

METODIKA  
MODELOVÁNÍ POŽÁRU  
V TUNELOVÝCH STAVBÁCH



2025

Kolektív autorů



## **Dedikace**

*Metodika modelování požáru v tunelových stavbách je dílčím výstupem projektu TAČR CK04000274 Výzkum a vývoj inovativních metod a materiálů pro navrhování tunelových staveb z hlediska požární bezpečnosti.*

## **Autorský kolektiv**

### **České vysoké učení technické v Praze / Fakulta stavební**

Thákurova 2077/7, 166 29 Praha 6, IČO: 684 07 700

Ing. Martin Benýšek, Ph.D.

Ing. Pavel Moucha

Ing. Nicole Dvořáková

Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.

### **Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava / Fakulta bezpečnostního inženýrství**

Lumírova 630/13, 700 30 Ostrava-Výškovice, IČO: 619 89 100

doc. Ing. Petr Kučera, Ph.D.

Ing. Adam Thomitzek, Ph.D.

## **Aplikační garant**

### **Ředitelství silnic a dálnic s. p.**

Čerčanská 2023/12, 140 00 Praha 4, IČO: 659 93 390

### **Správa železnic, státní organizace**

Dlážděná 1003/7, 110 00 Praha 1, IČO: 709 94 234

## Obsah

<b>Seznam zkratek .....</b>	<b>6</b>
<b>1    Úvod.....</b>	<b>8</b>
<b>2    Cíle uplatnění metodiky.....</b>	<b>8</b>
<b>3    Specifika tunelových staveb pro potřeby modelování.....</b>	<b>9</b>
3.1    Silniční tunely.....	12
3.1.1    Projektování a kategorizace silničních tunelů .....	12
3.1.2    Fyzikální principy a faktory ovlivňující požár v silničních tunelech .....	13
3.2    Železniční tunely.....	16
3.2.1    Projektování a kategorizace železničních tunelů .....	16
3.2.2    Fyzikální principy a faktory ovlivňující požár v železničních tunelech.....	17
<b>4    Modely požáru v tunelových stavbách.....</b>	<b>17</b>
4.1    Základní dělení modelů požáru .....	17
4.1.1    Zjednodušené výpočetní modely požáru .....	19
4.1.2    Zpřesněné výpočetní modely požáru .....	19
4.2    Doporučení vhodnosti využití modelů požáru.....	20
<b>5    Doporučení pro zpracovatele modelů požáru v tunelových stavbách.....</b>	<b>21</b>
5.1    Strategie modelování požáru v tunelových stavbách.....	21
5.2    Specifika rozvoje požáru .....	21
5.3    Teplotní křivky .....	22
5.4    Zónové modely požáru.....	22
5.5    CFD modely požáru.....	23
5.6    Výstupní parametry modelu požáru .....	24
5.7    Koncepční řešení evakuace – zásady, limity .....	25
5.7.1    Volba evakuačních scénářů.....	25
5.7.2    Vstupní předpoklady pro posouzení evakuace .....	25
5.7.3    Kritéria přijatelnosti prostředí.....	26
5.7.4    Zajištění podmínek pro evakuaci a zásah .....	26
5.7.5    Posuzované výstupy a vyhodnocení .....	27
5.7.6    Kdy uvažovat detailní model evakuace.....	27

5.8	Koncepční řešení/parametry pro zásah jednotek požární ochrany .....	28
5.8.1	Tunely železniční .....	28
5.8.2	Tunely silniční .....	28
5.8.3	Stanovení potřebné intenzity dodávky hasebních látek.....	29
5.8.4	Parametry simulované pro vyhodnocení zásahu jednotek PO .....	29
6	<b>Doporučení pro posuzovatele modelů požáru v tunelových stavbách .....</b>	<b>30</b>
7	<b>Závěr .....</b>	<b>32</b>
<b>Příloha 1 – Referenční hodnoty HRR dopravních prostředků .....</b>		<b>33</b>
	Osobní automobil .....	33
	Autobus.....	33
	Těžké nákladní vozidlo .....	34
	Vůz metra.....	34
	Vůz osobního vlaku.....	35
	Vůz vysokorychlostního vlaku.....	35
	Důlní kolový nakladač .....	36
	Důlní vrtná souprava .....	36
<b>Příloha 2 – Stručný popis modelování požáru v programu CFAST .....</b>		<b>37</b>
<b>Příloha 3 – Stručný popis modelování požáru v programu FDS .....</b>		<b>39</b>
<b>Citovaná literatura .....</b>		<b>41</b>
<b>Doporučená literatura .....</b>		<b>44</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>		<b>45</b>

## Seznam zkratek

ASET	Dostupný bezpečný čas pro evakuaci ( <i>Available Safe Egress Time</i> )
CFAST	Software zónového modelu požáru
CFD	Výpočetní model dynamiky tekutin ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FDS	Software pro simulaci dynamiky požáru ( <i>Fire Dynamics Simulator</i> )
HRR	Rychlosť uvolňovania tepla ( <i>Heat Release Rate</i> )
HRRPUA	Rychlosť uvolňovania tepla na jednotku plochy
HZS	Hasičský záchranný sbor
CHÚC	Chránená úniková cesta
IZS	Integrovaný záchranný systém
NIST	Národní institut pro normalizaci a technologii – americká vládní agentura
PO	Požární ochrana
RSET	Potřebný bezpečný čas pro evakuaci ( <i>Required Safe Egress Time</i> )
TP	Technické podmínky
TSI	Technické specifikace interoperability
VRT	Vysokorychlostní trať

## Vymezení působnosti metodiky

Tato metodika je určena především odborníkům, kteří se dlouhodobě zabývají problematikou požární bezpečnosti tunelových staveb a mají odpovídající znalosti, zkušenosti a profesní průpravu. Jejím cílem je sjednotit postupy, doplnit vazby mezi jednotlivými kroky expertízy, resp. analýzy podmínek požáru a poskytnout oporu při odborném posuzování specifických podmínek požáru v tunelech. Metodika není koncipována jako samostatný návod pro osoby bez potřebné kvalifikace ani jako prostředek k provádění expertízních posudků bez hlubšího porozumění dané oblasti. Správná aplikace metodiky předpokládá znalost souvisejících předpisů, principů požárního inženýrství a kontextu tunelových staveb.

## 1 Úvod

Požár v tunelových stavbách může být velmi nebezpečný. Proto je důležité dopředu vědět, jak by se požár mohl chovat a v rámci návrhu tunelové stavby je nutné prověřit možné požární scénáře ve vazbě na evakuaci osob a požární zásah a navrhnout tak bezpečnou stavbu. A právě k tomu slouží modelování požáru, případně evakuace. Nedílnou součástí každého projektu tunelové stavby je i vyhodnocení požárního zásahu jednotkami PO a složkami IZS.

Tunely, ať už silniční nebo železniční, jsou specifickým prostředím s omezenými možnostmi úniku, složitými proudovými poměry a vysokou koncentrací osob, dopravních prostředků, případně vyskytujícího se hořlavého materiálu. V případě požáru zde dochází k rychlému šíření tepla, kouře a toxickejších plynů, což může ohrozit lidské životy i konstrukční integritu stavby.

Tato metodika popisuje, jak postupovat při vytváření počítačových modelů požáru v silničních a železničních tunelech. Pomáhá projektantům, provozovatelům tunelů i záchranným složkám lépe pochopit, co se může stát, a jak se na to připravit. Díky tomu lze navrhnout bezpečnější tunely, efektivní návrh větrání, únikové cesty nebo požární odolnost konstrukce.

Metodika vychází z obecných principů a poskytuje konkrétní doporučení. Pro návrh tunelové stavby je doporučené využít i zahraniční literaturu a aktuální vědecké články v odborných impaktovaných časopisech.

Pro vytvoření této metodiky byly využity moderní počítačové simulační programy, například Fire Dynamics Simulator (FDS), které dokážou simulovat šíření požáru, kouře a tepla. Důležitou součástí je také ověřování modelů podle reálných požárních experimentů.

## 2 Cíle uplatnění metodiky

Cílem metodiky bylo vytvořit jednotný rámec pro projektanty, provozovatele tunelů a bezpečnostní složky. Jedná se o praktický návod, který pomůže s návrhem zejména modelu požáru tunelové stavby, což povede ke zlepšení bezpečnosti v tunelech – ať už jde o silniční nebo železniční dopravu.

Hlavní cíle metodiky jsou:

- **sjednotit postupy modelování požáru,**
- **sjednotit volbu požárních scénářů,**
- **podpořit bezpečný návrh tunelových staveb**, zejména z hlediska větrání, evakuace a konstrukční odolnosti,
- **zajistit srovnatelnost výsledků modelování** mezi různými projekty a odborníky,

Důležitost vzniku metodiky spočívá v rostoucích náročích na bezpečnost dopravní infrastruktury, vyšší intenzitě provozu a technické složitosti moderních tunelů a nedostatečná legislativní podpora. Požáry v tunelech mohou mít vážné následky – nejen pro lidské životy, ale i pro ekonomiku a životní prostředí, nicméně jejich četnost není vysoká. Díky jednotné metodice lze lépe předcházet rizikům a sjednotit systém modelování požáru tunelových staveb mezi odborníky.

### 3 Specifika tunelových staveb pro potřeby modelování

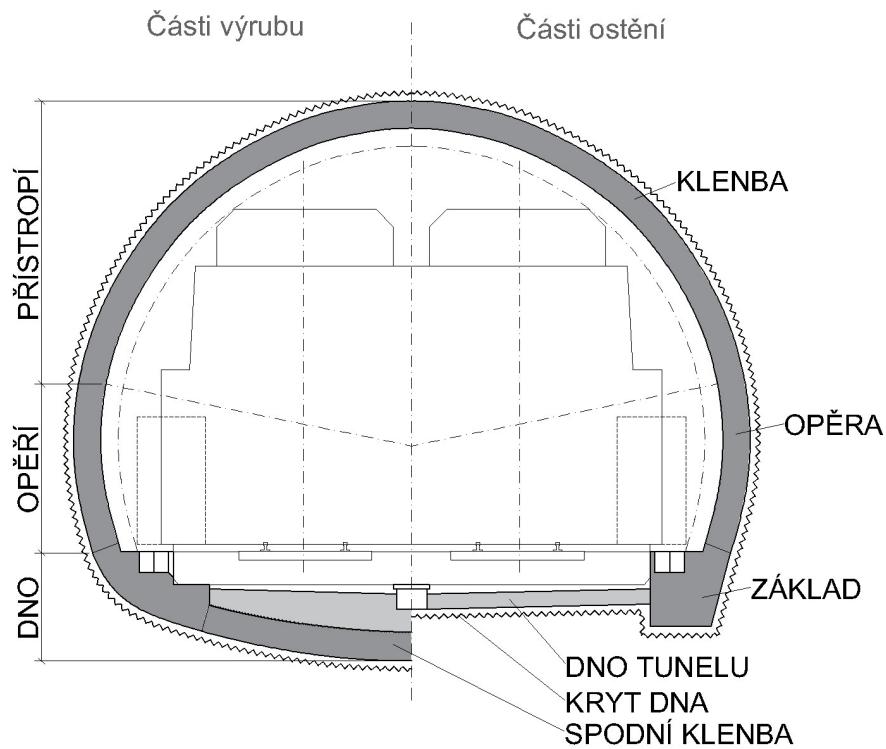
Tunely jsou podzemní liniové stavby vyznačující se uzavřeným příčným profilem. Snahou větších měst je přesunout dopravu pod zem za účelem zvýšení její plynulosti, snížení hluku a také s ohledem na životní prostředí. Tunely jsou díky tomu součástí kritické dopravní infrastruktury, a to nejen v hornatých oblastech, ale i ve velkých městech. Přestože četnost požáru v tunelech je statisticky menší než v uzavřených budovách, jejich následky mohou mít fatální dopady. Požární bezpečnosti tunelů je proto třeba věnovat dostatečnou pozornost.

Tunely lze klasifikovat podle jednotlivých parametrů v závislosti na druhu provozu, intenzitě dopravy, délce tunelu, způsobu výstavby a dalších. Tyto parametry jsou klíčovými faktory z hlediska požadavků na bezpečnost tunelu nebo při stanovení rozsahu povinného a doporučeného technického a technologického vybavení tunelů. Podle charakteru dopravy lze tunely rozdělit na silniční a železniční.

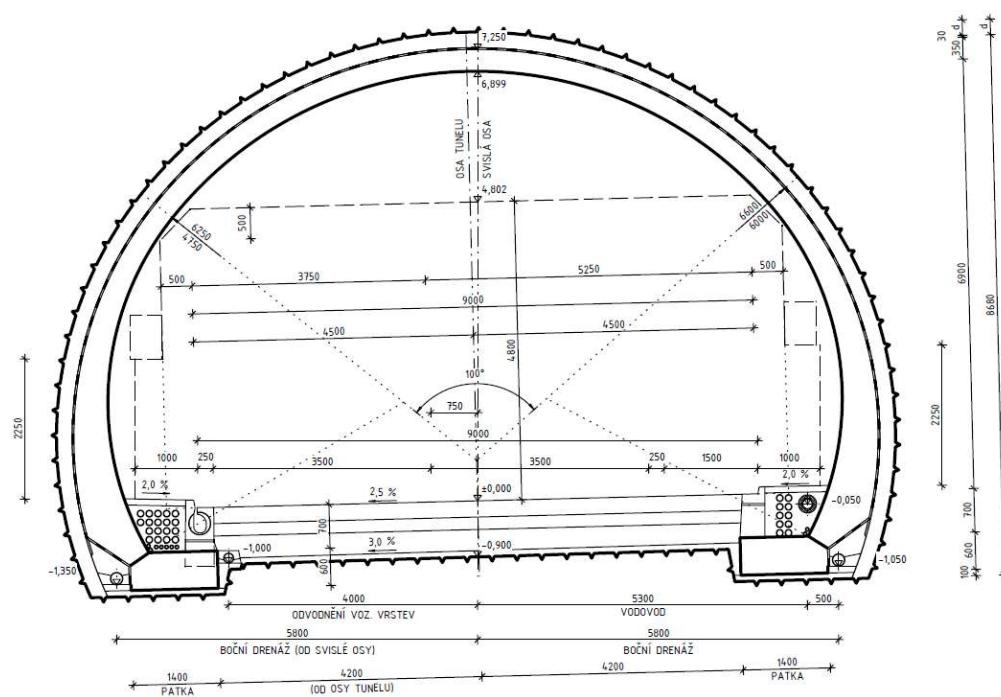
Tunely se dělí podle způsobu výstavby na ražené nebo hloubené, popř. tunely budované zvláštními způsoby výstavby. Výstavba raženého tunelu se provádí ražením (resp. výrubem) v horninovém prostředí bez odstranění nadloží tunelu nebo ražením pod zastropením dle ČSN 73 7507, čl. 3.2.15. Příčný řez raženým tunelem je znázorněn na Obr. 1 a Obr. 2. Výstavba hloubeného tunelu spočívá v hloubení ve stavební jámě nebo rýze s dočasným odstraněním nadloží tunelu, případně v budování na povrchu s pozdějším zasypáním. Příčný řez hloubeným tunelem je znázorněn na Obr. 3 a Obr. 4.

Pro navrhování konstrukcí ražených tunelů platí ČSN 73 7501. V případě návrhu konstrukce hloubených tunelů se zatízení stanoví podle řady norem ČSN EN 1991-1-1 až 6, a to v závislosti na druhu budoucího zatízení nad tunelem a v tunelu.

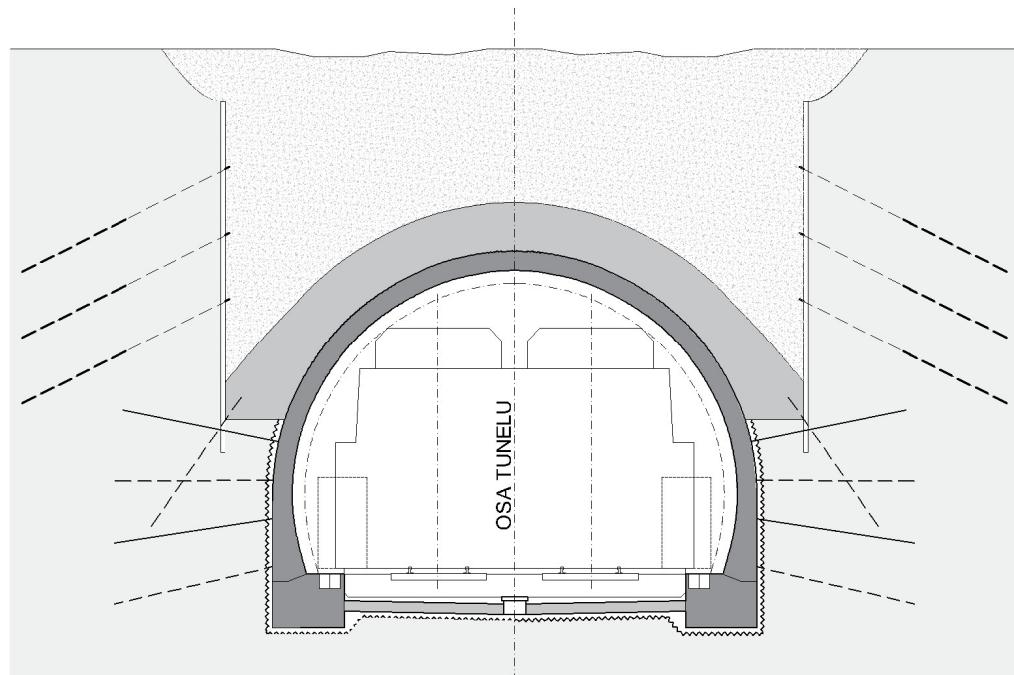
Nejčastěji používanou metodou při realizaci nových tunelů v České republice je ražení konvekčními tunelovacími metodami. Stabilitu výruba zajišťuje především primární a sekundární (definitivní) ostění. Nejobvyklejším materiélem pro primární ostění tunelu je vrstva stříkaného betonu vyztužená sítěmi a rámy, případně pouze drátkobetonem.



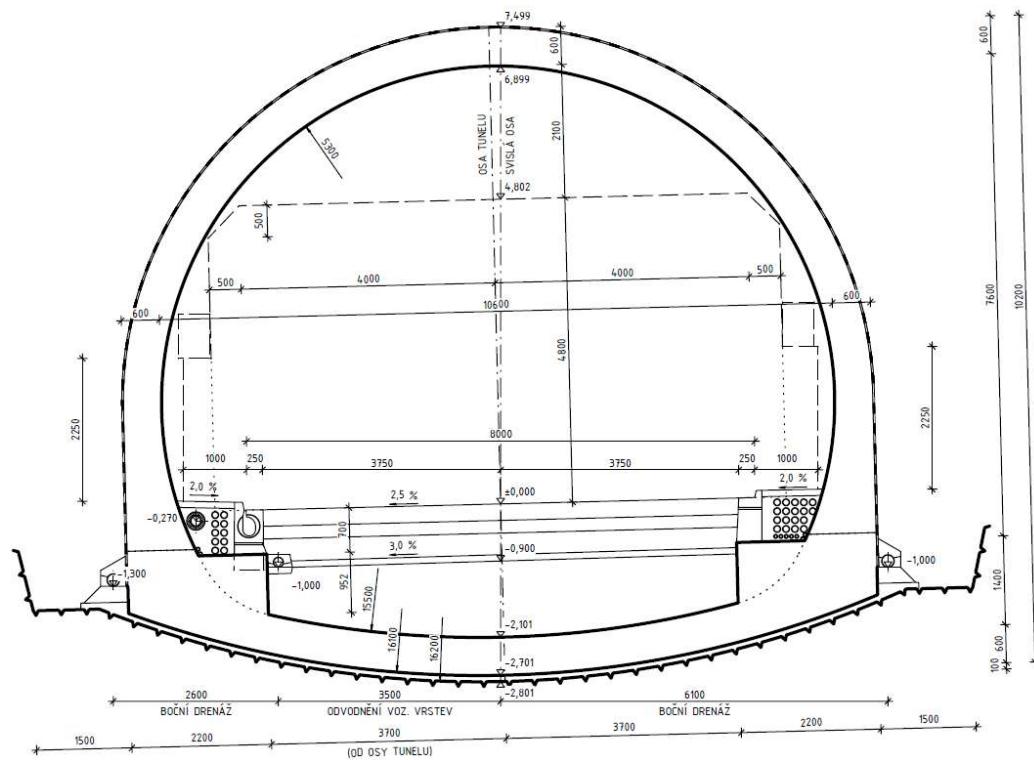
Obr. 1 – Schématický příčný řez raženým dvojkolejným železničním tunelem [1]



Obr. 2 - Typový příčný řez raženým dvoupruhovým dálničním tunelem [2]



Obr. 3 – Schématický příčný řez hloubeným dvojkolejným železničním tunelem [1]



Obr. 4 – Typový příčný řez hloubeným dvoupruhovým dálničním tunelem [2]

### 3.1 Silniční tunely

V posledních desetiletích je věnována značná pozornost požární bezpečnosti silničních tunelových staveb, především z důvodu rychlého nárůstu této dopravní infrastruktury v moderním urbanizovaném světě, a současně množství závažných incidentů z pohledu požární bezpečnosti, s tím spojených.

Ze statistického pozorování sice vyplývá řádově nižší četnost mimořádných událostí s následným požárem (výbuchem či únikem nebezpečných látek) v silničních tunelech oproti otevřeným pozemním komunikacím (event. i v porovnání s uzavřenými prostory budov), nicméně specifická rizikovost silničních tunelů v konečném důsledku eskaluje do značně závažných negativních dopadů, které se přímo promítají do evakuace (a případných úmrtí) osob, enormního zatížení konstrukcí ostění tunelů během požáru, a dále i do často ztížených (v krajním případech dokonce znemožněných) požárních zásahů. [3, 4]

Oblasti aplikace matematického modelování požáru se v rámci požárně inženýrského přístupu neustále rozšiřují – v případě silničních tunelových staveb se nejedná pouze o přesnější výstupy teplotních průběhů nebo posouzení efektivity vybavení prostorů požárně bezpečnostními zařízeními, numerické modely nacházejí své uplatnění i při posuzování konstrukcí ostění tunelů při teplovním namáhání požárem (ve fázi rozvoje i ochlazování) nebo obdobně slouží pro optimalizaci a zdokonalení postupů při mimořádných událostech v silničních tunelech, a to včetně návaznosti na evakuaci osob. [3, 5]

Prostřednictvím matematického modelování požáru lze v porovnání s konzervativními metodami (např. nominální teplotní křivky) obecně dosahovat podrobnějších a přesnějších výstupů průběhu požární situace s následnou možností využití získaných dat pro návrh požární bezpečnosti a zpracování rizikových analýz silničních tunelů. Simulace požáru pomocí matematického modelu je však závislá na vstupních datech a dobře nastavených okrajových podmínkách.

#### 3.1.1 Projektování a kategorizace silničních tunelů

Pro projektování silničních tunelů v ČR platí norma ČSN 73 7507 a dále technické podmínky TP 98 (Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací). Tunely musí vyhovovat nejen požadavkům požární bezpečnosti, bezpečnosti a ochrany zdraví osob, plynulé a bezpečné jízdy, ale také podmínkám ekonomičnosti a minimální náročnosti na pracnost údržby tunelu v provozu dle ČSN 73 7507, čl. 4.1.3.

Silniční tunely se na základě ČSN 73 7507 rozdělují podle délky (Obr. 5) na krátké tunely (více než 100 m až 500 m), střední tunely (více než 500 m až 1000 m) a dlouhé tunely (delší než 1000 m).

U tunelů pozemních komunikací s délkou nad 500 m se zpracovává bezpečnostní dokumentace tunelu podle ČSN 73 7507, čl. 4.1.4.



Obr. 5 – Schéma rozdělení silničních tunelů podle jejich délky [6]

Podle typu provozu se tunely dělí na jednosměrné a obousměrné. V závislosti na délce tunelu a intenzitě dopravy se tunely třídí celkem do šesti bezpečnostních kategorií, resp. do čtyř hlavních kategorií (tj. TA, TB, TC a TD) a dvou podkategorií (tj. TC-H a TD-H), které následně určují rozsahu povinného a doporučeného technického vybavení tunelu. Při očekávané denní intenzitě provozu nad 15 000 vozidel v jízdním pruhu je tunel zatrízen do kategorie TD-H (při délce tunelu 100 až 300 m), kategorie TC-H (při délce tunelu 300 až 500 m), nebo kategorie TA (při délce tunelu nad 500 m) dle ČSN 73 7507, čl. 4.2.5.

Z hlediska požadavků na bezpečnost / požární větrání se rozlišují tři hlavní kategorie silničních tunelů, a to kategorie T1, T2 a T3. Do kategorie T1 se řadí tunely s jednosměrným provozem a malou pravděpodobností kongesce (tzn. běžně dálniční tunely). Kategorie T2 jsou tunely s jednosměrným provozem a velkou pravděpodobností kongesce (tzn. běžně dvou troubové městské tunely). Do kategorie T3 patří tunely s obousměrným provozem. V tunelech s délkou nad 1000 m a zároveň s provozem nad 2000 vozidel v jízdním pruhu za den se vždy požaduje instalovat mechanické větrací zařízení dle Nařízení vlády č. 264/2009 Sb.

### 3.1.2 Fyzikální principy a faktory ovlivňující požár v silničních tunelech

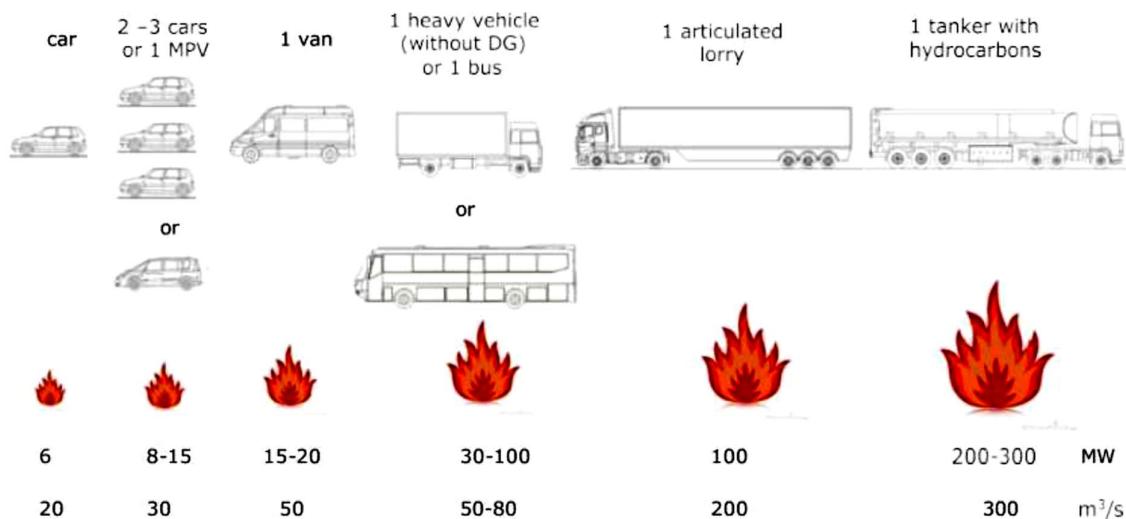
Důležité parametry ve vazbě na průběh požární situace v silničním tunelu tvoří charakteristiky zdroje hoření v čele s rychlosťí uvolňování tepla, dále rychlosť proudění vzduchu (v návaznosti na celkový návrh větrání), prostorová geometrie tunelu atp. [3]

Nejzásadnějším parametrem popisující průběh požáru je rychlosť uvolňování tepla (zkráceně HRR – *Heat Release Rate*), kterou ovlivňuje značné množství faktorů – zejména charakter zdroje hoření (v těchto případech závislý na druhu vozidla a specifikaci případného přepravovaného

nákladu), dále materiálové provedení a tepelná zpětná vazba konstrukcí ostění tunelu, navržený systém větrání, prostorová geometrie (efektivní výška, podélné sklonky) silničního tunelu ad. [3]

Z výsledků požárních zkoušek a vyšetřování příčin požárů byly v rámci mnoha expertíz a odborných publikací stanoveny maximální hodnoty rychlosti uvolňování tepla pro jednotlivé druhy silničních vozidel, viz dále (a Obr. 6):

- Osobní automobil **2,5 - 10,0 MW** převážně pod 5,0 MW
- Autobus **20,0 - 80,0 MW** nad 60,0 MW u dálkových autobusů
- Nákladní vozidlo **30,0 - 150,0 MW** nad 100,0 MW u těžkých nákladních vozidel
- Cisternové vozidlo **nad 200,0 MW** průměrně až kolem 300,0 MW



Obr. 6 – Předpokládaný maximální výkon požáru (v MW) pro jednotlivé dopravní prostředky [7]

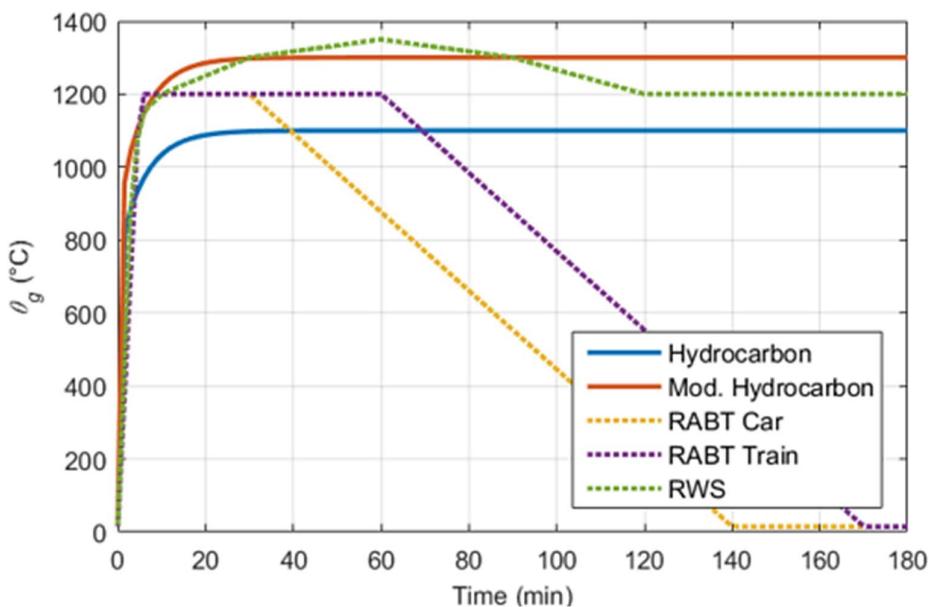
Zároveň z dosavadních provedených výzkumů vyplývá, že rychlosti uvolňování tepla u silničních vozidel mohou v podzemních tunelových stavbách oproti venkovním prostorům vzrůst až čtyřnásobně. [4]

Na základě souhrnu závažných požárů v silničních tunelech z období 1968-2011 vyplývá značné zapojení nákladních vozidel do těchto incidentů, přičemž jejich hlavní příčinou byla kolize s dalším vozidlem nebo technická závada v motorovém prostoru. Požáry, do kterých bylo v prvotní fázi zapojeno hned několik nákladních vozidel, vedly v konečném důsledku ke značným ztrátám na životech a materiálním škodám. Požáry cisternových vozidel přepravující nebezpečné látky nejsou v silničních tunelech tak obvyklé – jejich vjezd do tunelů je regulován ve vztahu k intenzitě dopravy i přepravovanému nákladu, osádka je předem důkladně odborně připravována

(a technicky vybavena) na případné vzniklé mimořádné události, současně tyto vozidla podstupují zpřísněné periodické technické kontroly. [3, 5]

Průběh teploty plynů během požární situace v silničním tunelu je stěžejním faktorem v otázkách působení tepelného toku na unikající osoby a konstrukce podzemní liniové stavby, odhadu doby detekce vzniklého požáru a stanovení možností jeho následného šíření. [3, 5]

V rámci mezinárodních studií a projektů velkorozměrových požárních zkoušek byly identifikovány charakteristické požáry v podzemních liniových stavbách a odvozeny nominální teplotní křivky (Obr. 7) reflektující jednotlivé požární situace – zejména s ohledem na značné množství pohonných hmot a specifikum větrání silničních tunelových staveb, jsou zmíněné teplotní křivky výrazně přísnější oproti standardním, užívaných pro běžné uzavřené prostory budov (normová teplotní křivka ISO 834). [3, 4]



Obr. 7 – Nominální teplotní křivky (HC, HCM, RABT, RWS) určené pro tunelové stavby [8]

Neexistuje jednotný postup výběru teplotní křivky ve vztahu k rychlosti uvolňování tepla, rychlosti proudění vzduchu (resp. způsobu větrání), prostorové geometrii tunelu apod. – teplotní křivky mohou ve většině případů dosahovat značného odchýlení od skutečného průběhu požáru. V kontextu tunelových staveb je žádoucí použití požárně inženýrského přístupu založeného na teoretické analýze numerického modelování prostřednictvím CFD modelů. [3]

Zásadním rizikem při vzniku požáru je možné poměrně rychlé zakouření prostoru tunelu s přímým dopadem na evakuaci osob a následný požární zásah – správná volba ventilačního systému je klíčová pro zajištění požární bezpečnosti podzemních liniových staveb, v opačném případě může mimořádná událost v tomto ohledu vyústit v katastrofální následky. [3, 4]

Při požárních zkouškách v Runehameru, kde teploty dosahovaly až 1 300 °C, docházelo k pulzování požáru, během maximálního výkonu se snižovala rychlosť větrání a částečně docházelo ke zpětnému šíření kouře – právě kritická rychlosť proudění vzduchu a délka zpětné vrstvy kouře (z anglického *back-layering*) jsou u tunelových staveb v rámci výzkumné činnosti nejčastěji zkoumanou problematikou. [4]

## 3.2 Železniční tunely

Přestože pravděpodobnost propuknutí požáru v železničních tunelech nebo metrech je podstatně nižší než v tunelech silničních (dle výzkumu spol. Munich Reinsurance Group z roku 2003), pokud k požáru dojde, riziko vážné nehody je zde vyšší. Požáry v železničních tunelech bývá obtížnější odhalit a jejich hašení představuje enormní zátěž pro záchranné složky. [3]

Cílem právě tohoto přehledu je představit současný stav poznání v oblasti numerického modelování železničních tunelů a poukázat na jeho specifika. Díky numerickému modelování požáru lze, na rozdíl od konzervativnějších přístupů, přesněji předpovědět průběh požáru v tunelech, což může sloužit jako podklad ke stanovení analýzy rizik a pro návrh požární bezpečnosti v tunelech a evakuace osob.

V literatuře byl proveden souhrn nejvýznamnějších požáru v železničních tunelech a metrech, které se staly mezi lety 1903-2007. Z výsledků vyplývá, že většina požárů osobních vlaků nezpůsobuje masové oběti, přesto se možnost vzniku dlouhotrvajících požárů zvýšila. Při požárech nákladních vlaků je největším rizikem poškození konstrukce tunelu, a to zejména pokud se jedná o nebezpečný náklad. V porovnání se železničními tunely měly v minulosti požáry v metrech za následek více úmrtí. [3, 9, 10, 11]

### 3.2.1 Projektování a kategorizace železničních tunelů

Pro projektování železničních tunelů platí v ČR zejména ČSN 73 7508 a dále Technické specifikace interoperability (TSI), které jsou na rozdíl od evropských norem (EN) závazné. ČSN 73 7508 (Železniční tunely) je však nevhodná pro projektování tunelů na vysokorychlostních tratích (VRT).

Tunely delší než 350 m jsou z hlediska Vyhlášky č. 246/2001 Sb. považovány za objekty se složitými podmínkami pro požární zásah. V těchto případech je nutné vypracovat dokumentaci zdolávání požáru. Většina železničních tunelů v ČR nepřekračuje délku 350 m a délku 1000 m překračuje pouze deset tunelů. V případě nově navrhovaných nebo rekonstruovaných železničních tunelů se navrhují koncepce požárního zabezpečení v závislosti na podrobné analýze konkrétních podmínek tunelu, což obsahuje analýzu rizik, návrh eliminace rizik a z nich vyplývající opatření dle ČSN 73 7508, čl. 6.3.11.1.2.

### 3.2.2 Fyzikální principy a faktory ovlivňující požár v železničních tunelech

Požáry v tunelech se od otevřených požárů liší zejména vlivem přirozeného větrání na průběh hoření a zpětnou tepelnou vazbou z okolního prostředí. [3, 5]

Mezi nejdůležitější parametry průběhu požáru v tunelu patří rychlosť uvolňování tepla, rychlosť proudění, efektivní výška tunelu a geometrie zdroje požáru. Jedním z nejdůležitějších parametrů pro popis průběhu požáru je rychlosť uvolňování tepla, kterou ovlivňuje např. zdroj hoření a typ vozidla, geometrie a velikost vozidla, tepelná zpětná vazba konstrukcí tunelu, materiál a geometrie tunelu a podmínky ventilace. Teplota plynů je zásadní pro určení vystavení osob i konstrukcí tepelným tokem, odhadu doby detekce požáru a stanovení možnosti šíření požáru. [3]

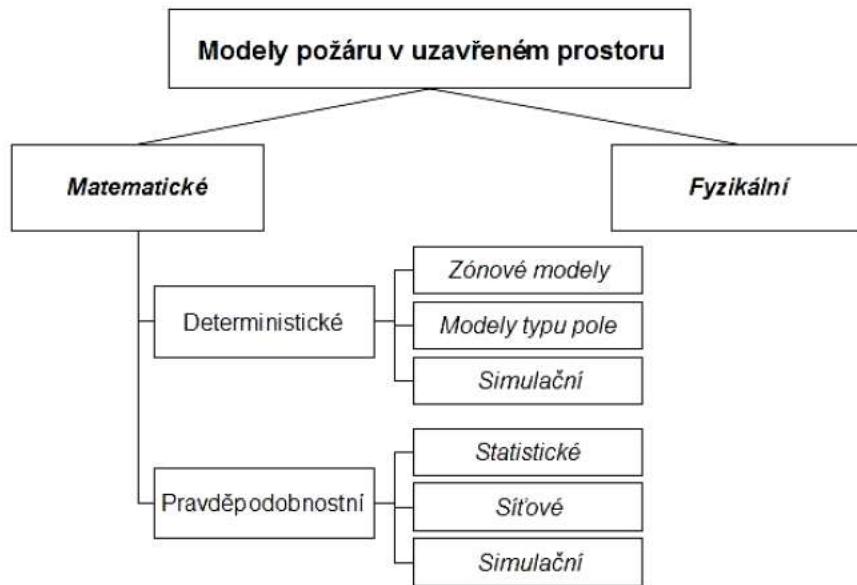
Kritická rychlosť proudění vzduchu a délka zpětné vrstvy kouře, tzv. „back-layering“, jsou nejvíce zkoumanými jevy týkajícími se požárů v tunelech. V blízkosti zdroje požáru nastává turbulentní proudění vzduchu. Teplo produkované hořením postupně ohřívá okolní vzduch v tunelu a vznikají vztlakové síly, které ovlivňují pohyb a směr proudění vzduchu uvnitř hořícího tunelu. Pokud v tunelu není dostatečná rychlosť podélného proudění vzduchu, vzniká u stropu zpětný proud horizontálních plynů – tzv. „back-layering“. Kouř a nahromaděné zplodiny hoření se mohou šířit proti stojícím vozidlům a snížit viditelnost natolik, že je znemožněna bezpečná evakuace osob z tunelu. Pro zabránění tomuto jevu proto musí být uvnitř tunelu zajištěna vyšší rychlosť podélného proudění vzduchu, než je kritická rychlosť proudění, která je pro většinu tunelů stanovena přibližně na hodnotu  $3\text{--}3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [3, 12]

## 4 Modely požáru v tunelových stavbách

Požár může být popsán prostřednictvím modelu. Modelování požáru je přístup pro předpovídání různých požárních jevů – jedná se o approximaci skutečného stavu, viz dále.

### 4.1 Základní dělení modelů požáru

Modely požáru dělíme na numerické (matematické) a fyzikální. Pod numerické modely požáru se řadí podmnožiny pravděpodobnostních a deterministických modelů požáru (Obr. 8).



Obr. 8 – Schéma rozdělení modelů požáru [13]

Fyzikální modelování poskytlo základ pro pochopení podstaty dynamiky požáru. Totožným stupnem bylo vyřešeno mnoho problémů v dalších oblastech inženýrství. V zásadě se jedná o aplikaci postupů, které umožňují předpovídat chování ve skutečném měřítku 1:1 na základě výsledků získaných z laboratorních experimentů. Příkladem fyzikálních modelů jsou zkoušky požární odolnosti konstrukcí v požárních pecích – lze využít velkorozměrové i malorozměrové zkoušky (včetně aplikace omezené škálovatelnosti). [14]

Numerické modely, jak už bylo řečeno, mohou být pravděpodobnostní (zjednodušeně řečeno – stejně vstupy a různé výsledky) nebo deterministické (zjednodušeně řečeno – stejně vstupy a stejně výsledky). Pro pravděpodobnostní přístup modelování požáru se běžně používá metoda Monte Carlo nebo vzorkování Latinských hyperkrychhlí, viz zejména [15, 16]. Deterministický přístup modelování požáru v posledních desetiletích, co do rozsahu použití, značně převládá. Výsledky jsou determinovány na základě vstupních dat – pokud jsou vstupní data stejná, budou i výsledky vždy stejné. Model požáru se v tomto případě řeší pomocí matematických rovnic, které popisují fyzikální a chemické procesy. Od velmi jednoduchých modelů, které mají závislost pouze na několika málo fyzikálních veličinách, až po složité modely, které popisují chování požáru v celé místnosti či dokonce skupině – takto široký rozsah deterministické modely požáru zaujímají. Řešení požárních scénářů může být časově velmi rozdílné. Mezi základní a dobře známé deterministické modely patří zónové modely a modely typu pole – modely CFD (z anglického *Computational Fluid Dynamics*). [17]

Modelování požáru neslouží pouze k simulaci samotného požáru, ale v případě pokročilých modelů požáru je možné simulovat zejména i vývin kouře včetně jeho proudění, toxicitu, přenos tepla či vybraná požárně bezpečnostní zařízení (požární samočinné hlásiče, systémy odvětrání nebo hašení) – to vše lze následně využít pro další aplikace, především kombinovat se simulací a vyhodnocením evakuace osob.

#### **4.1.1 Zjednodušené výpočetní modely požáru**

Zjednodušené modely požáru jsou založeny na specifických fyzikálních parametrech s omezenou oblastí použití. Předpokládá se rovnoměrné rozložení teplot v závislosti na čase během požáru v požárních úsecích. Naopak u lokálních požárů se předpokládá nerovnoměrné rozložení teplot v závislosti na čase.

Výše charakterizované zjednodušené modely požáru jsou zastoupeny následovně:

- Parametrické teplotní křivky – příloha A [18]
- Tepelné zatížení vnějších prvků (zjednodušená metoda výpočtu) – příloha B [18]
- Lokální požáry – příloha C [18]
- Hustota požárního zatížení – příloha E [18]
- Rychlosť uvolňování tepla – příloha E.4 [18]

#### **4.1.2 Zpřesněné výpočetní modely požáru**

Zpřesněné modely požáru mají zohledňovat vlastnosti plynů, hmotnostní výměnu a energetickou výměnu – mezi tyto zpřesněné (pokročilé) modely požáru patří:

- Jednozónový model, který předpokládá rovnoměrné rozložení tepla v požárním úseku v závislosti na čase
- Dvouzónový model, který předpokládá horní vrstvu s proměnnou tloušťkou a zároveň s proměnnou rovnoměrnou teplotou v závislosti na čase a dále spodní vrstvu s proměnnou rovnoměrnou nižší teplotou (v porovnání s horní vrstvou) v závislosti na čase
- Výpočetní model dynamiky tekutin, tzv. CFD model (z anglického *Computational Fluid Dynamics*), u kterého stanovení vývoje teplot v prostoru je zcela závislé na čase a prostoru – příloha D [18]

Zónové modely vyjadřují ideální průběh požáru v uzavřeném prostoru a jde o tradiční metodický postup pro stanovení zjednodušeného šíření zplodin hoření. Koncepce zónových modelů využívá empirie – vychází z fyzikálních jevů působících při skutečných požárech. Jednozónový model předpokládá vznik efektu vzplanutí. Dvouzónový model předpokládá 2 oddělené zóny. Dvouzónový model se stává jednozónovým, pokud teploty v horní vrstvě překročí hodnotu 500 °C nebo pokud výška kouřové vrstvy zaujímá alespoň 80 % výšky požárního úseku.

Použití zónových modelů požáru je závislé na typu řešených úloh. Zpočátku model popisuje průběh požáru v místnosti před okamžikem prostorového vzplanutí – dvouzónový model požáru – rozděluje místnost během požáru (před okamžikem prostorového vzplanutí) na 2 homogenní zóny, přičemž každá zóna má vlastní proměnnou rovnoměrnou hustotu, teplotu a koncentraci plynů v závislosti na čase. Spodní vrstva je ochlazována přívaděným vzduchem a současně horní vrstva je ohřívána vzestupným prouděním zplodin hoření. [18, 19, 20]

V rámci numerických simulací se používají principy CFD, které jsou nejpokročilejší dostupnou metodou. Hlavním principem je rozdelení výpočetního prostoru na množství trojrozměrných buněk, tzv. kontrolních objemů. Zónové modely předpokládají pouze 2 kontrolní objemy, CFD modely mají n-kontrolních objemů. Základní rovnice jsou založeny na principech zachování hmoty, energie, hybnosti a složení částic – Navierovy-Stokesovy rovnice (neboli tzv. N-S rovnice). Jedná se o trojrozměrné, časově závislé, nelineární parciální diferenciální rovnice. Tento numerický přístup zahrnuje celou historii průběhu modelu požáru, která zahrnuje lokální vývoj jednotlivých fyzikálních veličin. Výhodou CFD modelů je jejich obecné použití, nevýhodou naopak množství vstupů a vysoké nároky na hardware. Teploty v požárním úseku jsou časově a prostorově závislé. [17, 18, 20]

## 4.2 Doporučení vhodnosti využití modelů požáru

Základní modely ve vazbě na numerické modelování požáru představují nominální teplotní křivky, rozšířeny o zjednodušené modely požáru (parametrické teplotní křivky, lokální požáry ad.) – v požárně inženýrské praxi zpravidla využívané pro proces posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí, viz podrobně ČSN EN 1991-1-2. V rovině jejich uplatnění je ovšem dosahováno značně konzervativních výstupů, resp. širšího rozsahu odchýlení od skutečných průběhů požárů. S ohledem na tuto skutečnost je v případech komplexního posouzení doporučena aplikace zpřesněných modelů požáru. [3, 5]

Ty jsou v první řadě reprezentovány zónovými modely požáru a dále modely výpočetní dynamiky tekutin, též označované jako CFD modely (z anglického *Computational Fluid Dynamics*). V praxi nacházejí CFD modely své uplatnění především v otázkách požárně inženýrského přístupu – jejich častou aplikaci lze pozorovat i při modelování požáru v tunelových stavbách, omezujícími faktory jsou ovšem délka výpočetního času a nároky na hardware. Využitelnost zónových modelů požáru v kontextu tunelových staveb je zpravidla nevhodná nebo zásadně limitována – pro podzemní liniové stavby byla doposud úspěšně validována pouze úzká skupina zónových modelů (příkladem je program CFAST), jejich správné použití cílí na výstupy základních charakteristik, obzvláště maximální teploty dosahované uvnitř tunelu během požární situace. [3, 13, 14, 17, 20]

Spolehlivá predikce šíření požáru a kouře v tunelech na základě fyzikálních principů prostřednictvím CFD modelů je slibným přístupem pro posílení bezpečnosti osob a zefektivnění návrhu požární bezpečnosti v podzemních liniových stavbách. Výstupy z numerických modelů požárních situací mohou dobře posloužit k vytváření konceptu a současně hodnocení závěrů analýzy rizik.

## 5 Doporučení pro zpracovatele modelů požáru v tunelových stavbách

Pro modelování požáru v tunelových stavbách jsou k dispozici různé výpočetní programy – doporučuje se využít bezplatně dostupného (*open-source*) programu FDS (z anglického *Fire Dynamics Simulator*). Tento software byl ověřen pro mnoho požárních scénářů na skutečných experimentálních datech velkorozměrových zkoušek. [21]

### 5.1 Strategie modelování požáru v tunelových stavbách

Modely požáru v tunelových stavbách mají reflektovat možné scénáře, které se mohou v tunelech vyskytovat. Vždy je nezbytné zohlednit i charakter provozu. U silničních tunelů je žádoucí věnovat pozornost nákladní dopravě. Požáry nákladních vozidel totiž nejsou ojedinělé a reálně dosahují značně vyšších tepelných výkonů oproti hodnotám běžně uvažovaných v návrhových předpisech – často přesahují 100 MW. V případě železničních tunelů se modelování požáru týká především vlaků osobní přepravy a všeobecně hnacích jednotek.

Modelování požáru nemá být postaveno na jediné (konstantní) hodnotě tepelného výkonu, ale má být přihlédnuto k jednotlivým fázím průběhu požáru. Klíčovým parametrem je také vliv ventilace, která může významně měnit chování kouře i rozložení teplot v tunelu. Při modelování požáru je nutné uvažovat více úrovní návrhových scénářů.

Cílem není navrhovat na extrémní, nereálné hodnoty, ale dosáhnout rovnováhy mezi pravděpodobností výskytu a dopadem – tedy vytvořit modely požáru, které odpovídají skutečným rizikům. Jen tak lze získat spolehlivý základ jak pro návrh konstrukcí a účinných požárních systémů, tak pro zefektivnění evakuace osob a optimalizaci zásahu jednotek PO.

### 5.2 Specifika rozvoje požáru

V rámci numerické simulace požáru lze modelovat hoření prostřednictvím předem definované funkce hodnoty rychlosti uvolňovaní tepla na jednotku plochy (HRRPUA) v závislosti na čase, anebo pomocí paliva, které hoří podle chemických reakcí popisující proces pyrolýzy.

Modely hoření využívající proces pyrolýzy jsou vysoce citlivé na veškerá vstupní data a s tím související nároky na jemnost výpočetní sítě – proti modelům se zdrojem hoření v podobě funkce

hodnoty HRRPUA lze dosahovat přesnějších výsledků, tomu ovšem odpovídají i dramatické požádkavy na výpočetní výkon (hardware) a současně časovou náročnost. Zmíněné numerické modely hoření s předepsanou funkcí hodnoty HRRPUA představují vhodnou alternativu pro poskytování přijatelných výsledků v oblasti teploty plynů, kouře a proudění se značnou redukcí výpočetní náročnosti. [7, 10, 20]

### 5.3 Teplotní křivky

Z hlediska matematického modelování požáru patří mezi nejjednodušší modely požáru nominální teplotní křivky (např. normová teplotní křivka ISO 834). Na těchto křivkách je založeno primárně zkoušení požární odolnosti konstrukčních prvků. Nominální teplotní křivky však mohou být v určitých případech velmi konzervativní, nebo naopak, pokud se jedná o požár s mimořádně velkou hodnotou uvolněného tepla (jako např. požár těžkého nákladního vozidla s hořlavým nákladem), mohou teploty v tunelu přesahovat hodnoty některých nominálních křivek. [4, 18]

Doposud neexistuje jednotný postup pro výběr teplotní křivky ve vztahu k rychlosti uvolňování tepla, rychlosti proudění vzduchu (resp. způsobu větrání), prostorové geometrii tunelu apod. V kontextu tunelových staveb je žádoucí použití požárně inženýrského přístupu založeného na teoretické analýze numerického modelování pomocí zónových nebo CFD modelů. [10, 19, 20]

### 5.4 Zónové modely požáru

Zónové modely požáru všeobecně nejsou vhodné pro modelování požáru v tunelech, neboť nejsou určeny pro simulace prostorů s jedním převládajícím rozměrem. Do dnešní chvíle bylo ovšem vyvinuto hned několik zónových modelů, které byly validovány i pro liniové stavby, např. zónový model CFAST. Jejich hlavní výhodou ve srovnání s CFD modely je jednoduchost aplikace a rychlosť výpočtu, kdy doba jedné simulace trvá obvykle několik vteřin až minut. Při správné aplikaci lze zónový model CFAST využít například pro rychlou představu o přibližných teplotách v modelovaném prostoru. [3, 17, 22, 23, 24, 25]

Modelování požáru v tunelech pomocí programu CFAST je při dodržení zde doporučených zásad možné, obnáší to však jistá omezení. Zásadní rozdíl oproti CFD modelům je v nutnosti modelovaný tunel segmentovat na menší části. Zónové modely požáru všeobecně nejsou určeny pro tunely, jakožto liniové stavby, což také odráží limity z hlediska rozměrů modelovaného prostoru. Přestože konkrétní rozměry nejsou v uživatelském manuálu přímo specifikovány, při modelování běžných místností uvnitř budov je obvykle ideální dodržet přibližný čtvercový nebo obdélníkový tvar modelovaného prostoru. [25, 26, 27]

V případě modelování delších tunelů je nutné prostor rozdělit na menší segmenty, které mezi sebou budou propojeny virtuálními otvory o velikosti průřezu tunelu. V dostupné literatuře však

není dostatek zdrojů k tomu, jak optimálně modelovaný tunel segmentovat. Na základě nejnovější studie se za nejfektivnější osvědčil přístup rozdelení prostoru do co nejmenšího počtu segmentů, jaký dovolují rozměrové limity programu CFAST (tzn. v poměru délky a šířky tunelu přibližně 7:1 až 10:1). [25, 27]

Nedoporučuje se dělení na segmenty v poměru stran menším než 7:1, neboť ve virtuálních otvorech mezi jednotlivými segmenty probíhá mnoho fyzikálních jevů, které zónový model CFAST nebere v úvahu vzhledem k jeho jednoduchosti (např. v porovnaní s CFD modely). Toto může představovat problém zejména pokud se jedná o dlouhý tunel, požár s velkým uvolněným teplem nebo pokud je ohnisko požáru umístěno v blízkosti těchto virtuálních otvorů.

Další limitací při modelování požáru v tunelech pomocí zónového modelu představuje vliv ventilačního průběhu požáru. V modelu CFAST nelze jednoduše definovat podmínky větrání pouhým zadáním rychlosti proudění vzduchu ( $m/s$ ) jako je tomu např. v CFD modelu FDS. Zónový model CFAST však standardně předpokládá přirozené větrání. Proudění přes vertikální otvory, jako jsou dveře a okna, je modelováno pomocí Bernoulliho rovnice pro tlakový rozdíl mezi dvěma prostory. Z předchozích studií věnujících se této problematice bylo zjištěno, že různé hodnoty proudění vzduchu nemají významný vliv na výsledné průběhy teplot z programu CFAST. Nedoporučuje se proto používat zónový model CFAST pro modelování komplexních podmínek větrání uvnitř tunelů. [22, 25, 26]

Poslední významné omezení souvisí s principem výpočtu teplot uvnitř hořícího prostoru. Zónový model CFAST standardně počítá průběhy teplot pro horní a spodní kouřovou vrstvu. Princip rozdelení výpočetního prostoru na dvě homogenní vrstvy (zóny) však není dobře aplikovatelný pro tunely. Pro zjištění průběhů teplot v libovolném místě modelovaného tunelu je proto doporučeno používat výhradně termočlánky. Teploty horkých plynů okolo termočlánků jsou počítány upravenými empirickými korelacemi specifickými pro tunely. Termočlánky přebírají teploty vrstev, ale navíc také zohledňují sálavý tok. Tímto způsobem výpočtu můžeme získat přesnější představu o teplotách v tunelu. [25, 27]

## 5.5 CFD modely požáru

V požárně inženýrské praxi představují CFD modely vysoký standard z hlediska modelování požáru – jsou nejpokročilejší dostupnou metodou numerického modelování. Uplatnění hojně nachází i při simulaci požáru v tunelových stavbách, tj. v prostorech s jedním převládajícím rozměrem. V této oblasti modelování požáru jsou k dispozici různé výpočetní programy – doporučuje se využití bezplatně dostupného (open-source) programu FDS (z anglického *Fire Dynamics Simulator*). Tento software byl ověřen pro mnoho požárních scénářů na skutečných experimentálních datech

velkorozměrových zkoušek. Při práci s FDS lze využít preprocesor, který usnadňuje tvorbu vstupního kódu, a postprocesor, jenž umožňuje vizualizaci výsledků. [3, 7, 17, 21]

Hlavním principem CFD modelů je rozdelení výpočetního prostoru na množství trojrozměrných buněk, konkrétně n-kontrolních objemů. Základní rovnice jsou založeny na principech zachování hmoty, energie, hybnosti a složení částic – Navierovy-Stokesovy rovnice (neboli tzv. N-S rovnice). Jedná se o trojrozměrné, časově závislé, nelineární parciální diferenciální rovnice. Tento numerický přístup zahrnuje celou historii průběhu modelu požáru, která zahrnuje lokální vývoj jednotlivých fyzikálních veličin. Teploty v požárním úseku jsou časově a prostorově závislé. Z tohoto důvodu je hlavní limitací CFD modelů především značná výpočetní doba (v řádu až několika dní) a s tím spojené požadavky kladené na hardware. [17, 21]

Omezením může být i samotná výpočetní síť – doporučuje se využívat rovnoměrnou výpočetní síť s délkou hrany jednotlivých kontrolních objemů podle velikosti požáru, viz podrobně manuál FDS. Nevhodně zvolená velikost výpočetní sítě může vést až k numerické nestabilitě. Při návrhu výpočetové sítě je vhodné provést analýzu citlivosti modelu na velikost výčtových buněk. [7, 21]

V rámci modelu požáru v programu FDS lze simulovat přirozené i nucené větrání tunelu – jednoduše definováním podmínky větrání prostřednictvím pouhého zadání rychlosti proudění vzduchu v m/s. Mnoho studií již zdůrazňuje, že při podélném proudění vzduchu tunelem alespoň 3,5 m/s dochází k eliminaci negativního jevu zpětného šíření kouře (tzv. back-layeringu). [3, 4, 10]

S ohledem na výše uvedené skutečnosti jsou v současné době CFD modely nejspolehlivějším způsobem, jak prostřednictvím numerického modelování získat přesnou představu o průběhu požáru v tunelech. Tato spolehlivá predikce šíření požáru a kouře v tunelech na základě fyzikálních principů prostřednictvím CFD modelů je slibným přístupem pro posílení bezpečnosti osob a zefektivnění návrhu požární bezpečnosti v podzemních liniových stavbách.

## 5.6 Výstupní parametry modelu požáru

S ohledem na posuzování konstrukcí tunelu, evakuace osob a zásahu jednotek PO je vhodné zohlednit následující výstupní parametry modelu požáru:

- Rychlosť uvolňování tepla (výstupní HRR)
- Hustota tepelného toku
- Teplota konstrukcí (ostění) tunelu
- Teplota plynů (nejen v blízkosti požáru, ale i v okolí – vazba na zásah jednotek PO)
- Tlakové poměry
- Směr a rychlosť šíření kouře
- Viditelnost
- Koncentrace CO a dalších toxických plynů

## 5.7 Koncepční řešení evakuace – zásady, limity

Tato kapitola stanovuje základní koncepční zásady pro volbu evakuačních scénářů a kritéria přijatelnosti prostředí při modelování požáru v tunelových stavbách. Metodika se nezabývá podrobnou simulací evakuace, ale poskytuje rámec, podle něhož je možné jednotně posuzovat vstupní údaje, limity a interpretovat výsledky modelů RSET–ASET. Cílem je zajistit srovnatelnost výstupů a konzistenci při navazujícím posouzení požární bezpečnosti tunelu.

Evakuace v tunelech je ovlivněna prostorovou orientací osob, úrovní informovanosti, viditelností a fyzikálními podmínkami prostředí. Lidské chování v krizových situacích má zásadní vliv na výslednou dobu evakuace a musí být bráno v úvahu při volbě vstupních parametrů i scénářů. Specifická rizikovost podzemních liniových staveb vyžaduje, aby koncepce evakuace zahrnovala nejen fázi sebezáchrany, ale i návaznost na činnost hasičů po jejich příjezdu.

### 5.7.1 Volba evakuačních scénářů

Pro každý tunel lze pracovat s několika reprezentativními evakuačními scénáři, které pokrývají různé provozní a konstrukční podmínky. Jejich volba by měla vycházet z analýzy rizik, typu tunelu (silniční, železniční) a charakteru větracího systému.

- Požár u portálu – ověření možnosti sebezáchrany směrem k portálu, vliv podélného sklonu a směru větrání na šíření kouře.
- Požár v referenční vzdálenosti – zpravidla v polovině mezi dvěma únikovými východy, reprezentuje nejdelší únikovou trasu.
- Požár v blízkosti CHÚC – hodnocení tlakových poměrů, funkce dveří, přetlaku a kouřotěsnosti při přístupu k CHÚC.
- Scénář se zhoršeným odvětráním – zahrnutí vlivu ztráty funkce jednoho ventilátoru nebo nedosažení kritické rychlosti (back-layering).
- Scénář s odstaveným dopravním prostředkem v nejméně přístupné části – prověření nejdelších tras k únikovým místům.

### 5.7.2 Vstupní předpoklady pro posouzení evakuace

Stanovení předpokladů pro model evakuace by mělo odpovídat typu tunelu, charakteru provozu a očekávanému chování osob při mimořádné události. Cílem není vytvořit statisticky přesný obraz osádky, ale realistický soubor vstupních dat, který umožní ověřit funkčnost koncepce evakuace.

U silničních tunelů se uvažují osoby opouštějící vozidla vlastními silami směrem k nejbližšímu únikovému východu nebo portálu. Zasahující hasiči nejsou součástí modelu evakuace, jejich pohyb je posuzován samostatně v rámci taktického zásahu.

U železničních tunelů se hodnotí evakuace cestujících a obsluhy vlaku z prostoru soupravy do chráněných nebo bezpečných oblastí. Zohledňuje se organizovaný postup vedený posádkou vlaku a doba potřebná k otevření dveří, spuštění nouzového osvětlení a orientaci cestujících.

Model by měl dále zohlednit osoby se sníženou pohyblivostí a další specifické skupiny. Pokud nejsou dostupné přesné údaje, lze použít odhad založený na průměrných hodnotách nebo provést citlivostní analýzu, která posoudí vliv pomalejšího pohybu na celkový čas evakuace.

### **5.7.3 Kritéria přijatelnosti prostředí**

Hodnocení přijatelnosti prostředí se provádí v dýchací zóně, obvykle ve výšce 1,5 až 1,8 m nad podlahou. Obvykle uvažované limitní hodnoty vycházejí z normy ISO 13571 a z mezinárodních studií zabývajících se evakuací osob v podmírkách požáru:

- Vидitelnost  $\geq 5$  m
- Teplota plynů  $\leq 60$  °C
- Koncentrace CO  $\leq 2000$  ppm
- FED  $\leq 0,3$  (odpovídá cca 10 % COHb)

Uvedené limity představují stav, při němž je možné předpokládat, že se osoby mohou bezpečně pohybovat po omezenou dobu v kouřovém prostředí. V místech zvýšeného rizika, zejména u vstupů do chráněných únikových cest nebo do bezpečných oblastí, je vhodné uvažovat přísnější hodnoty.

### **5.7.4 Zajištění podmínek pro evakuaci a zásah**

Řešení odvodu kouře a zajištění podmínek pro evakuaci je nedílnou součástí koncepce požární bezpečnosti tunelu. Zvolený způsob větrání by měl umožnit vytvoření podmínek, které po určitou dobu zajistí udržitelné prostředí na únikových trasách a v místech vstupu do chráněných prostor.

Při posuzování účinnosti větrání je vhodné zohlednit různé možné směry proudění kouře i varianty částečné nebo úplné poruchy systému. Cílem není simulovat přesnou činnost systému, ale ověřit, zda navržené řešení umožňuje evakuaci osob v přijatelných podmírkách a následný zásah jednotek PO.

Rozhraní mezi fází evakuace a fází zásahu by mělo být v návrhu jednoznačně určeno. Evakuace osob se obvykle ukončuje v bezpečné oblasti, odkud zasahující hasiči přebírají činnost spojenou s vyvedením osob na konečné bezpečné místo.

### 5.7.5 Posuzované výstupy a vyhodnocení

Každé posouzení evakuace by mělo poskytovat soubor výstupů, které umožní posoudit funkčnost koncepce a ověřit splnění stanovených limitů prostředí. Modelové scénáře mají být dokumentovány tak, aby bylo možné výsledky zpětně interpretovat a porovnávat.

Vyhodnocení by mělo zahrnovat zejména:

- porovnání časů RSET a ASET včetně přehledného uvedení všech složek RSET (detekce, reakce, přesun),
- citlivostní analýzu vybraných parametrů, jako je rychlosť pohybu osob, funkce větrání nebo obsazenost prostoru,
- grafické znázornění průběhu podmínek prostředí v čase a prostoru, zejména v únikových trasách a v blízkosti chráněných únikových cest,
- doporučení pro prostorové uspořádání únikových propojek a chráněných únikových cest, včetně návrhů na doprovodná opatření (nouzové osvětlení, značení, akustické navádění apod.).

Cílem vyhodnocení není dosáhnout jediného výsledku, ale získat přehled o rozsahu možných stavů prostředí a o rezervách mezi dobou potřebnou a dostupnou pro evakuaci.

### 5.7.6 Kdy uvažovat detailní model evakuace

Použití podrobného mikrosimulačního modelu evakuace (například Pathfinder, MassMotion) je vhodné zvážit v případech, kdy zjednodušené postupy neposkytují dostatečnou jistotu o správnosti výsledků. Takový model umožňuje lépe postihnout interakce mezi osobami, prostorová omezení a proměnné chování během pohybu.

Detailnější modelování je vhodné zejména tehdy, když:

- se doba potřebná pro evakuaci (RSET) přibližuje době, po kterou jsou v tunelu zachovány přijatelné podmínky prostředí (ASET),
- prostorové uspořádání tunelu je složité a obsahuje zúžené nebo vícestupňové trasy,
- není možné dostatečně ověřit, že navržené řešení zajistí vhodné podmínky pro pohyb osob,
- nebo se předpokládá vyšší podíl osob se sníženou pohyblivostí.

Takto pojaté rozšířené modelování by mělo být chápáno jako doplňkový nástroj pro ověření návrhu a pro podporu rozhodování při výběru koncepčních opatření.

## 5.8 Koncepční řešení/parametry pro zásah jednotek požární ochrany

Zásah jednotek požární ochrany v tunelové stavbě je specifický komplikovaným přístupem na místo požáru. Způsob vedení zásahu vychází z místních podmínek a plošného pokrytí jednotkami požární ochrany. Zpracování operativně taktické studie provedení požárního zásahu je nutné od počátku konzultovat s oddělením IZS místně příslušného HZS kraje.

### 5.8.1 Tunely železniční

V případě jednokolejných tunelů spojených propojkami se předpokládá vedení požárního zásahu z nezasažené tunelové trubky propojkou. Požární technika se odstavuje před portálem tunelu a dovnitř vjíždí jen technika bezprostředně k jízdě v kolejisti určená. Pro vedení zásahu z propojky k místu požáru je v rámci modelování požáru umístit do prostoru únikových chodníků do výšky 2 m čidla, která zaznamenávají vypočtenou teplotu plynu, hustotu tepelného toku a případě viditelnost, což jsou parametry, které omezují možnost vedení požárního zásahu v bezprostředním okolí zasaženého vlakové soupravy.

Dvojkolejný tunel umožňuje zásah jednotek požární ochrany zpravidla prostorem požárem zasaženého tubusu případně může být zásah veden z paralelní záchranné štoly nebo záchranných šachet. Příjezd požární techniky určené pro jízdu v kolejisti je možný pouze v tunelu požárem zasaženým. Model požáru tak poskytuje prvotní informaci o směru šíření kouře v posuzovaném požárním scénáři. Na základě tohoto scénáře se stanoví způsob vedení požárního zásahu. Pro vedení zásahu podél vlakové soupravy je vhodné osadit čidla snímající teplotu plynu, hustotu tepelného toku a viditelnost.

### 5.8.2 Tunely silniční

V silničních tunelech s jednosměrným provozem a dvěma tubusy je přístup jednotek požární ochrany zajištěn skrz požárem nezasažený tubus přes propojku. Zpravidla se předpokládá využití tunelových hydrantů pro vlastní hašení. Při jednosměrném provozu v tunelu je hořící vozidlo překážkou v provozu a vozidla ve směru jízdy opustí tunel. Podélné větrání tak je řízeno ve směru jízdy do prázdného prostoru tunelu. Vozidla, která stojí za hořícím vozidlem v koloně tak jsou chráněna a současně je umožněn přístup jednotek požární ochrany. Simulací je třeba ověřit podmínky, kdy dochází k "back-layeringu" zejména ve vazbě na podélný sklon tunelu.

V případě tunelu s obousměrným provozem je nutná koordinace požárního zásahu s řízením větrání v tunelu. Odstavená vozidla se mohou nacházet v obou směrech. Při modelování požáru je to nutné zohlednit ve více scénářích s různým nastavením podmínek ventilace. Dále je simulovaných scénářích osadit senzory pro zaznamenání teploty plynu, hustoty tepelného toku a viditelnosti. Na

základě vypočtených parametrů pak zpracovatel operativně taktické studie vyhodnotí přístup jednotek požárních ochrany k hořícímu vozidlu.

### 5.8.3 Stanovení potřebné intenzity dodávky hasebních látek

Průběh požáru v tunelové stavbě je pro účel simulace požáru zpravidla vyjádřen křivkou HRR vyházející z experimentů. Je vhodné využít křivku popisující nárůst na základě statistické analýzy s patřičnými odchylkami. V případě modelování požáru pro evakuaci osob a zásah je obvyklé si m ulovat pouze nárůst rychlosti uvolňování tepla do doby ukončení evakuace osob nebo zahájení aplikace hasiva. V uvažované době zahájení hašení tak je možné stanovit časově odpovídající HRR.

Rychlosť uvolňování tepla může být vodítkem pro vyhodnocení potřeby sil a prostředků jednotek požární ochrany. V případě počitačového modelování v tunelech se používá pevně daná křivka HRR. Model (zejména CFD), ale je schopen zohlednit skutečný průběh uvolňování tepla v závislosti na aktuálních ventilačních podmínkách.

Z fyzikálního hlediska je pro ohřev nutné dodat teplo odpovídající měrné tepelné kapacitě vody, tzn. přibližně  $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (musíme dodat  $4180 \text{ J}$  tepelné energie  $1 \text{ kg}$  vody, aby se ohřála o  $1 \text{ K}$ , resp.  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Pro vypaření vody o hmotnosti  $1 \text{ kg}$  je následně nutné dodat asi  $2,26 \text{ MJ}$  tepla.

Pro stanovení potřebného průtoku hasební vody pak je možné využít vztah:

Vztah pro potřebný průtok hasební vody:

$$q_p \geq \frac{\dot{Q} \cdot 60}{Q_w \cdot \chi}$$

kde je:

$Q$  rychlosť uvolňování tepla [MW]

$q_p$  průtok hasiva [ $\text{l}/\text{min}$ ]

$Q_w$  teoretická chladící kapacita:  $2,6 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

$\chi$  efektivita hašení [-]

### 5.8.4 Parametry simulované pro vyhodnocení zásahu jednotek PO

**Rychlosť uvolňování tepla (HRR)** – obvykle hodnota zadávaná jako vstup modelu. Může být v simulaci ovlivněna ventilačními podmínkami.

**Teplota plynů** – prostorová vizualizace nebo snímače parametru v jednotlivých bodech. Umístění snímačů v předpokládané trase vedení požárního zásahu.

**Hustota tepelného toku** – snímače parametru v jednotlivých bodech. Umístění v snímačů v předpokládané trase vedení zásahu.

**Viditelnost** – prostorová vizualizace, případně řez s gradientem a dále je možné využít také snímačů v bodech.

## 6 Doporučení pro posuzovatele modelů požáru v tunelových stavbách

Modelování požáru v tunelu je technicky náročný proces, ale i osoba bez hlubokých znalostí požárních simulací může posoudit, zda model splňuje základní kritéria. Níže jsou uvedeny klíčové parametry a doporučení, které by měl posuzovatel projektu zkonto rovat:

### 1) Definice požárního scénáře:

- **Zdroj požáru** – je jasné uvedeno, co je zdrojem požáru (např. osobní auto, nákladní vozidlo, přeprava nebezpečných látek), jaký je uvažován rozvoj požáru, jaká je reakce hoření a délka požáru? Případně je popsán přenos požáru mezi dopravními prostředky?
- **Vývin tepla (HRR)** – je uveden průběh uvolňovaného tepla (HRR), např. 30 MW pro HGV, a je řádně ocitováno, z jaké literatury nebo experimentu byl průběh převzat?
- **Doba trvání požáru** – je scénář časově ohraničen (např. 30 minut) a je toto případně zkoordinováno s délkou evakuace nebo požárního zásahu?

### 2) Použitý model a software

- **Typ modelu** – je uvedeno, zda se jedná o CFD model (např. FDS) nebo zónový model (např. CFAST)? Případně jestli je zjednodušeně uvažována pouze nominální teplotní křivka? Je uvedeno zdůvodnění vybraného modelu?
- **Verze softwaru** – je uvedena použitá verze programu? Pokud se nejedná o nejaktuálnější verzi, je uveden důvod?
- **Validace modelu** – je model porovnán s reálnými daty nebo experimenty? Je provedeno nezávislé vyhodnocení výsledků, aby bylo prokázáno, že výsledky lze uvažovat za správné a zkonto rované?

### 3) Geometrie tunelu a podmínky

- **Rozměry tunelu** – jsou správně zadány délka, výška, šířka? Pokud je tunel zjednodušeně uvažován jako přímý, i když ve skutečnosti není, je uvedeno odůvodnění případně je řádně zohledněno v modelu (např. pomocí přepočtu gravitačního zrychlení)?

- **Větrání** – je popsán typ větracího systému (podélný, příčný)? Je popsáno, s jakým typem větrání se uvažuje a proč (přirozený nucený)?
- **Umístění požáru** – je jasně definováno, kde požár vzniká a proč?

#### 4) Ochrana osob a evakuace

- **Scénář** – je popsán a vyhodnocen scénář, který je uvažován – vazba požár vs. evakuace (např. požár je před únikovým východem a tím je na straně bezpečné únikový východ eliminován)?
- **Simulace šíření kouře** – je uvedeno, jak rychle se kouř šíří a kam?
- **Doba pro bezpečnou evakuaci** – je porovnána s časem, kdy se prostředí stává nebezpečným (vyhodnocení viditelnosti, koncentrací a teploty)?
- **Umístění únikových cest** – jsou v modelu zahrnuty, schematicky zakresleny a popsány?

#### 5) Výstupy a interpretace

- **Grafy a vizualizace** – obsahuje model alespoň následující výstupy: teploty, viditelnost, koncentrace, HRR (input vs. output)?
- **Srozumitelnost** – jsou výstupy vysvětleny? Jsou uvedeny sledované limitní hodnoty dílčích veličin?
- **Závěry a doporučení** – obsahuje model návrh opatření nebo úprav, případně vyhodnocení, zda tunelová stavba vychovuje/nevyhovuje?

#### 6) Dokumentace

- **Úplnost dokumentace** – je model doplněn o vstupní data, požární scénáře, případně analýzu rizik, výpočty, výstupy, komentáře, grafickou přílohu, citované zdroje?
- **Autor** – je uveden autor modelu a jeho kvalifikace?
- **Koordinace** – byl model, resp. záměr řádně konzultován a projednán jak s klientem, tak se zástupci oddělení stavební prevence případně oddělení IZS a služeb na HZS?

**Doporučení:** Posuzovatel by měl požadovat, aby model byl doplněn o stručné shrnutí pro neodborníky, které vysvětlí hlavní rizika, navržená opatření a limity modelu. Pokud některý z výše uvedených bodů chybí, je vhodné požádat o doplnění.

## 7 Závěr

Modelování požáru pomocí zpřesněných metod v tunelových stavbách je vhodným nástrojem pro zajištění bezpečné evakuace, vyhodnocení teplot ve vazbě na požární odolnost konstrukce a případně pro stanovení parametrů pro požární zásah.

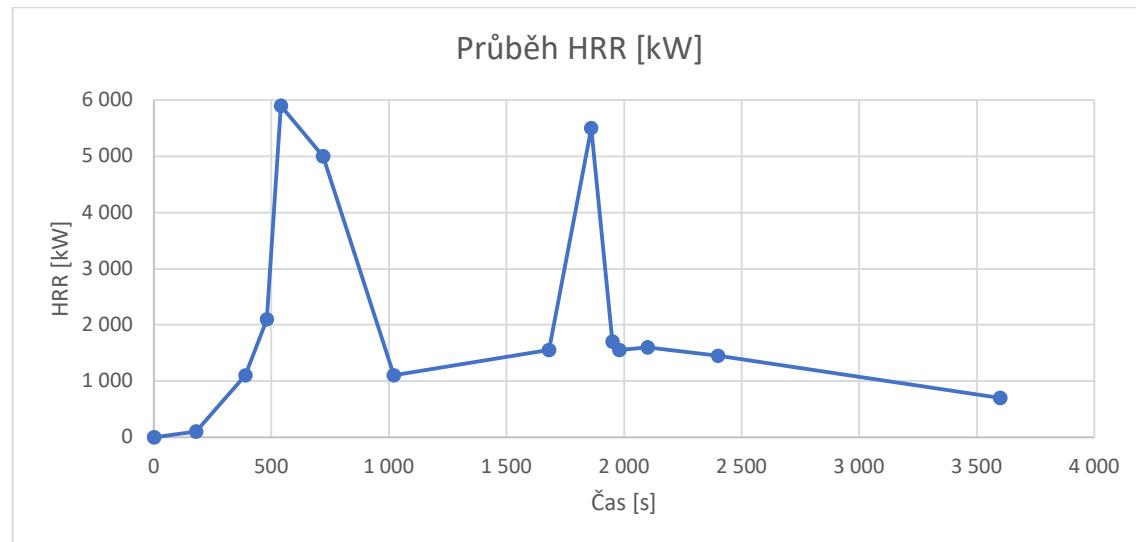
Tato metodika vznikla jako reakce na rostoucí technické nároky, komplexnost moderních tunelů a potřebu jednotného přístupu k této problematice. Jejím cílem je poskytnout obecný teoretický základ s konkrétním doporučením. To umožňuje kvalitní návrh, posouzení i provoz tunelových staveb z hlediska požární bezpečnosti.

Zvláštní důraz je kladen na to, aby model požáru byl zpracován odborně, transparentně a s využitím zpřesněných výpočetních metod, jako jsou zejména CFD modely požáru, které jsou oproti nominálním teplotním křivkám případně zónovým modelům požáru doporučeny autory této metodiky. Tyto metody vyžadují nejen technické znalosti, ale i zkušenosti s interpretací výstupů, valiací modelu a správným nastavením vstupních parametrů. Proto je nezbytné, aby autor modelu disponoval dostatečnou odborností.

Metodika zároveň upozorňuje na důležitost spolupráce mezi projektanty, investory, provozovateli tunelů a zástupci HZS.

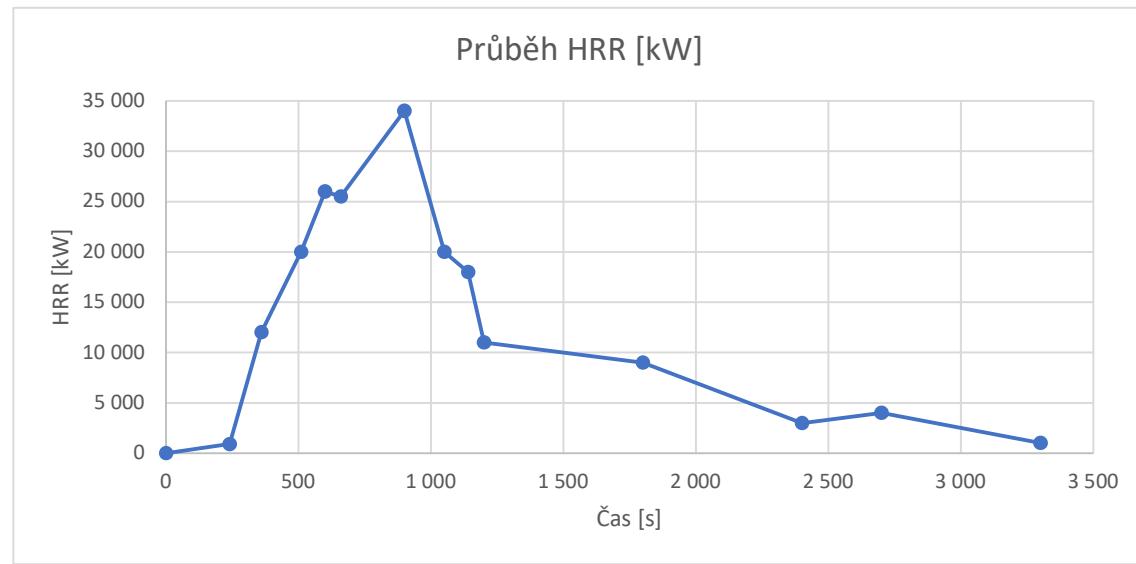
## Příloha 1 – Referenční hodnoty HRR dopravních prostředků

### Osobní automobil



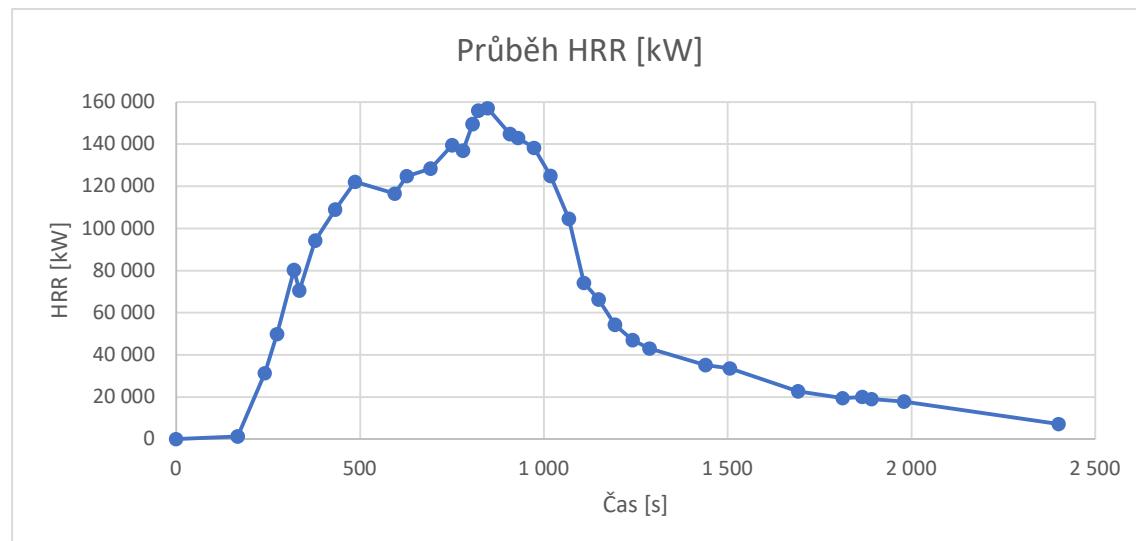
Obr. 9 – Referenční rychlosť uvoľňovania tepla pre požiar osobného automobilu [28]

### Autobus



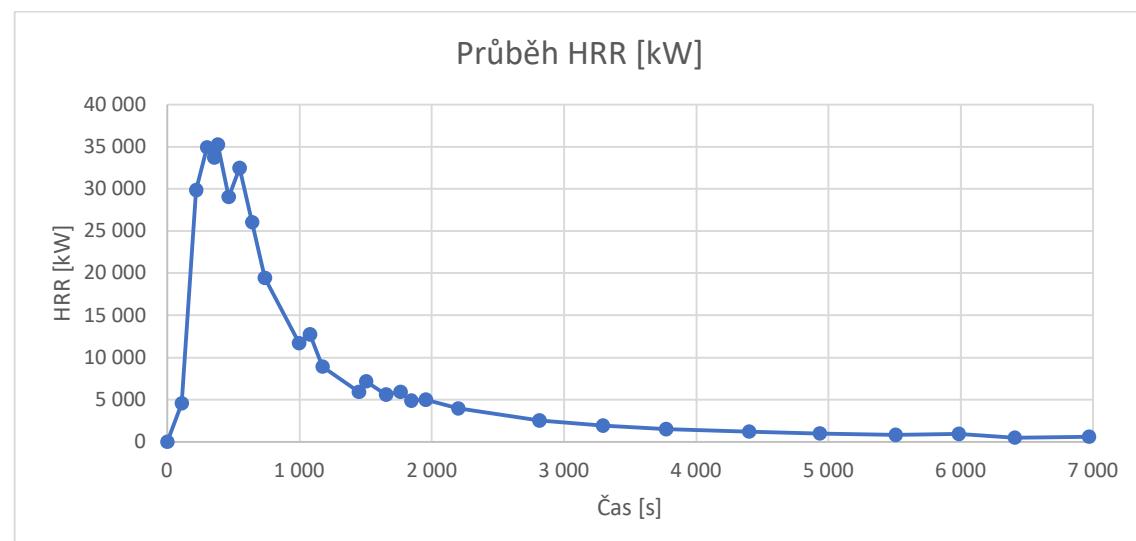
Obr. 10 – Referenční rychlosť uvoľňovania tepla pre požiar autobusu [28]

### Těžké nákladní vozidlo



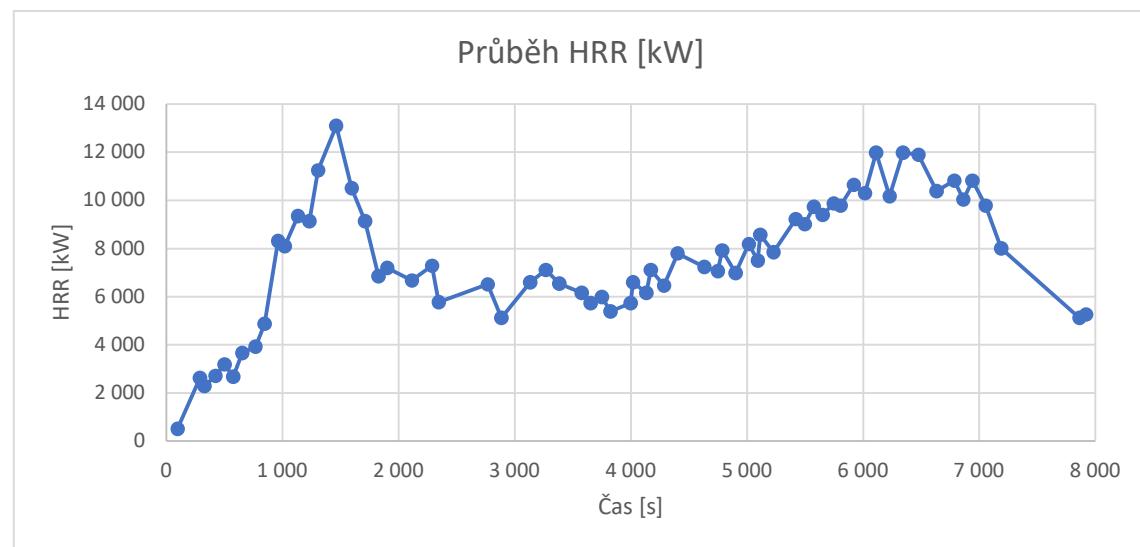
Obr. 11 – Referenční rychlosť uvoľňovania tepla pre požár těžkého nákladného vozidla [28]

### Vůz metra



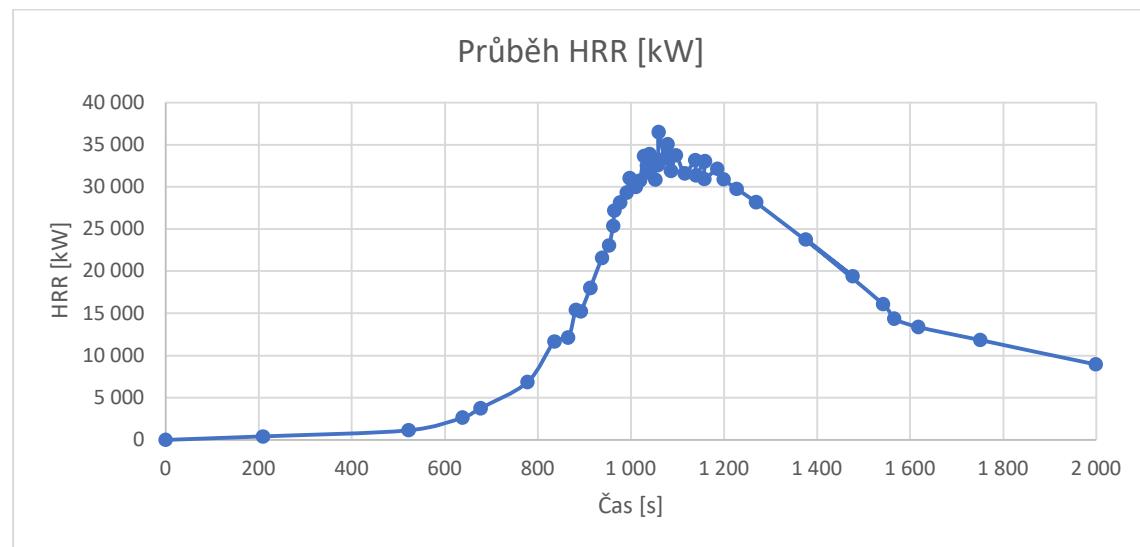
Obr. 12 – Referenční rychlosť uvoľňovania tepla pre požár vozu metra [28]

### Vůz osobního vlaku



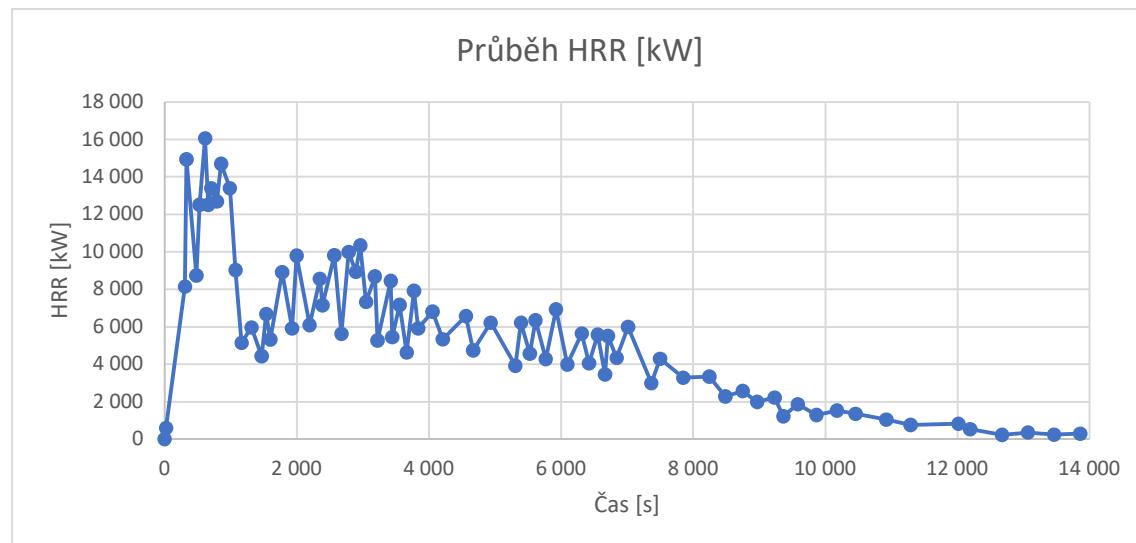
Obr. 13 – Referenční rychlosť uvoľňovania tepla pre požiar vozu osobného vlaku [28]

### Vůz vysokorychlostního vlaku



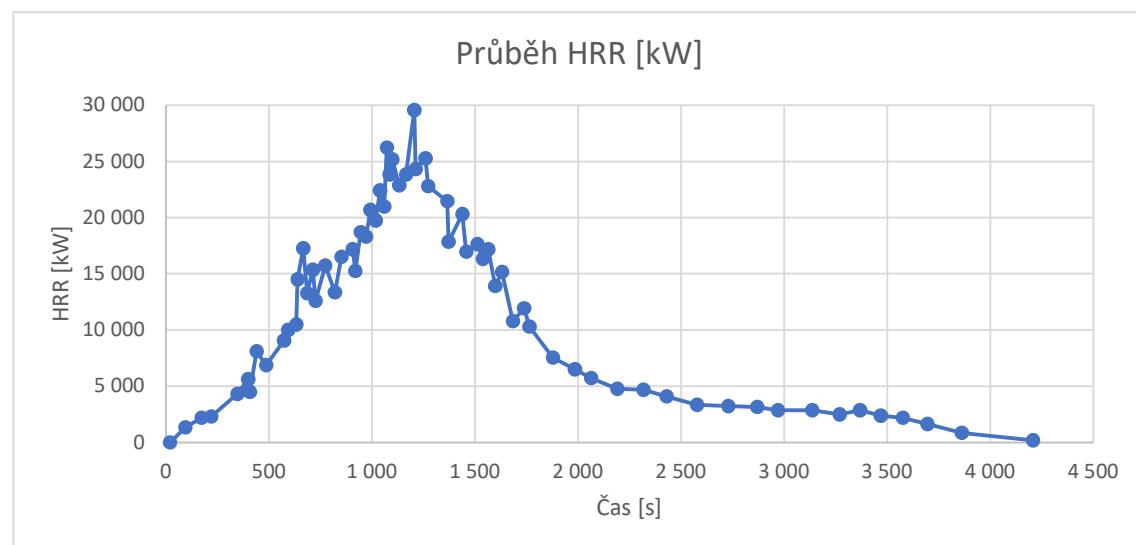
Obr. 14 – Referenční rychlosť uvoľňovania tepla pre požiar vozu vysokorychlosného vlaku [28]

### Důlní kolový nakladač



Obr. 15 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar dôlného kolového nakladače [28]

### Důlní vrtná souprava



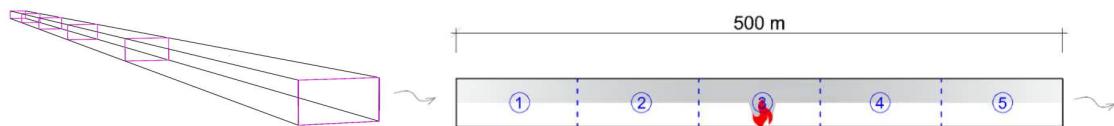
Obr. 16 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar dôlní vrtné soupravy [28]

## Příloha 2 – Stručný popis modelování požáru v programu CFAST

Zónový model CFAST má uživatelsky přívětivé rozhraní. Podrobný návod na modelování požáru pomocí programu CFAST je popsán v uživatelském manuálu – zde jsou vyzdvihнута pouze specifika související s modelováním požáru v tunelech. [22, 25]

Vstupy potřebné pro modelování požáru v tunelech zahrnují minimálně geometrii tunelu, materiálové charakteristiky tunelového ostění, průběh požáru a spalné teplo paliva. Průběh požáru lze definovat např. pomocí křivky rychlosti uvolňování tepla pro konkrétní dopravní prostředky, viz Přílohu 1 v této metodice. Jako hlavní palivo lze uvažovat převládající materiál nebo chemickou látku.

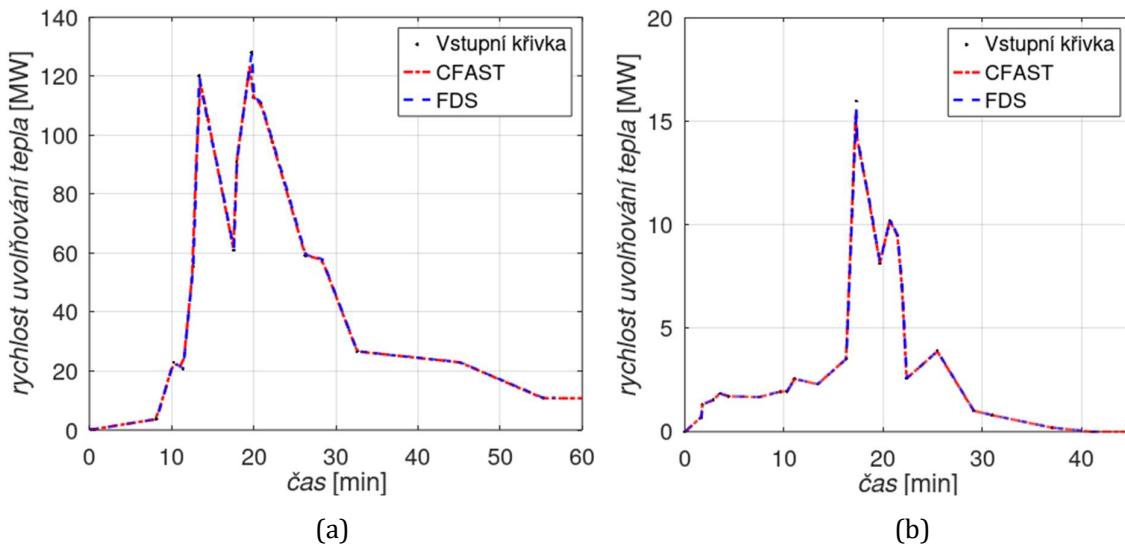
Jak bylo zmíněno výše, modelovaný tunel je nutné segmentovat na menší úseky. Jednotlivé segmenty jsou vytvořeny jako na sebe navazující místnosti (značeno „Compartments“), které jsou mezi sebou propojeny virtuálními otvory (záložka „Wall Vents“). Velikost otvoru odpovídá velikosti průřezu tunelu. V níže uvedeném ilustrativním příkladu byl tunel délky 500 m s průřezem šířky 10 m a výšky 5 m segmentován na nejmenší možný počet segmentů, jaký dovoluje rozměrové limity zónového modelu, viz Obr. 17. V tomto případě byla maximální možná délka jednoho segmentu 100 m, při poměru stran 10:1.



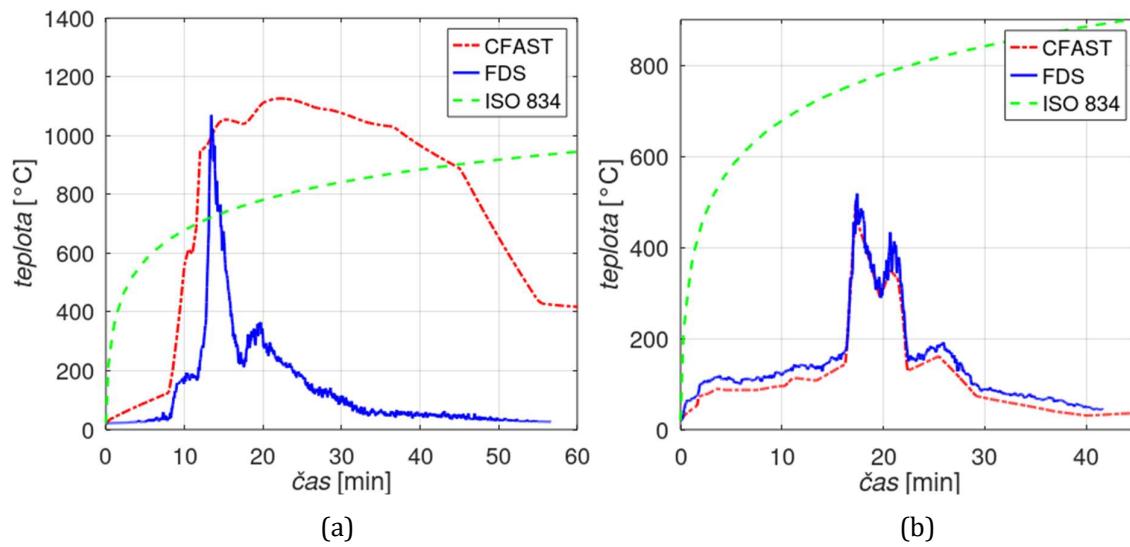
Obr. 17 – Ukázka segmentace tunelu [X]

Průběhy teplot uvnitř tunelu v požadovaném místě je doporučeno sledovat pomocí termočlánků (záložka „Targets“), které se nadefinují pomocí souřadnic. V programu CFAST obvykle nenastává odklon kužele hoření, proto maximální teploty pod stropem jsou v ose zdroje požáru.

Níže je ukázka výsledků z programu CFAST a jeho porovnání s CFD modelem FDS pro dva různé požární scénáře, a to požár těžkého nákladního vozidla s nákladem dřeva (s maximálním uvolněním teplem 128,1 MW) a požár tří osobních automobilů s nádrží na benzín (s maximálním uvolněním teplem 16,0 MW). Je zde zobrazen graf rychlosti uvolňování tepla (Obr. 18) a graf maximálních teplot horkých plynů pod stropem (Obr. 19), který je doplněn normovou teplotní křivkou ISO 834. Při aplikaci uvedených doporučení byla v obou případech zaznamenána dobrá shoda maximálních teplot s programem FDS.



Obr. 18 – Rychlosť uvoľňovania tepla: (a) Požiar nákladného vozidla; (b) Požiar 3 automobilov [X]



Obr. 19 – Max. teploty pod stropom: (a) Požiar nákladního vozidla; (b) Požiar 3 automobilov [X]

## Příloha 3 – Stručný popis modelování požáru v programu FDS

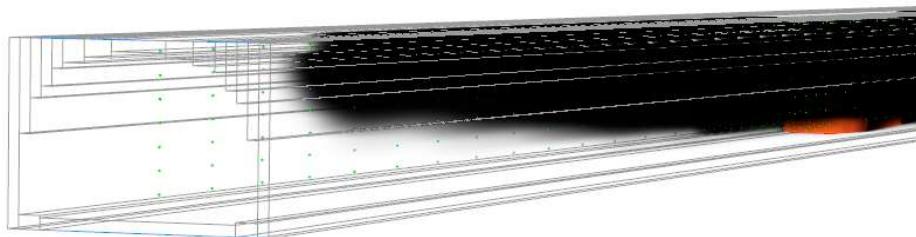
Výpočetní program FDS (z anglického *Fire Dynamics Simulator*) je jedním z nejpoužívanějších CFD softwarů na světě, zejména díky své bezplatné dostupnosti a nepřetržité údržbě ze strany vývojářů. Program je velmi rozšířený i v tuzemsku a lze nalézt mnoho příkladů jeho praktického využití, a to nejen v komplikovaných prostorech podzemních tunelových staveb. FDS je CFD model vyvíjený americkým Národním institutem pro normalizaci a technologii (NIST). K práci v programu FDS je možné využít pre-procesor, který usnadní sestavování vstupního kódu, a post-procesor, díky němuž je možné graficky znázornit výsledky. Grafické rozhraní pro uživatele při přípravě vstupního souboru zajišťuje např. uživatelsky přívětivá programová nadstavba Pyrosim. Vizualizace výsledků je pak umožněna pomocí integrované programové nadstavby Smokeview. Podrobný návod k modelování požáru pomocí programu FDS lze naleznout přímo v uživatelském manuálu – níže je uveden pouze základní popis pro orientaci v programu FDS. [19, 21, 29]

Vstupní parametry v rámci programu FDS tvoří výpočetní síť (trojrozměrné kontrolní objemy), geometrie tunelu, vlastnosti materiálů, vlastnosti okolního prostředí, zdroj hoření, reakce hoření, případně rovnice pyrolýzy, výpočetní doba a krok, a požadované výstupy. Pokročilí uživatelé mohou nastavit vlastnosti modelu turbulence a radiačního modelu.

Výstupy z programu FDS mohou zahrnovat teplotu plynů, tlak a hustotu plynů, rychlosť proudění plynů, výšku kouřové vrstvy, koncentraci plynů (vodní páry, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>), koncentraci kouře a viditelnost atp. Ověření shody výstupních dat simulací s výsledky z experimentů je předmětem mnoha studií. [21]

Výpočetní prostor v programu FDS se rozděluje na množství trojrozměrných buněk, konkrétně na n-kontrolních objemů (tzv. Mesh). Základní rovnice jsou založeny na principech zachování hmoty, energie, hybnosti a složení částic – Navierovy-Stokesovy rovnice (neboli tzv. N-S rovnice). Tento numerický přístup zahrnuje celou historii průběhu modelu požáru, která zahrnuje lokální vývoj jednotlivých fyzikálních veličin.

Poté se vytvoří 3D geometrie tunelu (Obr. 20) pomocí materiálů ze sekcí „Materials“ a „Surfaces“. Sklonové poměry tunelů se řeší prostřednictvím přepočtu gravitace.



Obr. 20 – 3D vizualizace geometrie silničního tunelu

Následně musí být zadány atributy a reakce hoření v sekcích „Species“ a „Reactions“. Samotný požár je zpravidla zadefinován hořákem a předdefinovanou křivkou HRRPUA přes sekce „Surfaces“ a „Model – Vent“.

V rámci modelu požáru v programu FDS lze simulovat přirozené i nucené větrání tunelu – jednoduše definováním podmíny větrání prostřednictvím pouhého zadání rychlosti proudění vzduchu v m/s, konkrétně v sekci „Surfaces“. Mnoho studií již zdůrazňuje, že při podélném proudění vzduchu tunelem alespoň 3,5 m/s dochází k eliminaci negativního jevu zpětného šíření kouře (tzv. back-layeringu). [3, 4]

V neposlední řadě je zapotřebí umístit do prostoru tunelu teplotní čidla (prostorová či povrchová) v sekci „Devices“ nebo celé roviny teplotních profilů v sekci „Results – 2D Slices“, a to podle toho, co je výpočtem sledováno.

Nakonec lze výpočet spustit – doporučuje se nejprve spustit výpočet s hrubší výpočetní sítí a otestovat správnost provedení modelu. Při zjemnění výpočetní sítě je vhodné respektovat online kalkulátor výpočetní sítě, viz přímo manuál programu FDS. Jemnost výpočetní sítě má totiž zásadní vliv na výpočetní dobu a s tím spojené požadavky kladené na hardware. [21]

## Citovaná literatura

- [1] Česká tunelářská asociace ITA-AITES. *Tunel (časopis)*. Praha, 2013.
- [2] LAPIŠ, Petr, MAŘÍK, Libor, PRAJZLER, Vladimír, SVOBODA, Martin, VLADÍK, Jakub. *Vzorové listy staveb pozemních komunikací – VL 5 – Tunely*. Praha : Ministerstvo dopravy ČR, 2023.
- [3] INGASON, Haukur, ZHEN LI, Ying, LÖNNERMARK, Anders. *Tunnel Fire Dynamics*. Springer, 2015. ISBN: 978-1-4939-2198-0. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2199-7>.
- [4] ZHEN LI, Ying, INGASON, Haukur. *Overview of Research on Fire Safety in Underground Road and Railway Tunnels*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 81, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.013>.
- [5] CARVEL, Richard, N. BEARD, Alan. *The Handbook of Tunnel Fire Safety*. Emerald Publishing Limited, 2005. ISBN: 978-0-7277-3875-2. <https://doi.org/10.1680/hotfs.31685>.
- [6] ČSN 73 7507. *Projektování tunelů pozemních komunikací*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [7] BORGHETTI, Fabio, DERUDI, Marco, GANDINI, Paolo, FRASSOLDATI, Alessio. *Tunnel Fire Testing and Modeling*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2017. ISBN: 978-3-319-49516-3. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49517-0>.
- [8] BENÝŠEK, Martin, ŠTEFAN, Radek. *FMC – Fire Models Calculator (software)*. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta stavební, K133, 2015.
- [9] Department of Transport. *Report on the Derailment and Fire that occurred on 20th December 1984 at Summit Tunnel*. London : Railway Inspectorate, 1986.
- [10] INGASON, Haukur. *Fire testing in road and railway tunnels*. Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102801-8.00011-9>.
- [11] TING HONG, Wei, CLIFTON, Geoffrey, D. NELSON, John. *Railway accident causation analysis: Current approaches, challenges and potential solutions*. Accident Analysis & Prevention, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107049>.
- [12] KHAKSARI HADDAD, Razieh, MALUK, Cristian, REDA, Eslam, HARUN, Zambri. *Critical Velocity and Backlayering Conditions in Rail Tunnel Fires: State-of-the-Art Review*. Journal of Combustion, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3510245>.
- [13] WALD, František, POKORNÝ, Marek, CÁBOVÁ HOROVÁ, Kamila, HEJTMÁNEK, Petr, NAJMANOVÁ, Hana, BENÝŠEK, Martin, KUREJKOVÁ, Marta, SCHWARZ, Ivo. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha : ČVUT v Praze, 2017. ISBN: 978-80-01-05633-2.

- [14] DRYSDALE, Dougal. *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. ISBN: 9781119975465.
- [15] FU, Ian, RICKARD, Ieuan, JAMES HOPKIN, Danny, SPEARPOINT, Michael. *Application of Python Programming Language in Structural Fire Engineering – Monte Carlo Simulation*. Conference: Interflam, 2019.
- [16] SHRIVASTAVA, Mayank, K. ABU, Anthony, P. DHAKAL, Rajesh, J. MOSS, Peter. *State-of-the-art of probabilistic performance based structural fire engineering*. Journal of Structural Fire Engineering, 2019. <https://doi.org/10.1108/JFFE-02-2018-0005>.
- [17] KUČERA, Petr, PEZDOVÁ, Zdeňka. *Základy matematického modelování požáru*. Ostrava : SPBI, 2010. ISBN: 9788073850951.
- [18] ČSN EN 1991-1-2 ed. 2. *Eurokód 1: Zatízení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatízení – Zatízení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha : Česká agentura pro standardizaci, 2024.
- [19] HENG YEOH, Guan, KIT YUEN, Kwok. *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*. Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN: 978-0-7506-8589-4. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8589-4.X0001-4>.
- [20] WĘGRZYŃSKI, Wojciech, TOFIŁO, Piotr, POROWSKI, Rafal. *Hand calculations, zone models and CFD – areas of disagreement and limits of application in practical fire protection engineering*. Warsaw : SFPE 11th Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4974.3604>.
- [21] B. MCGRATTAN, Kevin, P. FORNEY, Glenn, a kol. *Fire Dynamics Simulator (software)*. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, od 2000.
- [22] H. KLOTE, John, P. FORNEY, Glenn. *Zone Fire Modeling With Natural Building Flows and a Zero Order Shaft Model*. Gaithersburg : NISTIR 5251, 1993.
- [23] KARLSSON, Björn, G. QUINTIERE, James. *Enclosure Fire Dynamics, Second Edition*. CRC Press, 2022. ISBN: 9781315163819. <https://doi.org/10.1201/b22214>.
- [24] SVOBODOVÁ, Nicole, BENÝŠEK, Martin, ŠTEFAN, Radek. *Analysis of Zone Fire Models and their Application in Structural Fire Design*. Curich : Trans Tech Publications Ltd, 2021. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.322.127>.
- [25] D. PEACOCK, Richard, A. RENEKE, Paul, P. FORNEY, Glenn. *CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (software)*. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, od 1990.

- [26] BAMONTE, Patrick, FELICETTI, Roberto, G. GAMBAROVA, Pietro, NAFARIEH, Alireza. *On the Fire Scenario in Road Tunnels: A Comparison between Zone and Field Models.* Applied Mechanics and Materials, Volume 82, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.82.764>.
- [27] SVOBODOVÁ, Nicole. *Využití zónových modelů požáru při modelování požáru v tunelech.* Praha : ČVUT v Praze, Fakulta stavební, K133, 2022.
- [28] *Metodika modelování požáru v tunelových stavbách (příloha – hodnoty HRR).*
- [29] *Pyrosim (software).* Thunderhead Engineering, od 2007.

## Doporučená literatura

EUREKA Project EU499. *Fire in Tunnels – Experimental Research and Recommendations.*  
Brusel : Evropská komise, 2001.

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Schématický příčný řez raženým dvojkolejným železničním tunelem [1] .....	10
Obr. 2 – Typový příčný řez raženým dvoupruhovým dálničním tunelem [2] .....	10
Obr. 3 – Schématický příčný řez hloubeným dvojkolejným železničním tunelem [1] .....	11
Obr. 4 – Typový příčný řez hloubeným dvoupruhovým dálničním tunelem [2] .....	11
Obr. 5 – Schéma rozdělení silničních tunelů podle jejich délky [6] .....	13
Obr. 6 – Předpokládaný maximální výkon požáru (v MW) pro jednotlivé dopravní prostředky [7]	
.....	14
Obr. 7 – Nominální teplotní křivky (HC, HCM, RABT, RWS) určené pro tunelové stavby [8] .....	15
Obr. 8 – Schéma rozdělení modelů požáru [13] .....	18
Obr. 9 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar osobného automobilu [28] .....	33
Obr. 10 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar autobusu [28] .....	33
Obr. 11 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar těžkého nákladného vozidla [28] .....	34
Obr. 12 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar vozu metra [28] .....	34
Obr. 13 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar vozu osobného vlaku [28] .....	35
Obr. 14 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar vozu vysokorychlostného vlaku [28] .....	35
Obr. 15 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar dôlného kolového nakladače [28] .....	36
Obr. 16 – Referenční rychlosť uvolňovania tepla pre požiar dôlné vrtné soupravy [28] .....	36
Obr. 17 – Ukázka segmentace tunelu [X] .....	37
Obr. 18 – Rychlosť uvolňovania tepla: (a) Požiar nákladného vozidla; (b) Požiar 3 automobilov [X]	38
Obr. 19 – Max. teploty pod stropom: (a) Požiar nákladného vozidla; (b) Požiar 3 automobilov [X]	38
Obr. 20 – 3D vizualizace geometrie silničného tunelu .....	39