

ANALÝZA VLIVU NUCENÉHO VĚTRÁNÍ NA PRŮBĚH POŽÁRU V SILNIČNÍM TUNELU S VYUŽITÍM ZÓNOVÝCH MODELŮ POŽÁRU

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 analýzou vlivu nuceného větrání na průběh požáru v silničním železobetonovém tunelu s využitím zónových modelů požáru. Je zde stručně popsán dosavadní stav poznání v oblasti druhů větrání v tunelech. Požár je simulován pomocí zónového modelu CFAST. Je uvažován požární scénář pro případ hoření těžkého nákladního vozidla (TNV) s nákladem dřeva umístěného uprostřed tunelu. Požární scénář je modelován na základě křivky rychlosti uvolňování tepla převzaté z existujícího experimentu. V programu CFAST je uvažováno s prostorovou segmentací modelovaného tunelu s ohledem na limity zónových modelů požáru. Je uvažována varianta bez mechanické ventilace a následně několik variant s mechanickou ventilací pomocí proudových ventilátorů. Následně je provedeno porovnání výsledných grafů, a to především grafu rychlosti uvolňování tepla, průběhu teplot plynů v kouřové vrstvě a výšky kouřové vrstvy nad podlahou. Zónový model CFAST je nakonec zhodnocen z hlediska relevantnosti výstupů vzhledem k modelovanému prostoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tunel • Požár • Zónový model požáru • Ventilace

ABSTRACT

This article deals with the analysis of the forced ventilation effect on the fire evolution in a reinforced concrete road tunnel using a fire zone model. The current state of knowledge in the field of different tunnel ventilation types is briefly described here. The fire is simulated using the CFAST zone model. A fire scenario is considered for the case of a heavy goods vehicle (HGV) burning with a load of wood located in the middle of the tunnel. The fire scenario is modelled based on the heat release rate curve taken from an existing experiment. In the CFAST program, a spatial segmentation of the modelled tunnel is considered concerning the limits of fire zone models. A variant without mechanical ventilation is considered, followed by several variants with mechanical ventilation using jet fans. Subsequently, the resulting graphs are compared, namely the heat release rate graph, the smoke layer temperature graph, the smoke layer height graph and the optical density graph.

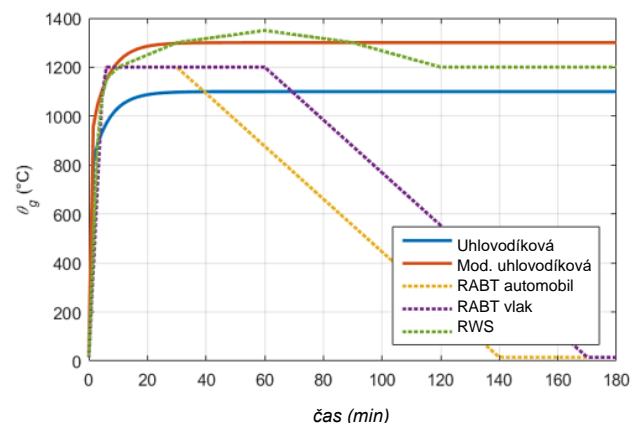
The CFAST zone model is finally evaluated in terms of the relevance of the outputs to the modelled area.

KEYWORDS

Tunnel • Fire • Zone Fire Model • Ventilation

1. ÚVOD

Požární bezpečnosti tunelů je třeba věnovat dostatečnou pozornost, neboť jsou kritickou součástí naší dopravní infrastruktury. Přestože četnost požárů v tunelech je statisticky menší než v uzavřených budovách, jejich následky mohou mít fatální dopady. Při požárech v tunelech totiž může být dosahováno extrémních teplot mnohem rychleji než v běžném uzavřeném prostoru uvnitř budovy, což také reflektují nominální teplotní křivky určené pro tunely (Obr. 1), které jsou oproti nominálním křivkám pro běžné uzavřené prostory výrazně přísnější. Velké riziko v tunelech může také představovat velmi rychlé zakouření prostoru vzhledem k jeho uzavřenosti. V silničních tunelech je pravděpodobnost propuknutí požáru největší (Ingason *et al.* 2015).



Obr. 1: Nominální teplotní křivky určené pro tunely dle Eurokódu a pomocí výpočetního programu FMC (Benýšek, Štefan 2015)

Z hlediska matematického modelování požáru patří mezi nejprostší modely požáru nominální teplotní křivky (např. normová teplotní křivka ISO 834). Na těchto křivkách je

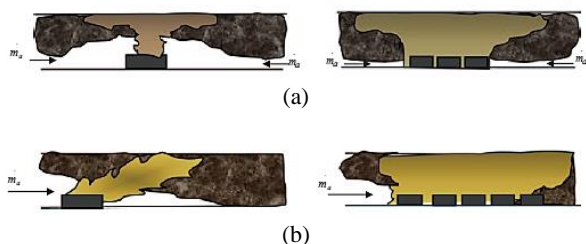
* Školitel: Ing. Josef Novák, Ph.D., školitel specialista: Ing. Martin Benýšek, Ph.D.

obvykle založeno posuzování požární odolnosti konstrukcí v požárně inženýrské praxi (ČSN EN 1991-1-2, viz také Benýšek 2021). Zjednodušené modely požáru však mohou být velmi konzervativní. Další matematické modely požáru zahrnují přirozené modely požáru, které se dělí na zjednodušené modely požáru (např. parametrické teplotní křivky) a zpřesněné (pokročilé) modely požáru, mezi něž se řadí především modely dynamického proudění kapalin a plynů, tzv. CFD modely (Computational Fluid Dynamics) a zónové modely požáru (ČSN EN 1991-1-2, viz také Svobodová a kol. 2021). CFD modely jsou široce využívány v praxi založené na požárně inženýrském přístupu a dodnes existuje mnoho odborných článků o jejich využití při modelování požáru v tunelech (Ingason et al. 2015, Kučera a kol. 2010).

Oproti tomu zónové modely představují nekonvenční volbu, co se týče modelování požáru v tunelech, protože všeobecně nejsou určeny pro simulace úseků s jedním převládajícím rozměrem (Ingason et al. 2015, Klote 1993, Kučera a kol. 2010, Karlsson et al. 2000). Do dnešního dne však bylo vyvinuto několik zónových modelů, které byly validovány i pro liniové stavby (tj. chodby, šachty a tunely, např. zónový model CFAST (Peacock et al. 2019). Je to právě jednoduchost jejich algoritmů a rychlost výpočtu (ve srovnání s CFD modely), díky čemuž mohou zónové modely při správném použití představovat velký potenciál při modelování požárů v tunelech (Ingason et al. 2015, Kučera a kol. 2010, Karlsson et al. 2000).

2. VĚTRÁNÍ V TUNELECH

Z hlediska požární bezpečnosti tunelů má větrání kritický vliv na rozvoj požáru a proces hoření. Všeobecně jsou požáry v tunelech řízeny palivem, neboť přístup vzduchu obvykle nebývá omezen (Obr. 2). V dnešní době jsou tunely obvykle vybaveny nuceným větráním (Ingason et al. 2015).



Obr. 2: 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)

2.1. Třídění tunelů

Z hlediska požadavků na bezpečnost/požární větrání se rozlišují tři hlavní kategorie tunelů. Do kategorie T1 se řadí tunely s jednosměrným provozem a malou pravděpodobností kongesce (tzn. běžně dálniční tunely). Kategorii T2 jsou tunely s jednosměrným provozem a velkou pravděpodobností kongesce (tzn. běžně dvoutroubové městské tunely). Do kategorie T3 patří tunely s obousměrným provozem (Metodický pokyn 2013).

V tunelech délky nad 1000 m a zároveň s provozem nad 2000 vozidel v jízdním pruhu za den se vždy požaduje

instalovat mechanické větrací zařízení (Nařízení vlády č. 264/2009 Sb.).

2.2. Druhy nuceného větrání v tunelech

Hlavním cílem požárního větrání v tunelech je udržování bezdýmových zón v dopravním prostoru a zabránění šíření dýmu do únikových a přístupových cest.

Jsou definovány tyto druhy požárního větrání:

- přirozené (podélné) větrání (tzn. bez mechanického větrání, nebo s vypnutým větracím zařízením při požáru),
- podélné větrání s pevným nastavením rychlosti proudění vzduchu,
- podélné větrání s regulací proudění vzduchu na definovanou hodnotu,
- příčné odsávání kouře (podélná rychlost vzduchu se reguluje na symetrické proudění k místu odsávání (Metodický pokyn 2013).

Systémy větrání tunelů jsou znázorněny na (Obr. 3-7).



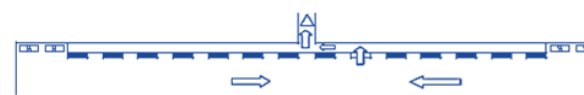
Obr. 3: Druh požárního větrání: průběžné podélné větrání (Metodický pokyn 2013)



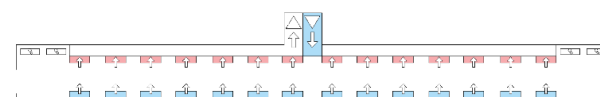
Obr. 4: Druh požárního větrání: podélné větrání s výměnou vzduchu (bodové odsávání a následně vhnání vzduchu skrz injektor) (Metodický pokyn 2013)



Obr. 5: Druh požárního větrání: koncentrované příčné odsávání v pevně daném místě rozdělující tunel na dva úseky s podélným větráním (Metodický pokyn 2013)



Obr. 6: Druh požárního větrání: nastavitelné příčné odsávání (Metodický pokyn 2013)



Obr. 7: Druh požárního větrání: příčné větrání (rozložený lineární přívod čerstvého vzduchu přes pevné otvory a lineární odsávání přes částečně otevřené klapky, se vzduchotechnickými kanály) (Metodický pokyn 2013)

Vhodné použití druhu požárního větrání pro jednotlivé kategorie tunelů je znázorněno v tabulce níže (Tab. 1).

Tab. 1: Zásady použití požárního větrání v tunelech (Metodický pokyn 2013).

Kategorie	Vhodný systém větrání	Koncept požárního větrání
T1 – dálniční tunely	Průběžné podélné větrání	Podélné větrání s pevným nastavením Podélné větrání s regulací Proudění/nízké požadavky na regulaci
T2 – dvoutroubové městské tunely	Průběžné podélné větrání (Nastavitelné příčné odsávání)	Podélné větrání s regulací proudění na definovanou hodnotu/vysoké požadavky na regulaci Příčné odsávání kouře
T3 – tunely s obousměrným provozem	Průběžné podélné větrání Nastavitelné příčné odsávání Příčné větrání	Podélné větrání s regulací proudění na definovanou hodnotu/vysoké požadavky na regulaci Příčné odsávání kouře

Pro požární větrání je nejdůležitější stav podélného proudění v tunelu. Podélné proudění vzduchu ovlivňují především následující parametry:

- geometrické parametry tunelu,
- provoz dopravy,
- provoz větracího zařízení (popř. dalších požárně bezpečnostních zařízení),
- vztaková síla v důsledku teplotních rozdílů uvnitř a vně tunelu a vztaková síla uvolněného tepla při požáru,
- barometrické tlakové rozdíly,
- vnější vítr a setrvačnost vzduchu (Metodický pokyn 2013).

U podélného větrání v tunelech je pro kontrolu nad kouřem nejdůležitější jednak kritická rychlost proudění vzduchu a dále délka zpětné vrstvy kouře, tzv. „back-layering“. Jev „back-layering“ je obzvláště nebezpečný, protože může způsobit nahromadění toxických zplodin hoření (kouř se může šířit proti stojícím vozidlům) a snížit viditelnost natolik, že je znemožněna bezpečná evakuace osob z tunelu. Pro bezpečnou evakuaci osob se uvažuje výška kouřové vrstvy nad podlahou alespoň 2,5 m, nebo alespoň polovina výšky tunelu (Ingason et al. 2015).

Při podélném požárním větrání zejména u tunelů kategorie T1 a T2 nesmí být překročena mezní rychlost proudění vzduchu 10 m/s (Metodický pokyn 2013).

3. METODY

K analýze vlivu větrání na průběh požáru v tunelu byl využit zónový model požáru. Zónové modely požáru představují idealizovaný průběh požáru v uzavřeném prostoru. Jejich princip spočívá v rozdělení výpočetního prostoru do jedné nebo dvou homogenních zón (vrstev) se stejnou hustotou, teplotou a koncentrací plynů (Ingason et al. 2015, Klote 1993, Kučera a kol. 2010, Karlsson et al. 2000).

Z principu není použití zónových modelů požáru pro liniové stavby (tunely, chodby, šachty) nikterak typické. Přesto řešený zónový model CFAST (Peacock et al. 2019) umožňuje modelování těchto druhů staveb (viz např. Chow 1996, Floyd 2002, Tavelli 2014). Cílem bylo provést analýzu vlivu mechanického větrání na průběh požáru v tunelu a zároveň ověřit

možnosti zónového modelu požáru CFAST z hlediska mechanické ventilace v tunelu.

Řešeným prostorem je silniční železobetonový tunel délky 500 m s idealizovaným obdélníkovým průřezem šířky 10 m a světlé výšky 5 m.

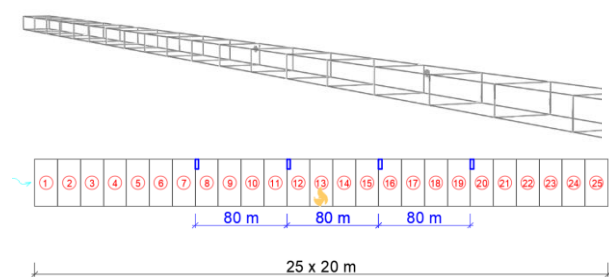
Pro řešený model byl uvažován požární scénář hoření těžkého nákladního vozidla (TNV). Dle statistik skutečných požárů v silničních tunelech jsou to právě požáry těžkých nákladních vozidel, které dominují svými následky z hlediska poškození konstrukce tunelu i počtu úmrtí (Ingason et al. 2015).

3.1. Modelování požáru

V řešeném silničním tunelu byl uvažován požár těžkého nákladního vozidla s nákladem dřeva o rozměrech 2,5 x 15,0 m a výšce 3,4 m. Požární scénář byl modelován na základě křivky rychlosti uvolňování tepla (HRR) převzaté z již existujícího experimentu (Ingason et al. 2005). Křivka HRR sloužila jako hlavní vstupní údaj pro zónový model.

Pro simulaci požáru byl použit zónový model CFAST (Peacock et al. 2019). S ohledem na limity zónových modelů je doporučeno řešený prostor segmentovat (Peacock et al. 2019).

Řešený tunel byl rozdělen na 25 stejných segmentů délky 20 m (tzn. v poměru délky a šířky jednoho segmentu 2:1, resp. 20 x 10 m) dle doporučení z již existujících článků (Bamonte et al. 2011, Svobodová a kol. 2022). Jednotlivé segmenty jsou spolu propojeny virtuálními otvory o velikosti průřezu tunelu (Obr. 8).



Obr. 8: Schéma tunelu

V programu byly definovány potřebné rozměry a otvory, materiály konstrukcí a jejich charakteristiky. Zdroj požáru byl umístěn uprostřed tunelu. Bylo uvažováno s hořením materiálu na bázi dřeva s chemickým vzorcem $C_6H_{10}O_5$ a spalným teplem 18,1 MJ/kg. Dále byl pod stropní konstrukci do osy zdroje požáru umístěn termočlánek (značeno „Target“). Základní křivka HRR sloužící jako vstup do jednotlivých programů je značena „HRR vstup“ (Obr. 9).

Je uvažována varianta bez mechanické ventilace a následně 9 variant s mechanickou ventilací pomocí proudových ventilátorů definovaných objemovým průtokem vzduchu (10-90 m³/s). Ventilátory mají vždy průměr 0,5 m a jsou od sebe vzdáleny 80 m (s ohledem na Metodický pokyn 2013), přičemž zdroj požáru je umístěn uprostřed tunelu mezi ventilátory.

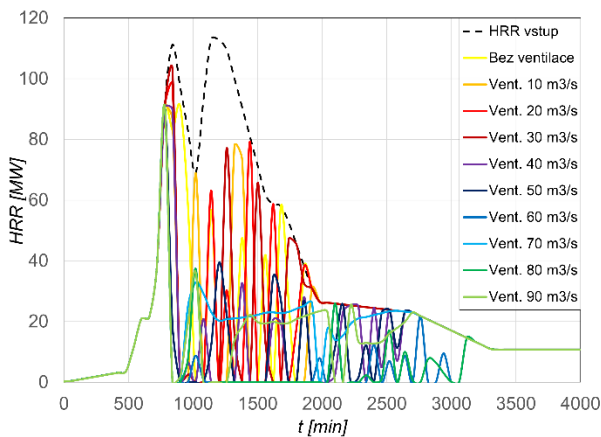
3.2. Výstupy

Výstupy ze zónového modelu CFAST byly následně převedeny do tabulkového procesoru. Níže jsou vyobrazeny výsledné grafy, a to rychlost uvolňování tepla (Obr. 9), teploty plynů horní a spodní kouřové vrstvy (Obr. 10-11). Uvedené grafy znázorňují průběh požáru v prostředním segmentu tunelu, v němž je umístěn zdroj hoření. Dále je doplněn graf znázorňující výšku kouřové vrstvy nad podlahou v celém tunelu v časech 5, 15 a 30 minut (Obr. 13-15).

Pro variantu modelu s nejvyšším objemovým průtokem proudových ventilátorů (tj. 90 m³/s) byla dle Bernoulliho rovnice (např. *Uruba 2009*) určena rychlost proudění vzduchu v tunelu na hodnotu přibližně 7,2 m/s (na základě celkového objemového průtoku vzduchu ventilátorů a průřezové plochy tunelu).

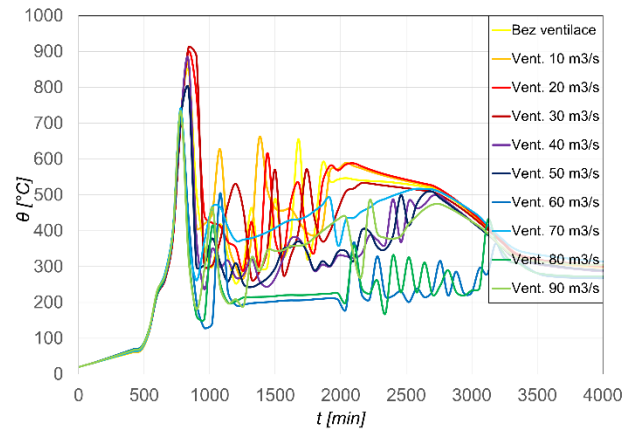
V případě grafu HRR (Obr. 9) není na první pohled zřejmý jasný trend ve výsledných průbězích těchto křivek. V počáteční fázi prostorového vzplanutí (cca do 780 s) je průběh vždy obdobný. V případě varianty s ventilátory o objemovém průtoku 10-30 m³/s je navíc vlivem přísunu kyslíku maximální hodnota uvolněného tepla vyšší než v případě varianty bez mechanické ventilace.

Po fázi prvotního prostorového vzplanutí dochází u všech variant k výraznému kolísání hodnot, což je ovlivněno také velkou délkou modelovaného prostoru (např. oproti požáru v uzavřeném prostoru uvnitř budovy). Zároveň v této fázi s přibývajícím objemovým průtokem ventilátoru jsou výsledné hodnoty grafu HRR menší. Nutno však podotknout, že se jedná o obzvláště velký požár s přibližně pětinasobným maximálním uvolněným teplem než např. u automobilu (*Ingason et al. 2005*).

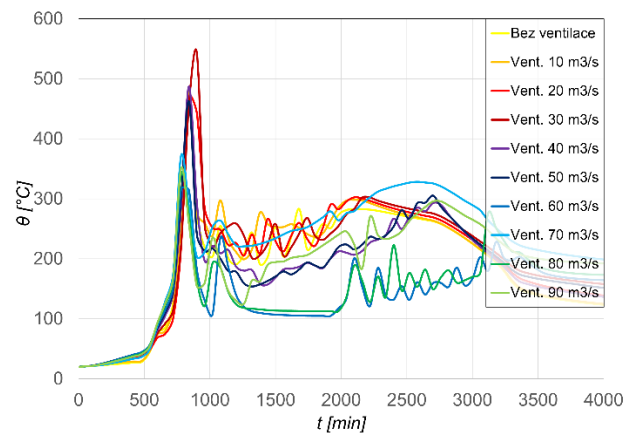


Obr. 9: Rychlost uvolňování tepla (HRR, uprostřed tunelu)

Obdobně jako u grafu HRR, není ani v případě horní a spodní teploty kouřové vrstvy (Obr. 10-11) zřejmý zásadní vliv mechanické ventilace na průběh teplot. Rozdíl v maximálních teplotách u jednotlivých variant je přibližně 200 °C.

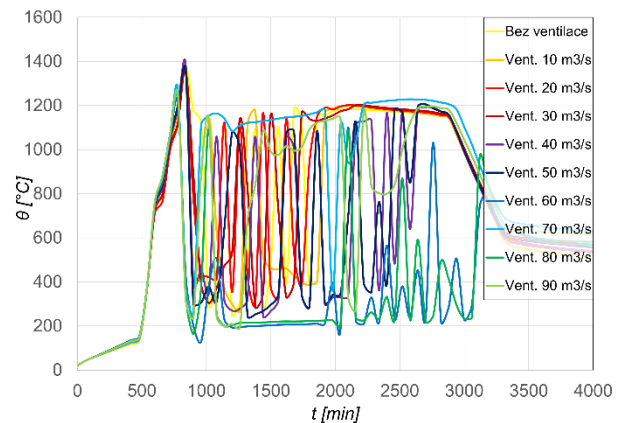


Obr. 10: Teploty horní kouřové vrstvy (uprostřed tunelu)



Obr. 11: Teploty spodní kouřové vrstvy (uprostřed tunelu)

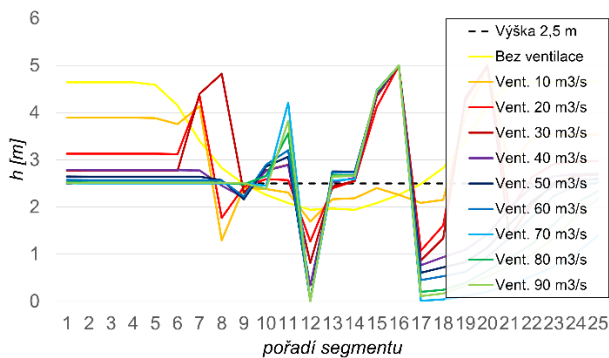
V případě grafu teplot proudů horkých plynů okolo termočláčku umístěného pod stropem (Obr. 12) jsou očekávaně podstatně vyšší teploty než u horní kouřové vrstvy (Obr. 10), a to až o 500 °C. Postup výpočtu těchto průběhů teplot v programu CFAST se totiž liší. Podmínky uvnitř prostoru jsou počítány běžným dvouzónovým modelem. Oproti tomu teploty proudů horkých plynů pod stropem jsou počítány pomocí upravených empirických korelací specifických pro tunely (popř. chodby), což ovlivňuje právě termočláčky (popř. detektory a sprinklery) a má za následek vyšší výsledné teploty plynů u stropu (*Peacock et al. 2019*).



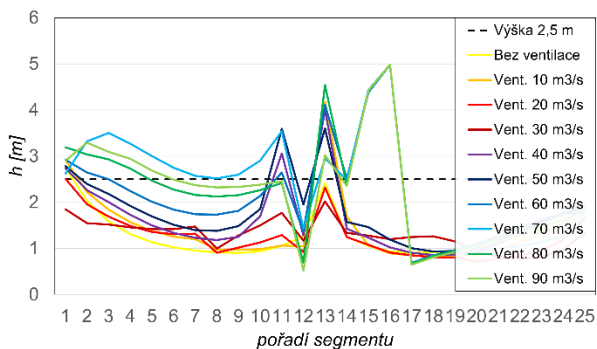
Obr. 12: Teploty plynů pod stropem okolo termočláčku (uprostřed tunelu, v ose požáru)

Nakonec jsou zde vyobrazeny průběhy výšky kouřové vrstvy nad podlahou v jednotlivých segmentech celé délky tunelu v časech 5, 15 a 30 minut (Obr. 13-15).

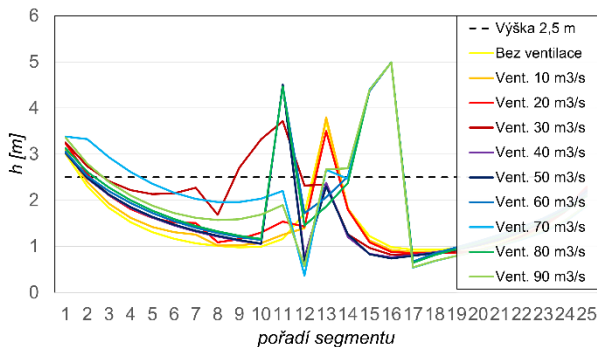
Lze vidět, že při modelování požáru pomocí programu CFAST různá mechanická ventilace vliv má, ale především okolo prostředního segmentu tunelu se zdrojem požáru a v částech za těmito segmenty spíše dochází k výraznému zhoršení podmínek uvnitř tunelu. S přibývajícím hodnotou objemového průtoku ventilátorů dochází k poklesu kouřové vrstvy až k úrovni podlahy, a to zejména v části tunelu před a za segmentem se zdrojem požáru. Není tak zajištěna bezpečná výška kouřové vrstvy nad podlahou pro evakuaci osob, tj. výška alespoň 2,5 m nad podlahou.



Obr. 13: Výška kouřové vrstvy nad podlahou v jednotlivých segmentech, podélný řez tunelem v čase 5 minut

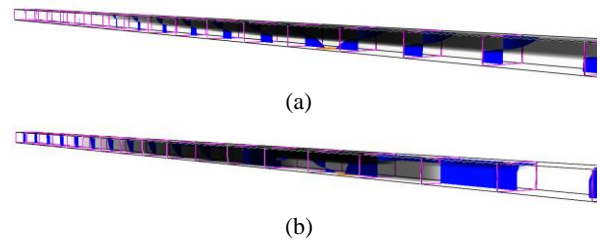


Obr. 14: Výška kouřové vrstvy nad podlahou v jednotlivých segmentech, podélný řez tunelem v čase 15 minut



Obr. 15: Výška kouřové vrstvy nad podlahou v jednotlivých segmentech, podélný řez tunelem v čase 30 minut

Zónový model CFAST navíc umožňuje vizualizaci požáru a vývoje kouře pomocí implementovaného programu Smokeview (Forney 2013) (Obr. 16).



Obr. 16: Vizualizace kouře v čase 5 minut: (a) varianta bez mechanické ventilace; (b) varianta s proudovými ventilátory o průtoku vzduchu $90 \text{ m}^3/\text{s}$

4. ZHODNOCENÍ

Zónový model CFAST umožňuje modelování požáru v tunelech, jak již bylo v minulosti demonstrováno na několika odborných člancích (např. Chow 1996, Bamonte et al. 2011, Johansson 2022). Přesto správné aplikování některých parametrů při požáru v tunelu, jako je např. zde řešený vliv mechanické ventilace, je stále velmi nejasný.

Z uvedených výsledků se oproti očekávání zdá, že mechanická ventilace v programu CFAST nemá přílišný vliv na průběh požáru v modelovaném tunelu. Pro ověření míry vlivu ventilace byla proto navíc ještě provedena série zkušebních simulací.

Při sérii simulací s poloviční délkou tunelu a variantami bez mechanické ventilace i s ní bylo zjištěno, že teploty v horní kouřové vrstvě i teploty proudu horkých plynů okolo termočlánku pod stropem vychází vyšší až o $400 \text{ }^\circ\text{C}$ než při simulacích se skutečnou délkou tunelu (500 m). Zároveň v těchto případech je průběh výstupní křivky HRR shodný se zadanou vstupní křivkou.

Dále bylo zpozorováno, že při simulacích tunelu skutečné délky se s přibývajícím hodnotou objemového průtoku ventilátorů (nad hodnotu $90 \text{ m}^3/\text{s}$) průběhy uvedených grafů příliš nemění. Dále bylo zjištěno, že přibývajícím průřezová plocha ventilátoru nemá zcela zásadní vliv na průběhy uvedených grafů.

Počet ventilátorů také ovlivňuje průběh simulace, a to ani ne z hlediska výsledků, ale především z hlediska výpočetní doby simulace, která pro více než dva ventilátory (umístěné v segmentech před a za požárem) s objemovým průtokem jednoho ventilátoru nad $40 \text{ m}^3/\text{s}$ může být velmi omezující (namísto 30-90 minut může doba narůst až na několik dní).

V modelu CFAST nelze definovat podmínky větrání pouhým zadáním rychlosti proudění vzduchu (v m/s) jako je tomu např. v CFD modelu FDS (McDermott 2008), což může být nevýhodou.

5. ZÁVĚR

Tento článek byl zaměřen na analýzu vlivu mechanické ventilace na průběh požáru v silničním železobetonovém tunelu s využitím zónového modelu CFAST. Stručně byl popsán dosavadní stav poznání v oblasti druhů větrání v tunelech. Jako

ilustrativní příklad byl simulován požár v železobetonovém silničním tunelu pomocí zónového modelu CFAST. Byl zvolen požární scénář s hořením těžkého nákladního vozidla (TNV) s nákladem dřeva umístěným uprostřed tunelu. Byla simulována varianta bez mechanické ventilace a následně několik variant s mechanickou ventilací pomocí proudových ventilátorů. Výstupy z programu CFAST byly následně zhodnoceny.

Z dosavadních výsledků uvedených v tomto příspěvku je patrné, že zónový model CFAST sice umožňuje modelování požáru v tunelu, ale vliv mechanické ventilace při simulaci řešeného tunelu není příliš jednoznačný. Jednoduchost a rychlost výpočtu zónových modelů v porovnání s CFD modely je velkou výhodou. Je však zřejmé, že modelování komplexních podmínek větrání v tunelech pomocí programu CFAST prozatím nelze považovat za spolehlivé a bezpodmínečně vyžaduje podrobnější zkoumání a především porovnání s CFD modely (viz např. *Tavelli 2014*). Simulace větrání pomocí CFD modelů je řešeno v řadě odborných článků (viz např. *Guo a Zhang 2014*, *Weisenpacher1 a spol. 2019*).

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci finanční podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS23/037/OHK1/1T/11 a SGS22/091/OHK1/2T/11.

Literatura

- INGASON, Haukur, Ying Zhen LI a Anders LÖNNERMARK. *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
- ČSN EN 1991-1-2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. 2013
- BENÝŠEK, Martin. Analysis of Fire Resistance of Concrete Structures Based on Different Fire Models [online]. 2021 [vid. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/98704>
- SVOBODOVÁ, N., M. BENÝŠEK a R. ŠTEFAN. Analysis of zone fire models and their application in structural fire design. In: *27th Concrete Days. Curich: Trans Tech Publications*. 2021.
- KUČERA, Petr a Zdeňka PEZDOVÁ. *Základy matematického modelování požáru*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
- KLOTE, J. a G. FORNEY. *Zone Fire Modelling With Natural Building Flows and a Zero Order Shaft Model*. USA, Gaithersburg: NISTIR, 1993.
- 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.
- 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.
- BENÝŠEK, Martin a Radek ŠTEFAN. *FMC - Fire Models Calculator [software online]*. Prague: CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Dep. of Concrete and Masonry Structures, 2015.
- MINISTERSTVO DOPRAVY a ODBOR POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ. *METODICKÝ POKYN. Větrání silničních tunelů - Volba systému, navrhování, provoz a zabezpečení jakosti větracích systémů silničních tunelů*. 8. duben 2013
- Nařízení vlády č. 264/2009 Sb., o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací delší než 500 metrů
- 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
- FLOYD, Jason E. *Comparison of CFAST and FDS for fire simulation with the HDR T51 and T52 tests* [online]. NIST IR 6866. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 2002 [vid. 2020-09-29]. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.IR.6866
- 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.
- SVOBODOVÁ, N., M. BENÝŠEK, R. ŠTEFAN a J. NOVÁK. Zone modelling of tunnel fires using different tunnel segmentation In: *Recenzovaný Sborník abstraktů XXXI. ročníku mezinárodní konference. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s., 2022. p. 106-108. ISBN 978-80-7385-256-6.*
- INGASON, Haukur a Anders LÖNNERMARK. Heat release rates from heavy goods vehicle trailers in tunnels. *Fire Safety Journal*. 2005, **40**, 22.
- URUBA, V. *Turbulence*. ČVUT v Praze: Fakulta strojní, 2009.
- 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
- BAMONTE, Patrick, Roberto FELICETTI, Pietro G. GAMBAROVA a Alireza NAFARIEH. On the Fire Scenario in Road Tunnels: A Comparison between Zone and Field Models. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2011, **82**, 764–769. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.82.764
- JOHANSSON, Nils. Evaluation of a multi-zone modelling concept for large volume buildings and tunnels. In: *PROCEEDINGS, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference (FEMTC) 2022* [online]. 2022. Dostupné z: https://files.thunderheadeng.com/femtc/2022_d2-14-johansson-paper.pdf
- MCDERMOTT, Randall, Kevin MCGRATTAN a Simo HOSTIKKA. Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide. *NIST Special Publication*. 2008, **1018**(5).
- WEISENPACHER, Peter, Jan GLASA a Lukas VALASEK. Stratification of fire smoke and testing aerosol in a road tunnel: computer simulation. *ITM Web of Conferences* [online]. 2019, **24**, 02004. Dostupné z: doi:10.1051/itmconf/20192402004
- GUO, Xiaoping a Qihui ZHANG. Analytical solution, experimental data and CFD simulation for longitudinal tunnel fire ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology* [online]. 2014, **42**, 307–313. ISSN 0886-7798. Dostupné z: doi:10.1016/j.tust.2014.03.011