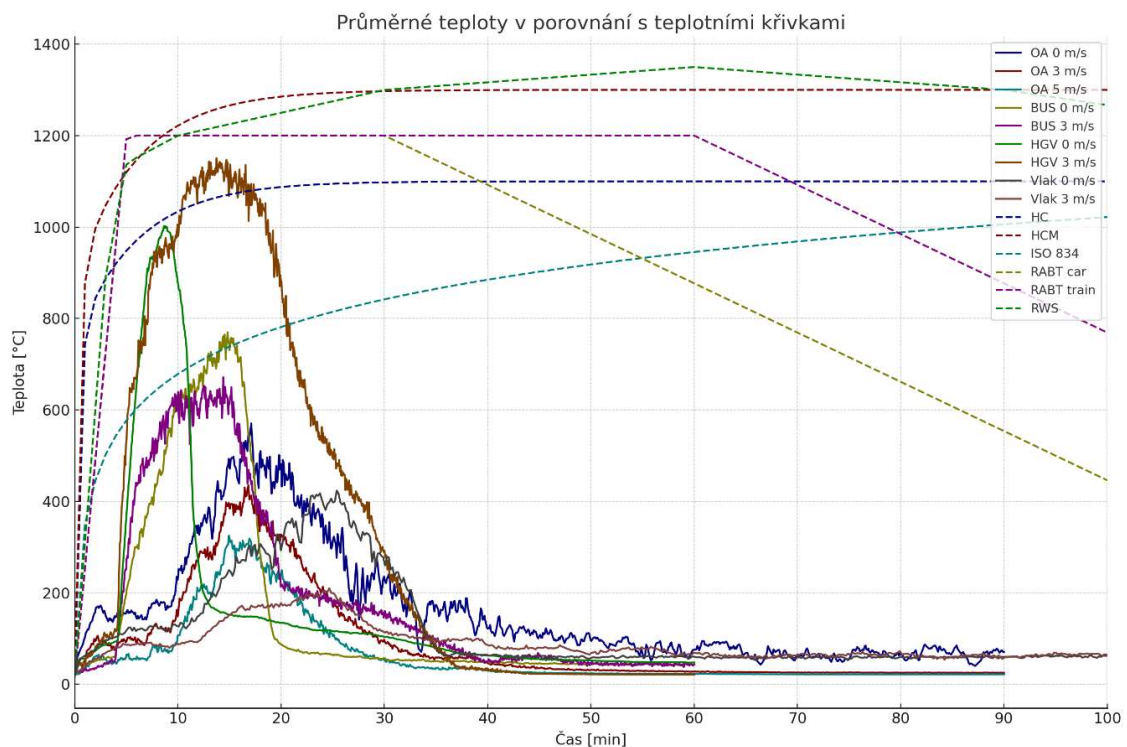


Obr. 82 Teploty nad požárem OA v porovnání s teplotními křivkami



Obr. 83 Porovnání teplot plynu nad požárem OA při rozdílné rychlosti proudění vzduchu

**Porovnání průměrných teplot nad požárem dopravních prostředků v porovnání s nominálními teplotními křivkami:**

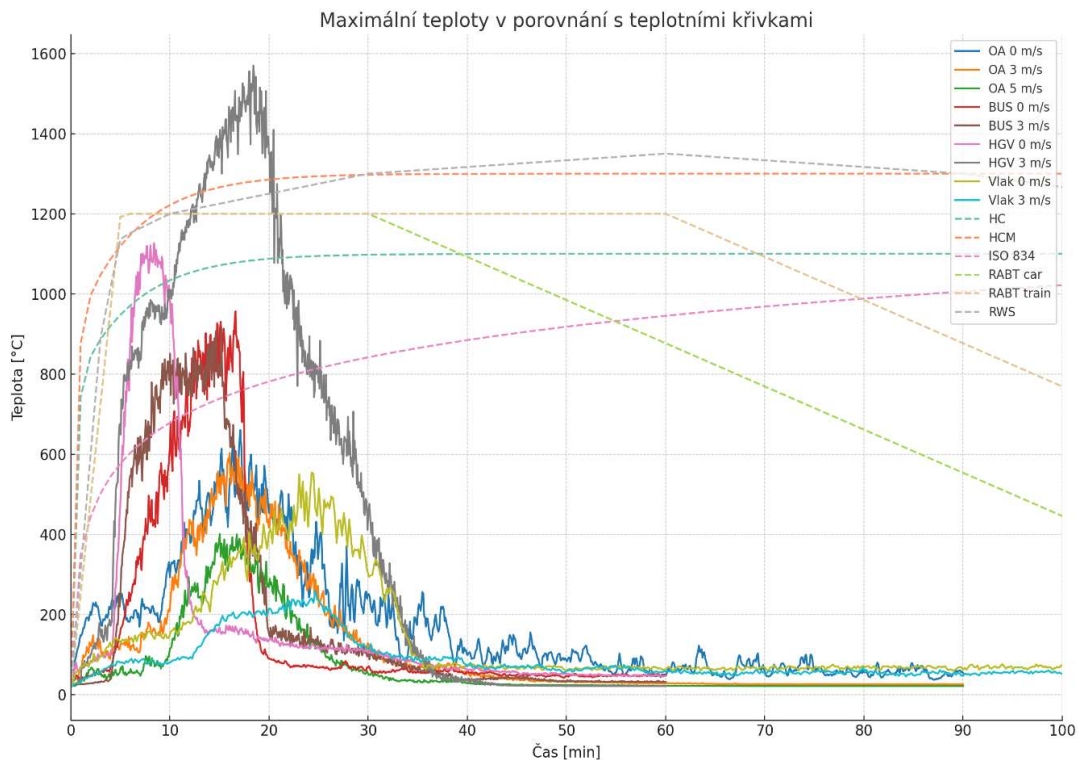


Obr. 84 Průměrné teploty v porovnání s teplotními křivkami

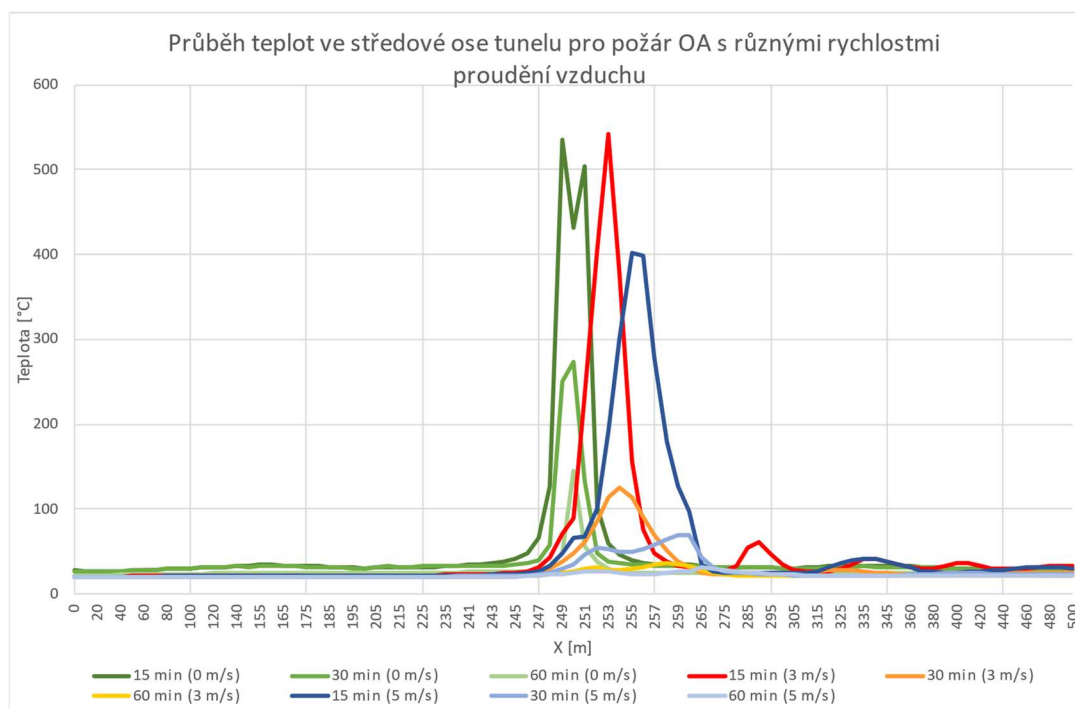




## Porovnání maximálních teplot nad požárem dopravních prostředků v porovnání s nominálními teplotními křivkami:



Obr. 85 Maximální teploty v porovnání s teplotními křivkami



Obr. 86 Průběh teplot v ose tunelu při požáru OA s různými rychlostmi proudění vzduchu



## 6. ZÁVĚR

V dnešní době je problematika bezpečnosti silničních i železničních tunelů stále předmětem intenzivní debaty, především v kontextu požární ochrany u složitějších a náročnějších staveb. Největším rizikem v tunelových stavbách jsou vysoké teploty a velmi rychlá tvorba kouře (zplodiny hoření) od požárů dopravních prostředků, zejména nákladních automobilů, které převážejí hořlavý materiál. Jak vysoké teploty, tak silné zakouření tunelové trouby ohrožuje všechny osoby v tunelu. Efektivní a správně navržená ventilační soustava dokáže výrazně snížit rizika spojená s přítomností kouře, ale tím přispívá přísunu kyslíku a požár může dosahovat většího tepelného výkonu, proto jsou na konstrukce tunelů kladeny vysoké bezpečnostní požadavky, které zahrnují také provádění požárních testů.

V první části diplomové práce bylo představeno dělení tunelových objektů ať už z konstrukčního hlediska na ražené a hloubené tunely, tak dělení podle typu provozu na silniční a železniční. V tomto dělení byla celá práce zachována a dále se věnovala například porovnání bezpečnostních požadavků v těchto tunelech. Jak je v práci popsáno na silniční tunely jsou kladeny přísnější bezpečnostní požadavky, protože provoz v silničních tunelech je nepředvídatelný, mezitím na železnicích, a tedy i v železničních tunelech je provoz více monitorován a automatizován. Z historie požárů v tunelech je také patrné, že daleko větší počet byl v silničních tunelech.

V další části diplomové práce jsou popsány modely požáru a jejich využití. Fyzikální modely představují klíčový přístup k pochopení principů dynamiky požáru a jsou základem pro řešení mnoha problémů v různých inženýrských oborech. Dalšími významnými modely jsou matematické modely požáru. Které se díky rozvoji počítačových technologií a softwaru rozvíjejí. Matematické modely umožňují efektivně a s vysokou mírou přesnosti modelovat různé scénáře, jako je šíření kouře a tepla, evakuace osob, ale mají své využití i při vyšetřování příčin požárů. Mezi matematické modely požáru patří i tzv. zjednodušené modely požáru, teplotní křivky, které mají široký rozsah použití při posuzování požární bezpečnosti. Teplotních křivek pro navrhování je v dnešní době několik a není žádný předpis který by doporučoval jejich použití, právě v závislosti na druhu tunelu.

Diplomová práce se především zaměřila na modelování požáru v tunelech pomocí zpřesněných výpočetních modelů a porovnání se zjednodušenými modely požáru, teplotními křivkami používaných v tunelových stavbách. V práci byly vymodelovány dva druhy tunelů – silniční a železniční podle základních rozměrů v platných českých normách. K modelování byl využit program FDS a grafické rozhraní Pyrosim.

Do středu obou tunelů bylo vloženo několik dopravních prostředků, které se v tunelech běžně vyskytují a následně pomocí vložených křivek rychlosti uvolňování tepla (HRR) program modeloval požár.

Z výsledků je patrné, že v tunelu při nulovém proudění vzduchu došlo k uhašení požárů velkých výkonů významně dříve kvůli nedostatku kyslíku. Ale teploty plynů zejména u osobního automobilu dosahovaly vyšších hodnot. Je jasné, že v reálných podmínkách bude v tunelu vždy alespoň nějaké proudění vzduchu. Proto byla vymodelována druhá situace požárů s rychlostí proudění vzduchu 3 m/s. Díky dostatečnému přísunu kyslíku proběhl celý požár podle vložených křivek HRR i u nákladního automobilu s nevyšším tepelným výkonem. Díky proudění vzduchu se mohl požár více rozvíjet a tím může docházet k přenosu na další možné zdroje požáru



v tunelu. Tím může docházet ke kombinaci těchto požárních scénářů a dalším velmi nepříznivým podmínkám jak pro konstrukci tunelu, tak i evakuaci a záchranných prací.

Protože každý dopravní prostředek vykazuje jiných hodnot HRR a jak bylo zmíněno, v tunelu může dojít i ke kombinaci několika požárních scénářů najednou, je v tuto chvíli nemožné doporučit pouze jednu nominální křivku pro navrhování. Navíc některé požáry i daleko překročili hranice teplotních křivek. Je ale zřejmé, že průměrným teplotám v první fázi požáru se nejvíce podobá uhlovodíková nominální teplotní křivka (HC), která ale nemá fázi ochlazování. Je ale potřeba si uvědomit jistou podobnost s fází ochlazování, kterou nejlépe popisují nominální křivky RABT car a RABT train. Vzhledem k tomu že požár ani jednoho dopravního prostředku nerval déle než 35 min je nominální teplotní křivka RABT car nejpodobnější, i když fáze ochlazování nemá takový teplotní spád jako u požárů dopravních prostředků.

Vzhledem k velké časové náročnosti lze na diplomovou práci navázat dalším výzkumem požárních scénářů v tunelech, zejména přenosu tepla na další dopravní prostředky a tím i možnému dalšímu nárůstu teplot. Dále zpřesněním modelů požáru a provést detailnější analýzu větrání pro určité typy tunelů.



## LITERATURA

- [1] HAUKUR INGASON, Haukur INGASON, Ying Zhen LI a Anders LÖNNERMARK. *Tunnel fire dynamics*. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2199-7.
- [2] *Tunnel fire testing and modeling*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-49516-3.
- [3] LI, Ying Zhen a Haukur INGASON. Overview of research on fire safety in underground road and railway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* [online]. 2018, **81**, 568–589. ISSN 08867798. Dostupné z: doi:10.1016/j.tust.2018.08.013
- [4] *Výroční zpráva SŽDC*. B.m.: Praha. 2022
- [5] KRATOCHVÍL, Václav, Šárka NAVAROVÁ a Michal KRATOCHVÍL. *Požární bezpečnostní zařízení ve stavbách: stručná encyklopedie pro jednotky PO, požární prevenci a odbornou veřejnost*. 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2011. ISBN 978-80-7385-103-3.
- [6] *Ražená a podzemní díla* [online]. [vid. 2023-12-23]. Dostupné z: <https://www.metrostav.cz/cs/nase-technologie/razena-a-podzemni-dila>
- [7] ANIMATO (WWW.ANIMATO.CZ), Studio. Provozované, realizované a projektované tunely na IV. železničním koridoru. *Časopis Stavebnictví* [online]. [vid. 2023-12-23]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-provozovane-realizovane-a-projektovane-tunely-na-iv.-zeleznicnim-koridoru.html>
- [8] ČSN 737507 - *Projektování tunelů pozemních komunikací*. Praha: Český normalizační institut. prosinec 2013. 52 s
- [9] ČSN 736100- *Názvosloví pozemních komunikací - Část 1: Základní názvosloví*. říjen 2008. 73 s
- [10] *TP\_154.pdf* [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: [https://pjk.rsd.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_154.pdf](https://pjk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_154.pdf)
- [11] *TP\_98.pdf* [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: [https://pjk.rsd.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_98.pdf](https://pjk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_98.pdf)
- [12] *Vyhláška č. 246/2001 Sb., Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci)*
- [13] STEČÍNSKÝ, Bohuslav. BEZPEČNOST DOPRAVY V ŽELEZNIČNÍCH TUNELECH SAFETY OF TRAFFIC IN RAILWAY TUNNELS. nedatováno.
- [14] *Nařízení Komise (EU) č. 1303/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se bezpečnosti v železničních tunelech železničního systému Evropské unie (Text s významem pro EHP)Text s významem pro EHP* [online]. 16. červen 2019 [vid. 2023-04-12]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1303/2019-06-16/ces>. Legislative Body: OP\_DATPRO
- [15] ČSN 737508 - *Železniční tunely*. prosinec 2013. 52 s



- [16] BRACERAS, Carlos M, Michael F ABLESON, Marie Therese DOMINGUEZ, Ginger EVANS, Nuria I FERNANDEZ, Nathaniel P FORD, Michael F GOODCHILD, Diane GUTIERREZ-SCACCETTI, Susan HANSON a Victoria A ARROYO. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 2020 EXECUTIVE COMMITTEE. nedatováno.
- [17] ŠOUREK, Pavel a Matouš HILAR. BETON V PODZEMNÍM STAVITELSTVÍ – SOUČASNÝ STAV A VÝVOJ. 2007.
- [18] *ADR2023\_Vol1e.pdf* [online]. [vid. 2023-12-04]. Dostupné z: [https://unece.org/sites/default/files/2023-01/ADR2023\\_Vol1e.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2023-01/ADR2023_Vol1e.pdf)
- [19] BEARD, Alan a Richard CARVEL. *The handbook of tunnel fire safety*. London: T. Telford, 2005. ISBN 978-0-7277-3168-5.
- [20] TAILLEFER, Nicolas, Pierre CARLOTTI, Catherine LARIVE, Christophe LEMERLE, Romuald AVENEL a Pierre PIMIANTA. Ten Years of Increased Hydrocarbon Temperature Curves in French Tunnels. *Fire Technology* [online]. 2013, **49**(2), 531–549. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-012-0259-8
- [21] LACHENDRO, Jan. *Požární scénáře užívané v tunelových stavbách [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/94273>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. B.m., 2012. b.n.*
- [22] GEHANDLER, Jonatan. Road tunnel fire safety and risk: a review. *Fire Science Reviews* [online]. 2015, **4**(1), 2. ISSN 2193-0414. Dostupné z: doi:10.1186/s40038-015-0006-6
- [23] GEHANDLER, Jonatan. Road tunnel fire safety and risk: a review. *Fire Science Reviews* [online]. 2015, **4**(1), 2. ISSN 2193-0414. Dostupné z: doi:10.1186/s40038-015-0006-6
- [24] BOHUSLAV STEČÍNSKÝ. 15. ročník - č. 4/ PDF Free Download [online]. [vid. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/25198432-Bohuslav-stecinsky-15-rocnik-c-4-2006.html>
- [25] ANIMATO (WWW.ANIMATO.CZ), Studio. Bezpečnost při požáru v tunelu. *Časopis Stavebnictví* [online]. [vid. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-bezpecnost-pri-pozaru-v-tunelu.html>
- [26] *Soubor: Tunel Valik SOS.jpg – Wikipedie* [online]. 26. září 2006 [vid. 2024-01-08]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tunel\\_Valik\\_SOS.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tunel_Valik_SOS.jpg)
- [27] HURLEY, Morgan J., Daniel GOTTUK, John R. HALL, Kazunori HARADA, Erica KULIGOWSKI, Milosh PUCHOVSKY, José TORERO, John M. WATTS a Christopher WIECZOREK, ed. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [online]. New York, NY: Springer New York, 2016 [vid. 2023-04-18]. ISBN 978-1-4939-2564-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2565-0
- [28] BENÝŠEK, Martin. Analýza požární odolnosti betonových konstrukcí s využitím různých modelů požáru [online]. 2021 [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/98704>
- [29] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.



- [30] KOVÁŘÍK, Tomáš. *Modelování požáru a analýza požární odolnosti konstrukcí se zohledněním náhodnosti vstupních parametrů*. Praha, 2022. České vysoké učení technické v Praze.
- [31] *GB\_Tunnel\_fire\_protection\_01072008.pdf* [online]. [vid. 2023-03-29]. Dostupné z: [https://firesto.fi/wp-content/uploads/2018/10/GB\\_Tunnel\\_fire\\_protection\\_01072008.pdf](https://firesto.fi/wp-content/uploads/2018/10/GB_Tunnel_fire_protection_01072008.pdf)
- [32] WEGRZYŃSKI, Wojciech, Piotr TOFIŁO a RAFAŁ POROWSKI. Hand calculations, zone models and CFD – areas of disagreement and limits of application in practical fire protection engineering [online]. 2016 [vid. 2023-05-08]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.4974.3604
- [33] YEOH, Guan Heng a Kwok Kit YUEN, ed. *Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice*. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-7506-8589-4.
- [34] ČSN EN 1991-1-2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. srpen 2004. 56 s
- [35] WEGRZYŃSKI, Wojciech, Piotr TOFIŁO, a RAFAŁ POROWSKI. Hand calculations, zone models and CFD – areas of disagreement and limits of application in practical fire protection engineering [online]. 2016 [vid. 2023-12-04]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.4974.3604
- [36] *2017R01EN APEND II.pdf* [online]. [vid. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://tunnelsmanual.piarc.org/sites/tunnels-manual/files/public/wysiwyg/import/Chapters%20PIARC%20reports/2017R01EN%20APEND%20II.pdf>
- [37] INGASON, Haukur, Sören GUSTAVSSON a Martin DAHLBERG. *Heat release rate measurements in tunnel fires: BRANDFORSK project 723-924*. Borås: SP Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, 1994. SP Report, 1994:08.
- [38] MAEVSKI, Igor Y. *Design fires in road tunnels*. Washington, D.C: Transportation Research Board, 2011. NCHRP synthesis, 415. ISBN 978-0-309-14330-1.
- [39] AVE, Poyntz. PyroSim - User Manual. nedatováno.
- [40] *FDS-SMV Manuals* [online]. [vid. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>
- [41] HLAVÁČEK, Miroslav a Martin BENÝŠEK. *Modelování požáru v tunelech pomocí zjednodušených a zpřesněných modelů požáru se zaměřením na vedení tepla v konstrukci tunelu*. B.m.: Recenzovaný sborník abstraktů XXXII. ročníku mezinárodní konference. B.m.: Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s., 2023, s. 28–31. ISBN 978-80-7385-267-2.
- [42] PyroSim User Manual. *Thunderhead Support* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2020-2/user-manual/>
- [43] STURM, Peter, Patrik FÖSSLEITNER, Daniel FRUHWIRT, Robert GALLER, Robert WENIGHOFER, Simon Franz HEINDL, Stefan KRAUSBAR a Oliver HEGER. Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire Safety Journal* [online]. 2022, **134**, 103695. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2022.103695



- [44] CHIAM, Boon Hui. Numerical Simulation of a Metro Train Fire [online]. 2005 [vid. 2023-12-29]. Dostupné z: doi:10.26021/2573



## **POUŽITÝ SOFTWARE**

Microsoft® Word pro Microsoft 365 MSO (Version 2309 Build 16.0.16827.20130)  
Microsoft® Excel® pro Microsoft 365 MSO (Version 2309 Build 16.0.16827.20130)  
AutoCAD® 2021 R.47.0.0 – studentská verze  
PyroSim 2023.3.1206, Released on December, 2023  
FDS version 6.8.0  
Smokeview version 2023.3.1206  
TempAnalysis 1.2 (10-04-2016)  
FMC (Fire Models Calculator) version 2.0 (15-6-2018)  
Zotero 6.0.27





## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Hloubený tunel Zvěrotice [7] .....	8
Obr. 2	Ražení tunelu technologií TBM [6] .....	9
Obr. 3	Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (lineární měřítko) [11] .....	10
Obr. 4	Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (logaritmické měřítko) [11].....	11
Obr. 5	Schéma řešení bezpečnostní koncepce [14].....	12
Obr. 6	Silniční tunel Strenger s ostěním z monolitického betonu [17].....	13
Obr. 7	Požáry řízené palivem (vlevo) a řízené ventilací v tunelu (vpravo) [20] .....	16
Obr. 8	Rozvrstvení kouře při požáru v tunelu s nízkou ventilací [1].....	16
Obr. 9	Podélně větrání tunelů [25] .....	20
Obr. 10	SOS kabinka v tunelu Valík [26].....	20
Obr. 11	Velkoplošný zobrazovací systém s monitory videodohledu.....	21
Obr. 12	Rozdělení požárních modelů [26].....	22
Obr. 13	Teplotní křivky používané v tunelech (z programu FMC).....	27
Obr. 14	Schematické znázornění předpokladu dvou vrstev při modelování zón [26] .....	29
Obr. 15	Schematické znázornění zpřesněného modelu FDS .....	29
Obr. 16	Odhadovaná HRR a míra tvorby kouře v silničních tunelech [2].....	30
Obr. 17	Teplotní profil tunelového ostění 0,5 m po namáhání různými teplotními křivkami získané z programu TAs.....	33
Obr. 18	Teplotní profil tunelového ostění 0,5 m po namáhání různými teplotními křivkami získané z programu TAs.....	33
Obr. 19	Schematicky zobrazené šířkové uspořádání tunelové trouby .....	35
Obr. 20	Grafické zobrazení modelu silničního tunelu .....	35
Obr. 21	Grafické zobrazení modelu železničního tunelu .....	36
Obr. 22	Uvažovaná křivka HRR osobního automobilu .....	36
Obr. 23	Uvažovaná křivka HRR autobusu .....	37
Obr. 24	Uvažovaná křivka HRR nákladního automobilu .....	37
Obr. 25	Uvažovaná křivka HRR vlakové soupravy .....	38
Obr. 26	Rozmístění měřících bodů v rastru po 1 m (š, d, v – 4x20x2) – Podélný řez .....	39
Obr. 28	Rozmístění měřících bodů v rastru po 1 m (š, d, v – 4x20x2) – Půdorys .....	39
Obr. 27	Rozmístění měřících bodů v rastru po 1 m (š, d, v – 4x20x2) – Příčný řez .....	39
Obr. 29	Porovnání HRR z programu FDS – OA .....	40
Obr. 30	Porovnání HRR z programu FDS – BUS .....	40
Obr. 31	Porovnání HRR z programu FDS – vlaková souprava.....	41
Obr. 32	Porovnání HRR z programu FDS – HGV.....	41
Obr. 33	Grafické znázornění teplot v čase 300 s.....	43
Obr. 34	Grafické znázornění teplot v čase 900 s.....	45
Obr. 35	Grafické znázornění teplot v čase 1800 s .....	47
Obr. 36	Grafické znázornění teplot v čase 2700 s .....	49
Obr. 37	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 60 s.....	50
Obr. 38	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 180 s .....	51
Obr. 39	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 300 s .....	51
Obr. 40	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 600 s .....	52
Obr. 41	Povrchová teplota ostění nad požárem OA .....	52
Obr. 42	Maximální teploty nad požárem OA.....	53
Obr. 43	Teploty nad požárem OA v porovnání s teplotními křivkami.....	53
Obr. 44	Povrchová teplota ostění nad požárem BUS.....	54



Obr. 45	Maximální teploty nad požárem BUS.....	54
Obr. 46	Povrchová teplota ostění nad požárem HGV.....	55
Obr. 47	Teploty nad požárem BUS v porovnání s teplotními křivkami.....	55
Obr. 48	Maximální teploty na požárem HGV.....	56
Obr. 49	Teploty nad požárem HGV v porovnání s teplotními křivkami.....	56
Obr. 50	Povrchová teplota ostění nad požárem vlakové soupravy.....	57
Obr. 51	Maximální teploty nad požárem vlakové soupravy.....	57
Obr. 52	Teploty nad požárem vlakové soupravy v porovnání s teplotními křivkami.....	58
Obr. 53	Porovnání HRR při požáru s prouděním vzduchu – OA.....	58
Obr. 54	Porovnání HRR při požáru s prouděním vzduchu – BUS.....	59
Obr. 55	Porovnání HRR při požáru s prouděním vzduchu – HGV.....	59
Obr. 56	Porovnání HRR z programu FDS – vlaková souprava.....	60
Obr. 57	Grafické vykreslení teplot v čase 300 s.....	62
Obr. 58	Grafické vykreslení teplot v čase 900 s.....	64
Obr. 59	Grafické vykreslení teplot v čase 1800 s.....	66
Obr. 60	Grafické vykreslení teplot v čase 2700 s.....	68
Obr. 61	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 60 s.....	69
Obr. 62	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 180 s.....	69
Obr. 63	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 300 s.....	70
Obr. 64	Grafické vykreslení zakouření prostoru v čase 600 s.....	70
Obr. 65	Povrchová teplota ostění nad požárem OA.....	71
Obr. 66	Maximální teploty nad požárem OA.....	71
Obr. 67	Teploty nad požárem OA v porovnání s teplotními křivkami.....	72
Obr. 68	Povrchové teploty ostění nad požárem BUS.....	72
Obr. 69	Teploty nad požárem BUS v porovnání s teplotními křivkami.....	73
Obr. 70	Maximální teploty nad požárem BUS.....	73
Obr. 71	Povrchové teploty ostění nad požárem HGV.....	74
Obr. 72	Maximální teploty nad požárem HGV.....	74
Obr. 73	Teploty nad požárem HGV v porovnání s teplotními křivkami.....	75
Obr. 74	Povrchové teploty ostění nad požárem vlakové soupravy.....	75
Obr. 75	Maximální teploty nad požárem vlakové soupravy.....	76
Obr. 76	Teploty nad požárem vlakové soupravy v porovnání s teplotními křivkami.....	76
Obr. 77	Porovnání HRR z programu FDS – OA.....	77
Obr. 78	Grafické vykreslení teplot požáru OA s větráním 5 m/s.....	79
Obr. 79	Grafické vykreslení zakouření prostoru požáru OA s větráním 5 m/s.....	80
Obr. 80	Povrchová teplota ostění nad požárem OA.....	80
Obr. 81	Maximální teploty nad požárem OA.....	81
Obr. 82	Teploty nad požárem OA v porovnání s teplotními křivkami.....	81
Obr. 83	Porovnání teplot plynu nad požárem OA při rozdílné rychlosti proudění vzduchu.....	82
Obr. 84	Průměrné teploty v porovnání s teplotními křivkami.....	82
Obr. 85	Maximální teploty v porovnání s teplotními křivkami.....	83
Obr. 86	Průběh teplot v ose tunelu při požáru OA s různými rychlostmi proudění vzduchu.....	83



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Seznam klíčových požárů v silničních tunelech, které vedly k úmrtí osob .....	17
Tab. 2	Seznam klíčových požárů v železničních tunelech .....	18
Tab. 3	Seznam klíčových požárů v tunelech metra .....	18
Tab. 4	Seznam klíčových požárů v tunelech metra .....	18
Tab. 5	Doporučené požární scénáře .....	24
Tab. 6	Tabulkové vyjádření normové teplotní křivky .....	25
Tab. 7	Porovnání vývoje teplot uhlovodíkové a uhlovodíkové modifikované křivky	26
Tab. 8	Tabulkové vyjádření křivky RWS .....	27
Tab. 9	Porovnání modelů požárů .....	30

## SEZNAM ROVNIC

(1)	Rovnice normové teplotní křivky ISO 834.....	24
(2)	Rovnice uhlovodíkové teplotní křivky HC.....	25
(3)	Rovnice uhlovodíkové modifikované teplotní křivky HCM.....	25