

VYUŽITÍ ZÓNOVÝCH MODELŮ POŽÁRU PŘI MODELOVÁNÍ POŽÁRU V TUNELECH

Nicole Svobodová, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
nicole.svobodova@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek se zabývá využitím zónových modelů požáru při modelování požárů v silničním železobetonovém tunelu délky 500 m. Je zde stručně popsán dosavadní stav poznání v oblasti charakteristik požárů v tunelech. Požár je simulován pomocí vybraných programů využívajících zónový model požáru, tj. pomocí programu CFAST a B-RISK. V obou programech je uvažován požární scénář pro případ hoření těžkého nákladního vozidla (HGV) s nákladem dřeva. Ohnisko požáru je umístěno uprostřed tunelu. Požární scénář je modelován na základě křivky rychlosti uvolňování tepla převzaté z již existujícího experimentu. V obou programech je uvažováno s prostorovou segmentací modelovaného tunelu s ohledem na limity zónových modelů požáru. Výstupy z obou zónových programů jsou převedeny do tabulkového procesoru. Následně je provedeno porovnání výsledných grafů, a to především grafu rychlosti uvolňování tepla a průběhu teplot plynů v horní kouřové vrstvě. Oba programy jsou nakonec zhodnoceny z hlediska relevantnosti jejich výstupů vzhledem k modelovanému prostoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Požár v tunelu • Zónový model požáru • Software na modelování požáru

ABSTRACT

This article deals with the use of fire zone models in modelling reinforced concrete road tunnel fires. The current state of knowledge in the field of tunnel fire characteristics is briefly described here. The fire is simulated using selected fire zone modelling programme tools, i.e., using the CFAST and B-RISK programmes. In both programmes, a fire scenario is considered in the event of a burning heavy goods vehicle (HGV) with a load of timber. The fire source is located in the middle of the tunnel. The fire scenario is modelled on the basis of the heat release rate curve taken from an existing experiment. In both programmes, the spatial segmentation of the modelled tunnel is considered with regard to the fire zone model limits. The outputs from both fire zone programmes are transferred to the spreadsheet. Subsequently, a comparison of

the resulting graphs is performed, especially the heat release rate graph and the upper layer temperature graph. Both programmes are finally evaluated in terms of the relevance of their outputs with respect to the modelled space.

KEYWORDS

Tunnel Fire • Zone Fire Model • Fire Modelling Software Tool

1. ÚVOD

Tunely představují kritickou součástí dopravní infrastruktury, a to jak v hornatých oblastech, tak ve velkých městech. Při požárech v tunelech je kvůli hořícím pohonným hmotám a uzavřenosti prostoru obvykle dosahováno extrémních teplot mnohem dříve než při požárech v budovách. Pravděpodobnost propuknutí požáru je až dvacetkrát vyšší v silničních tunelech než v tunelech železničních (Munich Reinsurance Group 2003) a tyto požáry mohou být často fatální, vzhledem ke vzniku kouře a toxických zplodin hoření a možné nadměrné době trvání požáru (jako např. požár v tunelu Mont Blanc v roce 2001). Je zřejmé, že tunelům z hlediska požární bezpečnosti je třeba věnovat dostatečnou pozornost. V matematickém modelování požáru existují zjednodušené modely (tj. zejména nominální a parametrické teplotní křivky) a zpřesněné modely. Pro zjištění průběhu požáru je možné provést teplotní analýzu prostoru. K tomu lze využít CFD modely, nebo zónové modely požáru. Přestože využití zónových modelů požáru není pro tento druh prostoru typické, v dnešní době již existují zónové programy, které dokáží modelovat požár v tunelech a na ně je tento článek zaměřen (Jacobs 2007, Karlsson et al. 2000).

2. CHARAKTERISTIKY POŽÁRŮ V TUNELECH

Požáry v tunelech se od otevřených požárů liší zejména vlivem přirozeného větrání na průběh hoření a tepelnou zpětnou vazbou z okolního prostředí (Beard et al. 2012, Ingason et al. 2015).

V minulosti došlo k mnoha velkým požárům v silničních tunelech, železničních tunelech i metrech. Při analýze počtu skutečných požárů v silničních tunelech dominují svými

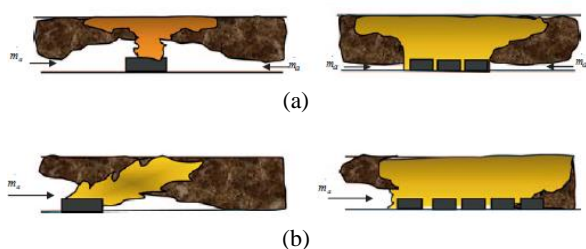
* Školitel: Ing. Josef Novák, Ph.D.

následky požáry těžkých nákladních vozidel (Heavy Goods Vehicle – HGV), a to jak z hlediska poškození konstrukce tunelu, tak z hlediska počtu úmrtí. Požáry v železničních tunelech je ve většině případů obtížnější odhalit a nelze je uhasit, dokud se vlak zcela nezastaví. Riziko vážné nehody s mnoha úmrtími je proto mnohem vyšší v železničních tunelech nebo metrech než v silničních tunelech. Hašení požárů v kolejových vozidlech je extrémně obtížné a představuje enormní zátěž pro záchranné složky. V případě požárů v metrech je oproti železničním nehodám následkem více úmrtí (Ingason et al. 2015).

2.1. Vliv ventilace

Z hlediska požární bezpečnosti tunelů má větrání kritický vliv na rozvoj požáru a proces spalování. Základní znalosti fyzikálních vlastností požárů v tunelech vycházejí z výzkumů požárů v uzavřených prostorech nebo chodbách (Ingason et al. 2015).

Požáry v tunelech jsou obecně řízeny palivem vzhledem k omezenému přístupu vzduchu (Obr. 1). V tunelech bez umělé ventilace může být zejména při požáru více vozidel přívod vzduchu nedostatečný k udržení úplného spalování (např. požáry na Mont Blancu, Tauernu a St. Gotthardu) (Beard et al. 2005). To vede ke zvýšení produkce oxidu uhelnatého (CO) a veškerý kyslík dopravovaný do zdroje ohně může být spotřebován. Tunely jsou obvykle vybaveny nuceným větráním (Ingason et al. 2015).



Obr. 1: Požár řízený palivem (levá strana) a požár řízený ventilací (pravá strana): (a) tunel s přirozeným větráním; (b) tunel s nuceným větráním (Ingason et al. 2015)

2.2. Parametry průběhu požáru

Mezi nejdůležitější parametry průběhu požáru v tunelu patří rychlost uvolňování tepla (Heat Release Rate – HRR), rychlost proudění, efektivní výška tunelu a geometrie zdroje požáru. Ze zkušeností z velkých požárů v tunelech vyplývá, že rychlost uvolňování tepla je hlavním parametrem pro popis vývoje a následků požáru. HRR je ovlivněna mnoha faktory, jako je zdroj hoření a typ vozidla, geometrie a velikost vozidla, tepelná zpětná vazba konstrukcí tunelu, materiál a geometrie tunelu a podmínky ventilace.

Stanovení HRR během požárních experimentů lze provést různými měřicími metodami, jejichž přesnost je silně ovlivněna způsobem měření a počtem a typem použitých sond. U požárních experimentů ve velkém měřítku je chyba měření v rozmezí 15–25 %, zatímco v požárních laboratořích je to typicky 7–11 %.

Teplota plynů je zásadní pro určení vystavení osob i konstrukcí tepelným tokem, odhadu doby detekce požáru a stanovení možnosti šíření požáru (Ingason et al. 2015).

2.3. Požární bezpečnost v tunelech

Požární bezpečnost v tunelech zajišťují stavební konstrukce tunelu zohledňující teploty plynů a tepelné toky, dále ventilační systémy, evakuační systémy zohledňující požadavky na viditelnost v kouři, detekční a hasicí systémy (Ingason et al. 2015).

Samočinná stabilní hasicí zařízení (SSHZ) se v budovách a skladech používají již více než století. Sprinklery byly poprvé použity v tunelech v Japonsku v roce 1963. V minulosti bylo provedeno mnoho experimentů SSHZ v tunelech ve skutečném nebo velkém měřítku (např. tunel Futatsugoya v roce 1969) a několik experimentů i v malém měřítku (např. Ingason 2008, Ingason et al. 2013) (Ingason et al. 2015).

2.4. Experimenty požárů v tunelech

Provádění experimentů ve velkém měřítku je všeobecně drahé, časově náročné a logisticky obtížné na uskutečnění. Přesto jsou experimenty ve velkém měřítku nutné k zajištění přijatelné míry validace při reálném měřítku. Údaje získané z rozsáhlých požárních experimentů slouží jako základ pro dnešní technické normy a směrnice pro navrhování tunelů (NFPA 2014, Piarc 1999, Ingason et al. 2015).

2.5. Matematické modelování požárů v tunelech

Matematické modelování požáru lze všeobecně rozdělit na zjednodušené a zpřesněné modely požáru. Mezi zjednodušené modely požáru, na kterých je v požárně inženýrské praxi obvykle založeno posuzování požární odolnosti prvků, patří zejména nominální a parametrické teplotní křivky. Tyto zjednodušené modely jsou však velmi konzervativní. Mezi zpřesněné (zdokonalené) modely, které lze využít při modelování požáru v tunelech, se řadí především modely dynamického proudění kapalin a plynů, tzv. CFD modely (Computational Fluid Dynamics) a zónové modely (ČSN EN 1991-1-2).

Modelování dynamiky tekutin (CFD) za posledních několik desetiletí rychle pokročilo spolu s výrazně zvýšenou kapacitou počítačů. CFD modelování bylo doposud široce používáno při navrhování požární bezpečnosti staveb založené na požárně inženýrském přístupu. Přesnost CFD modelování je vysoce závislá na přesnosti vstupních hodnot (Ingason et al. 2015).

Zónové modely požáru představují idealizovaný průběh požáru v uzavřeném prostoru a jejich princip spočívá v rozdělení výpočetního prostoru do jedné nebo dvou homogenních zón (vrstev) se stejným směrnou hustotou, teplotou a koncentrací plynů (Ingason et al. 2015, Klote 1993, Kučera a kol. 2010, Karlsson et al. 2000).

Hlavními výhodami zónových modelů jsou jednoduchost jejich algoritmů (ve srovnání s CFD modely) a rychlost výpočtu. Přestože zónové modely všeobecně nejsou vhodné pro modelování prostorů s jedním převládajícím rozměrem (např. šachty, tunely, chodby) (Ingason et al. 2015, Klote 1993, Kučera a kol. 2010, Karlsson et al. 2000), dodnes bylo vyvinuto a validováno několik programů využívajících zónový model požáru, které jsou schopny řešit simulace těchto liniových prostorů. Některé ze známých zónových modelů jsou programy

CFAST (Peacock et al. 2019) a B-RISK (Wade et al. 2016). Při správném použití je lze využít ke studiu požárního prostředí uvnitř tunelu (Chow 1996).

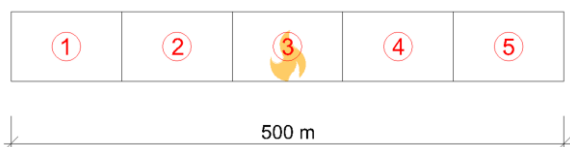
3. ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLAD

Přestože modelování tunelu (jakožto liniové stavby) není pro zónové modely požáru typické, cílem bylo zjistit možnosti těch zónových programů, které umožňují modelování tohoto druhu staveb, vytvořit v těchto programech stejný model a porovnat jejich výstupy. Řešeným prostorem je silniční železobetonový tunel délky 500 m s idealizovaným obdélníkovým průřezem šířky 10 m a světlé výšky 5 m. Tunel je větrán pouze přirozeně bez mechanické ventilace.

3.1. Modelování požáru

V řešeném tunelu je uvažován požár těžkého nákladního vozidla s nákladem dřeva o rozměrech 2,5 x 15 m a výšce 3,4 m. Požární scénář je modelován na základě křivky HRR převzaté z již existujícího experimentu (Ingason et al. 2005). Křivka HRR sloužila jako hlavní vstupní údaj pro zvolené zónové programy.

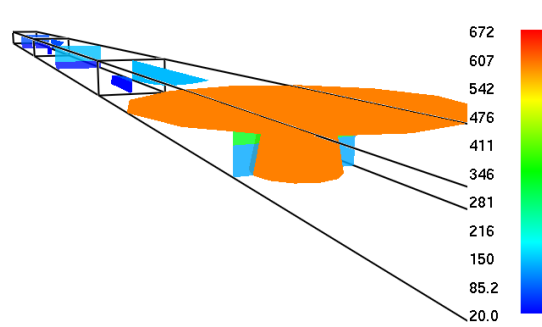
Požár byl modelován ve zvolených volně dostupných zónových programech umožňujících modelování liniových staveb, tj. v programu CFAST (Peacock et al. 2019) a B-RISK (Wade et al. 2016). Limit délky modelovaného prostoru není v programech explicitně specifikován. Přesto tyto programy doporučují lineární prostor segmentovat za účelem získání přesnějších výsledků. Řešený tunel byl proto segmentován, a to na pět stejných částí délky 100 m, které jsou propojeny pomyslným otevřeným otvorem o velikosti průřezu tunelu (Obr. 2).



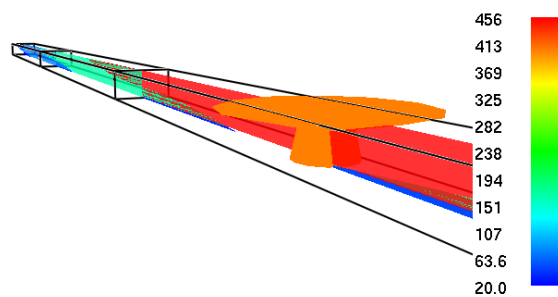
Obr. 2: Segmentace tunelu

V obou programech byly definovány rozměry jednotlivých segmentů tunelu a jejich otvory, materiály konstrukcí a jejich charakteristiky. Zdroj požáru byl umístěn uprostřed celého tunelu. Bylo uvažováno s hořením materiálu na bázi dřeva s chemickým vzorcem $C_6H_{10}O_5$ a spalným teplem 18,1 MJ/kg. Model vrstvy plynů při požáru byl uvažován dle McCaffreyho (Karlsson et al. 2000). Vliv proudění byl zanedbán. V programu CFAST byl navíc pod stropní konstrukci do osy zdroje požáru umístěn termočlánek (Target), program B-RISK tuto možnost nenabízí. Základní křivka HRR sloužící jako vstup do jednotlivých programů je značena „HRR input“ (Obr. 5).

Oba programy navíc umožňují vizualizaci požáru pomocí implementovaného programu Smokeview (Forney 2013), která je zde uvedena pro čas, v němž je v daném programu dosaženo maximálních teplot (Obr. 3-4).



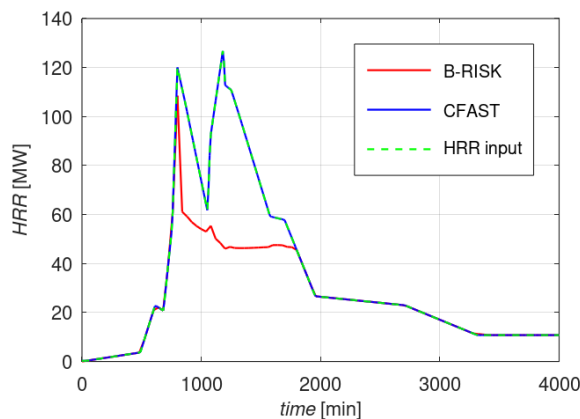
Obr. 3: Vizualizace požáru: CFAST (v čase 1194 minut)



Obr. 4: Vizualizace požáru: B-RISK (v čase 800 min)

3.2. Výstupní grafy

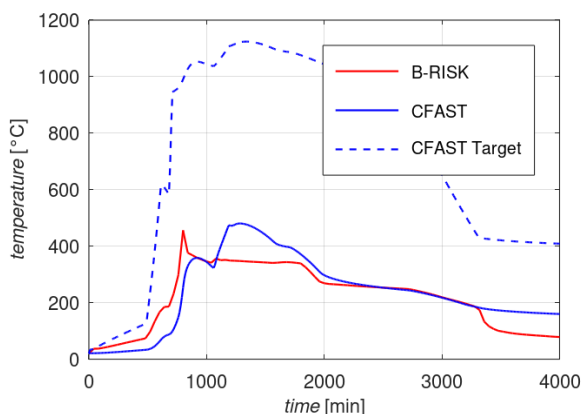
Výstupy z obou programů byly následně převedeny do tabulového procesoru. Níže jsou vyobrazeny výsledné grafy rychlosti uvolňování tepla (Obr. 5) a teploty plynů horní kouřové vrstvy (Obr. 6). Uvedené grafy znázorňují průběh požáru v prostředním segmentu tunelu, v němž je umístěn zdroj hoření.



Obr. 5: Rychlost uvolňování tepla uprostřed délky tunelu

Výstupní křivka HRR z programu CFAST má shodný průběh jako vstupní křivka HRR, oproti tomu u výstupní křivky z programu B-RISK je patrný výrazný pokles po fázi prvotního prostorového vzplanutí (Obr. 5).

Možným důvodem shody průběhu křivky HRR u programu CFAST se vstupní křivkou HRR je případ, že CFAST uvažoval se shořením veškerého paliva a tehdy dosahuje křivka HRR svých předepsaných maximálních hodnot dle ČSN EN 1991-1-2 (Peacock et al. 2019).



Obr. 6: Teplota horní kouřové vrstvy uprostřed délky tunelu

U křivek teplot horní kouřové vrstvy je zřejmý zajímavý fenomén v případě výstupů z programu CFAST (Obr. 6). Průběhy teplot horní kouřové vrstvy se u obou programů příliš neliší, avšak při umístění termočlánku (Target) pod stropní konstrukci do osy zdroje požáru v programu CFAST je viditelný mnohonásobně vyšší průběh teplot okolních plynů.

Při modelování prostoru jako chodba nebo tunel v programu CFAST jsou podmínky uvnitř prostoru počítány běžným dvouzónovým modelem a teploty proudu horkých plynů pod stropem jsou vypočítány pomocí upravených empirických korelací specifických pro chodby a tunely. Tento způsob výpočtu ovlivňuje detektory, sprinklery a termočlánky (target) v blízkosti stropu a má za následek vyšší výsledné teploty plynů u stropu (Peacock et al. 2019).

3.3. Zhodnocení

Zónové programy CFAST a B-RISK umožňují modelování požáru v tunelech, jejich výsledky se však poměrně liší. Oba programy nevyžadují zcela stejné množství a formu vstupních údajů, mají odlišnou citlivost některých parametrů paliva na výpočet a využívají zřejmě odlišné korelace zejména při výpočtu teplot proudu horkých plynů pod stropem. Přestože jednoduchost a rychlost výpočtu je oproti CFD modelům velkou výhodou zónových modelů, je zřejmě nutné dbát obezřetnosti při interpretování jejich výstupů v tomto kontextu (Peacock et al. 2019, Wade et al. 2016).

Další výzkum by bylo vhodné zaměřit na rozdíly a korelace v matematickém základu jednotlivých programů při modelování tunelů a zejména provést porovnání s CFD modely (viz např. Tavelli et al. 2014).

4. ZÁVĚR

Tento článek byl zaměřen na využití zónových modelů požáru při modelování požárů v tunelech. Stručně popsány byly vybrané charakteristiky požárů v tunelech, jako je vliv ventilace, parametry průběhu požáru, prvky požární bezpečnosti v tunelech, požární experimenty a možnosti matematického modelování požáru v tunelech. Byl uvažován železobetonový silniční tunel, který byl modelován ve vybraných zónových progra-

mech, tj. CFAST a B-RISK. Byl zvolen požární scénář s hořícím nákladního vozidla (HGV) s nákladem dřeva. Výstupy z obou programů byly porovnány a zhodnoceny.

Z dosavadních výsledků uvedených v tomto článku je patrné, že se výstupy mohou lišit v závislosti na použitém programu. Nároky jednotlivých programů na množství a formu vstupních informací, stejně jako některé korelace specifické při výpočtu podmínek v tunelech, jsou odlišné. Při modelování prostorů netypických pro zónové modely je vhodné dbát obezřetnosti při interpretování výstupů z těchto programů a znát korelace algoritmů, z jimiž daný zónový program pro tento druh prostoru uvažuje.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci finanční podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS22/033/OHK1/1T/11.

Reference

- Jacobs, Jean-Pierre. *Comprehensive fire protection and safety with concrete*. B.m.: British Cement Association, British Ready-mixed Concrete Association, 2007.
- Karlsson, Björn a James G. Quintiere. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- Beard, Alan a Richard Carvel, ed. *The handbook of tunnel fire safety*. 2nd ed. London: ICE, 2012. ISBN 978-0-7277-4153-0.
- Ingason, Haukur, Ying Zhen Li a Anders Lönnemark. *Tunnel Fire Dynamics* [online]. New York, NY: Springer New York, 2015 [vid. 2022-03-14]. ISBN 978-1-4939-2198-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2199-7
- Beard, A. a R. Carvel. *The Handbook of Tunnel Fire Safety*. Th. B.m.: Telford Publishing, 2005.
- Ingason, Haukur. Model scale tunnel tests with water spray. *Fire Safety Journal*. 2008, **43**(7), 512–528.
- LI, Ying Zhen a Haukur Ingason. Model scale tunnel fire tests with automatic sprinkler. *Fire Safety Journal*. 2013, **61**, 298–313.
- Association, National Fire Protection. *Standard for road, tunnels, bridges, and other limited access highways (NFPA 502)*. B.m.: Quincy: National Fire Protection Association, 2014.
- Piarc, Fire. *Smoke Control in Road Tunnels*. PIARC Technical Committee C5 Road Tunnel. 1999.
- Klote, J. a G. Forney. *Zone Fire Modelling With Natural Building Flows and a Zero Order Shaft Model*. USA, Gaithersburg: NISTIR, 1993.
- Kučera, Petr a Zdeňka Pezdová. *Základy matematického modelování požáru*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
- Peacock, R. D., P. A. Reneke a G. P. Forney. *CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide*. 2019.
- Wade, Colleen, Greg Baker, Kevin Frank, Roger Harrison a Michael Spearpoint. *B-RISK 2016 user guide and technical manual*. 2016, 144.
- Forney, Glenn P. *Smokeview (Version 6) A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume II: Technical Reference Guide* [online]. NIST SP 1017-

2. 2013 [vid. 2020-12-20]. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.SP.1017-2

- Chow, W.K. Simulation of tunnel fires using a zone model. *Tunnelling and Underground Space Technology* [online]. 1996, **11**(2), 221–236. ISSN 08867798. Dostupné z: doi:10.1016/0886-7798(96)00012-0
- Ingason, Haukur a Anders Lönnermark. Heat release rates from heavy goods vehicle trailers in tunnels. *Fire Safety Journal*. 2005, **40**, 22.
- Svobodová, N., Benýšek, M. a Štefan, R. *Analysis of zone fire models and their application in structural fire design*. In: 27th Concrete Days. Curich: Trans Tech Publications, 2021. Solid State Phenomena. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1668-9, after review.
- Tavelli, Silvia, Renato Rota a Marco Derudi. A critical comparison between CFD and zone models for the consequence analysis of fires in congested environments. In: *6th International Conference on Safety and Environment in Process and Power Industry (CISAP6 2014)*. B.m.: ITA, 2014, s. 247–252. ISBN 88-95608-27-5.