

T A
Č R



Aplikace numerických modelů pro bezpečnou evakuaci vozidel při požárech v železničních tunelech

**Kolektiv autorů metodiky:**

Ing. Kamila Cábová, Ph.D., prof. Ing. František Wald, CSc., Ing. Martin Bernas

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D., Ing. Petra Okřinová, Ing. Jiří Apeltauer

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Recenzenti:

Ing. Roman Adamek

Výzkumný Ústav Železniční, a.s.

Ing. Martin Hromada, Ph.D.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky

Dokument vznikl v rámci projektu TE01020168 Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), podpořeného Technologickou agenturou ČR v rámci programu Centra kompetence.

© Praha, Brno 2017

Požadavky na železniční tunely z požárně bezpečnostního pohledu

V České republice se bezpečností v železničních tunelech zabývá norma ČSN 73 7508 z roku 2002 a nařízení Komise (EU) č. 1303/2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se „bezpečnosti v železničních tunelech“ železničního systému Evropské unie. Nařízení komise musí být dodržováno všemi členskými státy EU. ČSN na ni přímo navazuje a upřesňuje určité obecné požadavky pro ČR.

Tunely jsou dle těchto norem rozděleny do dvou skupin a to na „standardní“ a „nadstandardní“. Do nadstandardní skupiny tunelů jsou zaříděny tunely s délkou nad 1 km nebo se specifickými parametry, které by výrazněji zvyšovaly riziko vzniku požáru nebo ztěžovaly zásah hasičům. Takovými specifiky mohou být například velká intenzita dopravy či výškový rozdíl portálů.

Dle ČSN 73 7508 kapitoly 6.3.11.1 se u nově navrhovaných a rekonstruovaných tunelů navrhuje koncepce požárního zabezpečení na základě podrobné analýzy podmínek konkrétní tunelové stavby. Tato obsahuje analýzu rizik, návrh jejich eliminace a z nich vyplývající stavebně technologická opatření v tunelu a organizačně provozní opatření v příslušném úseku železniční trati pro zajištění požární bezpečnosti.

Srovnání požadavků v železničních a silničních tunelech

V porovnání se silničními tunely je požární zabezpečení železničních tunelů mírnější a závisí na posouzení rizik pro danou stavbu. Silniční tunely jsou podle ČSN 73 7508 a ČSN 73 7507 rozděleny podle délky na krátké (od 100 m do 500 m), střední (od 500 m do 1000 m) a dlouhé (více než 1000 m). Dalším dělením je způsob výstavby, druh provozu a intenzita dopravy. Podle těchto charakteristik jsou stanovena kritéria na požární bezpečnost.

Jako odůvodněný fakt přispívající k nižší potřebě požárně bezpečnostních prvků v železničních tunelech je i profesní způsobilost vlakového personálu a minimum možností vzniku chyb na základě lidského faktoru. Vlakový personál má zpravidla letitou praxi a je vyškolen na řešení krizových případů jako například požár. Na rozdíl od železnic se na silnicích pohybují řidiči, kteří nemají takové zkušenosti s řízením, a na vozovce je nekontroluje žádná elektronika, která by omezila chyby způsobené lidským faktorem.

Důležitou stránkou projektování bezpečnostních prvků v tunelech je rovněž otázka udržení zařízení v provozu. Vzhledem k tomu, že železniční tunely nejsou monitorovány kamerovým dohledem, jsou často cílem vandalů. Je proto důležité zvolit vhodný kompromis ve spolupráci HZS a projektanta, aby výsledná cena bezpečnostních opatření nepřesahovala možnosti realizace a údržby stavby. Jedním ze základních nástrojů při hledání takového kompromisu jsou právě numerické modely evakuace osob z tunelu a v případě nutnosti posoudit dopady požáru také numerické modely jeho rozvoje a účinků.

Určení metodiky a novost postupu

Projektanti v oblasti železničních staveb a zpracovatelé požárně bezpečnostních řešení projektové dokumentace k těmto stavbám. Novost metodického postupu spočívá ve vymezení aplikace numerických modelů požáru a evakuace osob v rámci normy ČSN 73 7508 z roku 2002 a nařízení Komise (EU) č. 1303/2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se „bezpečnosti v železničních tunelech“ železničního systému Evropské unie.

Základní pojmy

Analytický model

Matematický popis sledovaného jevu nebo veličiny pomocí jednoduchých vzorečků. Většinou odvozeno na základě výsledků fyzikálních zkoušek. Analytické modely jsou nejčastěji používány v normativním přístupu.

Backlayering

Pohyb zplodin hoření proti směru proudění vzduchu v tunelu.

CFD modely

Modely typu pole pracující na principu dynamické analýzy plynů rozdělení výpočetní oblasti do tzv. kontrolních objemů (buněk), mezi nimiž probíhá vzájemná výpočetní interakce.

Doba dostupná pro evakuaci

Časový interval, po který panují v místě evakuace přijatelné podmínky pro evakuované osoby.

Doba evakuace

Časový interval složený z doby před pohybem a doby pohybu.

Doba pohybu

Časový interval od zahájení evakuace po opuštění ohrožené budovy nebo oblasti.

Doba potřebná pro evakuaci

Strukturovaný časový interval od okamžiku vzniku požáru (či vzniku jiného ohrožení), po dokončení evakuace. Je složený z řady dílčích intervalů.

Doba před pohybem

Časový interval od první výstražné zprávy do zahájení evakuace. U jednotlivých osob se může velmi lišit, obtížně se kvantifikuje, může být delší než doba evakuace a na evakuační proces má proto zásadní dopad.

Dynamická analýza plynů

Výpočetní metoda založená na rozdělení výpočetní oblasti do tzv. kontrolních objemů (buněk), mezi nimiž probíhá vzájemná výpočetní interakce. Odpovídá angl. termínu Computational Fluid Dynamics (CFD).

Dynamika plynů

Jedná se o proudění tekutin, jejichž pohyb je iniciován tepelným účinkem požáru. V případě požáru tekutinu reprezentuje směs vzduchu, kouře a plyných zplodin hoření.

Evakuace

Souhrn opatření zabezpečujících přemístění osob, zvířat a věcných prostředků v daném pořadí priority z míst ohrožených mimořádnou událostí do míst, ve kterých je zajištěno pro osoby náhradní ubytování a stravování, pro zvířata ustájení a pro věcné prostředky uskladnění. Evakuace je komplexní proces, který se skládá z řady dílčích kroků.

Flashover

Celkové vzplanutí v uzavřeném prostoru. V tunelech je jeho vznik málo pravděpodobný, můžu naopak snadno nastat v uzavřených prostorech vlakových vagónů či v kabinách vozů.

Inženýrské (specifické) posouzení

Postup odlišný od normového postupu, jeho účelem je ekonomicky efektivní návrh požárně bezpečnostních opatření při dosažení přijatelné úrovně bezpečnosti.

Model

Účelová reprezentace reálného děje nebo některé jeho části. Nevyhnutelně se tedy jedná o zjednodušení reality.

Numerický model

Numerický nebo také matematický model je abstraktním objektem reprezentující sledovaný děj (zde požár a jeho účinky) s využitím matematického jazyka.

Odezva

Časový interval od okamžiku, kdy si osoby uvědomí vznik kritické situace, až do okamžiku, kdy se rozhodnou pro konkrétní způsob strategie evakuace.

Ověřovací příklad

Příklad, pomocí něhož lze zkontrolovat správnost výsledků numerického modelu. Odpovídá ekvivalentu z angl. *benchmark study*. Příklad by měly být jednoduchý, provázený podrobnou textovou dokumentací, vstupními a výstupními údaji, aby mohl být opětovně reprodukován.

Podmínky osob

Zahrnují veškeré vlivy požáru, které mění chování osoby nebo způsobují ztrátu jejich schopností.

Pokročilý model

Matematický popis sledovaného jevu nebo veličiny založený na pokročilých výpočetních metodách. Za pokročilé modely lze považovat zónové modely požáru, modely typu pole (CFD modely). Pokročilé modely jsou používány v přístupu využívající principy požárního inženýrství.

Požár řízený palivem

Při dostatečném přístupu kyslíku do místa hoření je požár uvnitř uzavřeného prostoru ovlivněn množstvím požárního zatížení v požárním úseku – požár je řízen palivem.

Požár řízený ventilací

V případě malých ploch otvorů v obvodových konstrukcích je požár uvnitř uzavřeného prostoru ovlivněn nedostatečným množstvím kyslíku pro hoření – požár je řízen ventilací.

Rezerva přijatelných podmínek

Rozdíl mezi délkou doby dostupné a doby potřebné pro evakuaci. Přirozenou motivací je hledat takové řešení, aby rezerva přijatelných podmínek byla z důvodu neodstranitelné neurčitosti některých vstupů posouzení co největší.

Rozpoznání

Období od spuštění poplachu po okamžik, kdy osoby na spuštěný poplach začínají reagovat.



Rychlost uvolňování tepla

Tepelně technická veličina popisující vývoj požáru, odpovídá angl. termínu Heat Release Rate (HRR). Je funkcí velikosti požárního úseku, požárního zatížení a času. Okrajové podmínky jako jsou ventilační podmínky, umístění zdroje hoření vzhledem k portálům, požárně technické vlastnosti materiálů ohraničujících konstrukcí atd. mají podstatný vliv na hodnotu HRR v čase.

Teplotní křivky

Křivky založené na požárních experimentech popisující průběh teploty plynu v čase pro daný prostor. Používají se jako zjednodušená metoda, pokud nejsou k dispozici podrobnější popis teploty plynu, často ve fázi návrhu konstrukcí.

Validace

Zhodnocení míry shody mezi počítačovou predikcí a fyzikálním modelem, tj. experimentálně získanými údaji.

Verifikace

Ověření popisu numerického modelu, kontrola správnosti jeho algoritmů, matematické přesnosti výpočtů nebo funkčnosti uživatelského prostředí porovnáním s jinými analytickými či matematickými modely.

Obsah

1	Dynamika plynů při požáru v tunelových stavbách	9
1.1	Požární bezpečnost v železničních tunelech.....	9
1.2	Příčiny vzniku požáru v železničním tunelu.....	9
1.3	Dynamika plynů při požáru v železničním tunelu.....	10
1.4	Vliv okrajových podmínek	11
1.5	Vliv ventilace	12
1.6	Vliv umístění zdroje hoření	13
2	Modely požáru pro tunelové stavby	15
2.1	Teplotní křivky	15
2.1.1	Uhlovodíková křivka (HC).....	15
2.1.2	RABT-ZTV křivky	16
2.1.3	RWS křivka	16
2.2	Numerické modelování	17
2.2.1	Fire Dynamics Simulator.....	17
2.2.2	Modelování hoření.....	18
2.2.3	Vliv velikosti buněk výpočetní sítě	18
2.2.4	Porovnání analytických a pokročilých modelů	20
3	Příklad simulace modelu požáru v tunelu Špičák.....	21
3.1	Technické údaje vybraného tunelu.....	21
3.2	Model tunelu skutečných rozměrů	24
3.3	Výsledky simulace	25
4	Hodnoty vybraných vstupních dat.....	35
4.1	Rychlost uvolňování tepla	35
4.2	Experimentální hodnoty HRR	35
4.2.1	Vagon osobního vlaku.....	35
4.2.2	Osobní automobil	37
4.2.3	Nákladní automobil	38
4.2.4	Materiálové vlastnosti	39
4.2.5	Reakce hoření	40
5	Základy procesu evakuace.....	41

5.1	Doba pro evakuaci osob	41
5.1.1	Doba dostupná pro evakuaci (ASET).....	41
5.1.2	Doba potřebná pro evakuaci (RSET)	42
5.2	Charakteristika osob a podmínky osob v průběhu evakuace.....	44
5.2.1	Charakteristika osob	44
5.2.2	Rychlost pohybu osob	45
5.2.3	Podmínky osob	46
5.2.4	Limity přijatelných podmínek pro evakuované osoby	47
5.3	Shrnutí	48
6	Prostorové nároky osob a dynamika davu	49
6.1	Osobní prostor jednotlivce	49
6.2	Statická hustota skupiny osob	49
6.3	Dynamická hustota skupiny osob.....	50
6.4	Úroveň kvality pěší dopravy	51
7	Modelování pohybu osob a základní pojmy.....	53
7.1	Technologie modelů pohybu osob.....	53
7.2	Statistické zpracování výsledků	54
8	Příklad analýzy evakuace osob ze železničního tunelu.....	56
8.1	Situace	56
8.2	Charakteristika osob	57
8.3	Vybrané výsledky simulace modelu evakuace.....	57
8.3.1	Vliv pořadí vozu v soupravě na průběh evakuace	58
8.3.2	Vlaková souprava se 6 osobními vozy	59
8.3.3	Vlaková souprava s 11 osobními vozy	60
8.3.4	Srovnání výsledků s normovým výpočtem	61
8.3.5	Shrnutí výsledků.....	62
	Reference.....	63

1 Dynamika plynů při požáru v tunelových stavbách

1.1 Požární bezpečnost v železničních tunelech

Podle zahraničních statistik jsou požáry v tunelech méně časté než na otevřeném prostranství. Avšak při uvážení faktu, že vlak přepravuje stovky osob či tun nákladu, teplo uvolněné při požáru v tunelu může dosáhnout až desetinásobku oproti teplu uvolněného při požárech na otevřeném prostranství a finančně náročných oprav spojených s nemalými ztrátami při výpadku dopravního spojení, následky požáru v tunelu mohou být mnohonásobně vyšší. Například při požáru tunelu v Jižní Koreji v roce 2003 zemřelo 200 osob, následkem požáru v tunelu v Azerbajdžánu v roce 1995 bylo 220 mrtvých a 256 zraněných osob, dokumentace požáru v tunelu Susa v Itálii z roku 1997 uvádí škody v rozsahu jedné lokomotivy, 13 vagonů spolu se 156 přepravovanými automobily [1]. Neméně známé jsou i následky požárů v Eurotunelu spojující Francii a Velkou Británii pod hladinou průlivu La Manche z let 1994, 1996, 2006, 2008 a 2012 [2].

V historii samostatné ČR dosud nedošlo k tragické události spojené s požárem vlakové soupravy v železničním tunelu. Podle [3] je pravděpodobnost vzniku nehody v železničním tunelu ČR rovna $2,186 \cdot 10^{-8}$. Nicméně tato naštěstí velmi příznivá statistika je totožná se statistikou tunelů silničních. Přesto v současné době neexistují hlasy, které by zpochybňovaly investice do protipožárního zabezpečení tunelů.

1.2 Příčiny vzniku požáru v železničním tunelu

Riziko vzniku požáru je v železničních tunelech stejně tak jako v tunelech silničních dáno hořlavostí vozidel či materiálu vozidly přepravovaného. Existuje zde několik možných zdrojů požáru, které lze rozdělit na základě druhu dopravy. V tunelech určených pro osobní přepravu je riziko vzniku požáru obecně nižší než v tunelech pro nákladní dopravu. Jelikož je na nových úsecích trať již plně elektrifikovaná a vlaky nejsou poháněny spalovacími motory, nepředpokládá se vznícení pohonných hmot, například nafty. Jako pravděpodobný scénář vzniku požáru se předpokládá zahoření v kabinách či vagonech.

V osobní dopravě může být zdrojem hoření závada na elektroinstalaci nebo přepravovaný majetek cestujících. Konstrukce osobního vagonu a osobního automobilu je velmi podobná. V základu jde o karoserii, která je tvořena nehořlavými, kovovými materiály a jejím oplechováním. Vnitřek pak tvoří již hořlavé materiály jako například čalounění z hořlavých textilií typu PA, PES nebo výplňové materiály na bázi PU. Dalšími prvky jsou pak interiérové plasty z běžného PP nebo PE. V neposlední řadě jsou rizikové i elektroinstalace zabalené do hořlavých bužírek. Společným charakterem těchto materiálů je snadná zápalnost a vysoká rychlost odhořívání s velkou výhřevností. Požár se tak může rozšířit na celý vagon osobního vlaku. V tomto případě však bývá požár v počátcích nahlášen či přímo uhašen přítomnými osobami. V případě neelektrifikovaných tratí je nutné uvažovat za možný zdroj požáru i olej v lokomotivě.

V nákladní dopravě je riziko vzniku požáru vyšší. Zdrojem hoření zde může být náklad samotný (osobní automobil, případně nákladní automobil, jiné zboží). Požární scénář je tedy nutné uvažovat dle přepravovaného materiálu/zboží. Hoření menšího přepravovaného zboží či materiálu není uvažováno z důvodu převážení v uzavřených kontejnerech.

Vzhledem k brzdě dráze vlaků, která se u osobních vlaků (rychlost 80 – 100 kmh⁻¹) pohybuje okolo 400 m, rychlíků jedoucích rychlostí 120 kmh⁻¹ je kolem 700 m a nákladních vlaků (rychlost 100 kmh⁻¹) kolem 500 m, není nutné posuzovat krátké tunely. Filozofií bezpečnosti v tunelech je, co nejrychleji dopravit vlak v případě kolize ven z tunelu. Vlaky tudíž v tunelu nezastaví. Z pohledu bezpečnosti je však nutné uvažovat požární scénáře zahrnující případnou překážku na kolejích, kdy je nucen vlak v tunelu zastavit.

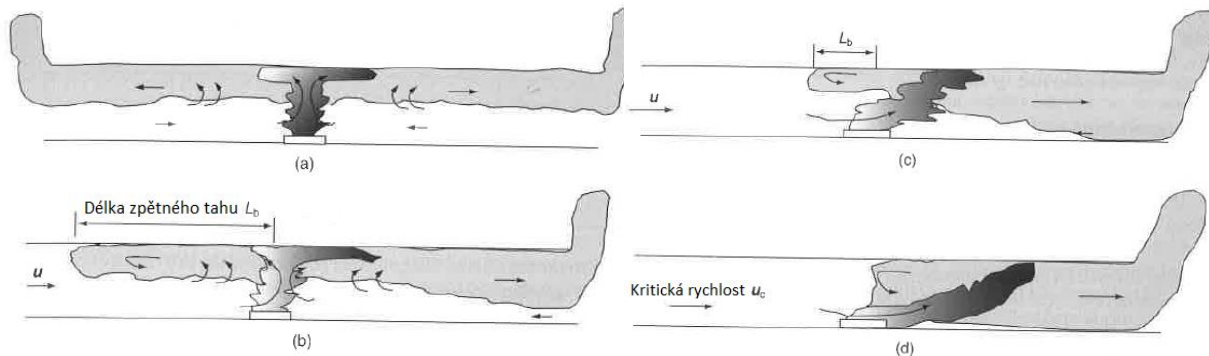
Pro všechny možné zdroje požáru je nutné stanovit rychlost uvolňování tepla (HRR, z angl. Heat Release Rate). Tato veličina je jednou z nejdůležitějších tepelně technických veličin popisující vývoj požáru. Je funkcí velikosti požárního úseku, požárního zatížení a času. Okrajové podmínky jako jsou ventilační podmínky, umístění zdroje hoření vzhledem k portálům, požárně technické vlastnosti materiálů ohraničujících konstrukcí atd. mají podstatný vliv na hodnotu HRR v čase. Nicméně, hlavním parametrem, na kterém HRR závisí, je požární zatížení, které nemusí být po dobu průběhu požáru konstantní.

1.3 Dynamika plynů při požáru v železničním tunelu

Dynamiku plynů při požáru v tunelech lze stejně jako při požáru v budovách popsat pomocí tří fází: fázi rozvoje, fázi ustáleného hoření a fázi útlumu. Tyto fáze jsou ovlivněny množstvím paliva, ventilačními podmínkami, geometrií a konstrukčním provedením tunelu. Díky velkým tepelným ztrátám do okolních konstrukcí a úniku horkých plynů směrem k portálům v tunelech na rozdíl od požáru v uzavřeném prostoru nedochází k celkovému vzplanutí (tzv. flashover). Flashover může naopak snadno nastat v uzavřených prostorech vlakových vagonů či v kabinách vozů. Vlivem velkého množství vzduchu přístupujícímu k hoření v důsledku přirozeného či nuceného větrání v tunelech dochází téměř vždy k požáru řízeným palivem. Požár řízený ventilací byl zaznamenán pouze v několika případech, kdy plameny pohltily více dopravních prostředků – např. požár v silničním tunelu Mont Blanc, Taury v roce 1999 (v plamenech 18 nákladních vozidel, 9 osobních vozidel, 1 dodávka a 1 motocykl – odhadem 190 MW, teploty více než 1000 °C [4] a požár v tunelu St. Gotthard, Švýcarsko, 2001 (23 vozidel v plamenech), [5]. Ve fázi útlumu oheň uhasíná převážně kvůli nedostatku paliva, zřídka přechází k požáru řízeným ventilací. V případě řízení ventilací dojde podle [6] k uhasnutí požáru při snížení obsahu kyslíku ve vzduchu na 13 %. Podle [7] vysoké proudění a tepelný tok odrážející se od okolních konstrukcí zpět k palivu způsobuje až čtyřnásobné uvolnění tepla při hoření v porovnání s hořením v otevřeném prostoru. Při rychlosti proudění 10 ms⁻¹ může hodnota uvolněné energie dosáhnout až desetinásobku energie uvolněné v otevřeném prostoru. Tepelná radiace a později i vlastní proudění horkých zplodin hoření tak umožňují rychlé šíření požáru na další vagony nacházející se poblíž zdroje hoření.

S rozvojem požáru v tunelu dochází ke změnám proudění plynů, které ovlivňují formování a směr pohybu horké podstropní vrstvy zplodin. Horká vrstva plynů nashromážděná pod stropem tunelu je ovlivněna velikostí požáru, způsobem větrání a výškou tunelu. V závislosti na sklonu tunelu a směru podélného proudění se tato vrstva šíří ve dvou směrech, nebo pouze směrem jedním. V případě nízké rychlosti proudění vzduchu (0 – 1 ms⁻¹, většinou přirozeného větrání) se vrstva šíří na obě strany tunelu od ohniska téměř rovnoměrně – obr. 1a. Při zvýšení rychlosti proudění k hranici 1 ms⁻¹ dochází ve vzdálenosti přibližně sedmnásobku výšky tunelu k obrácení zpětného tahu kouře směrem ke zdroji hoření – obr. 1b. Při střední rychlosti vzduchu (1 – 3 ms⁻¹) dochází ke zkrácení vrstvy kouře zpětného tahu na délku nula až sedmnásobek výšky tunelu – obr. 1c. Vysoká rychlost proudění vzduchu (více než 3 ms⁻¹,

nucené větrání) způsobuje pohyb kouřové vrstvy zejména ve směru proudění – obr. 1d. Rychlost proudění, při které je zpětný tah kouře nulový, se nazývá kritická rychlost. Pohyb zplodin hoření proti směru proudění vzduchu v tunelu je označován angl. slovem backlayering.



Obr. 1: Schéma šíření kouře v závislosti na rychlosti proudění vzduchu v tunelu: a) nízká rychlost proudění ($0 - 0,3 \text{ ms}^{-1}$), b) proudění na hranici nízké rychlosti (1 ms^{-1}), c) střední rychlost proudění ($1 - 3 \text{ ms}^{-1}$), d) vysoká rychlost proudění (více než 3 ms^{-1}) [1].

V tunelu není přísun kyslíku ke zdroji hoření natolik intenzivní jako na volném prostranství a vlivem nedokonalého spalování dochází k tvorbě velkého množství toxických zplodin hoření. Zásadním problémem z pohledu bezpečné evakuace je tedy odvod zplodin hoření z místa požáru. V případě kratších tunelů postačuje volný odtok zplodin z portálů. Jestliže se jedná o tunely delší, dochází k ochlazování zplodin hoření transportem tepla do ostění, ztrátě vzlaku a rozpadu stratifikace kouřové vrstvy. Zplodiny hoření tak v průběhu jejich proudění tunelovou troubou klesají a zhoršují možnosti evakuace tunelu. Možnosti evakuace se výrazně zhoršují při zvětšující se délce tunelu. Z tohoto důvodu je nutné u tunelů delších než 1000 m zřizovat únikové šachty tak, aby maximální vzdálenost mezi nimi byla 500 m. U tunelů delších než 1000 m se v odůvodněných případech, což jsou například tunely s malým výškovým rozdílem portálů, dlouhým stoupáním nivelety a velkou intenzitou dopravy navrhuje nucené větrání.

1.4 Vliv okrajových podmínek

Podle [8] má intenzita ventilace vliv na rychlosti rozvoje požáru a obecně větší rychlost proudění odpovídá vyšší rychlosti rozvoje požáru. Rychlost proudění v tunelu má však velmi omezený vliv na maximální hodnotu rychlosti uvolňování tepla. Shodné závěry potvrzuje i studie Li a Ingason [9]. Li et al. [10] zjistil, že u dobře větraných požárů, ke kterým v tunelech dochází téměř vždy, nemá na maximální hodnotu rychlosti uvolňování tepla vliv ani šířka a výška tunelu. Ke shodnému závěru došli i Lemaire a Kenyon [11].

Pokud není rychlost podélného proudění větší než určitá hodnota (např. 1 ms^{-1}) a zpětný tok plynů je zadržet tokem čerstvého vzduchu (například v dlouhém tunelu), rozvoj a účinek požáru může být silně ovlivněn. Požár se vyvíjí pomaleji a maximální rychlost uvolňování tepla je nižší. Hlavním důvodem je existence zpětného toku plynů s velkým množstvím kouře, který je přívodem čerstvého proudu vzduchu veden zpět k místu hoření. Kouřová vrstva horkých plynů je ochlazena, což způsobí okamžitý pokles kouře. V místě hoření způsobí pokles kouře zpomalení hoření vlivem nedostatku čerstvého vzduchu přistupujícímu do procesu hoření. Když není zpětný tok zastaven prouděním v tunelu, např. v krátkém

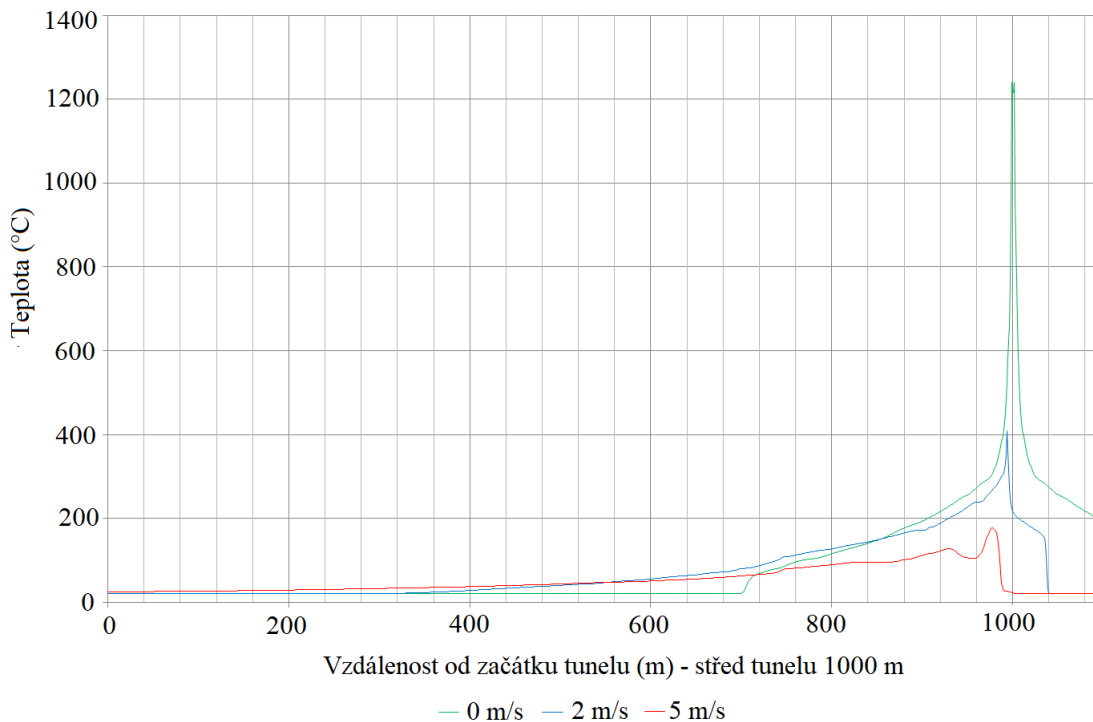
tunelu nebo v tunelu bez převládající podélné ventilace (0 ms^{-1}) kouř proudí z tunelu oběma portály. Vznik zpětného proudění plynů, které ovlivňuje rozvoj a intenzitu požáru, závisí na délce tunelu a umístění požáru vzhledem k portálům. Při výběru rozhodujícího požárního scénáře v tunelu by proto mělo být brán ohled na tento fakt. Hodnotu rychlosti proudění, která zabrání vzniku zpětného proudění nelze obecně stanovit. Liší se v závislosti na velikosti požáru a geometrii řezu tunelu [12].

Výběr požárních scénářů by měl odrážet i skutečnost, že se mohou podmínky v daném tunelu podstatně měnit s okolní teplotou (vliv rozdílů tlaků u vstupních portálů). Například rozdílné teploty u obou portálů mohou způsobit obrácený směr proudění než by se předpokládalo při shodné teplotě u obou portálů. Kromě vlivu přirozeného proudění nebo proudění vzniklého vlivem hoření a rozdílných tlaků, může být při požáru v železničním tunelu brán v úvahu i tzv. pístový efekt vzniklý průjezdem vlaku.

1.5 Vliv ventilace

Na shodném modelu tunelu o čtvercovém průřezu $6 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ a délce 2000 m byla provedena analýza vlivu podélného proudění vzduchu na výsledky. Zdroj hoření o výkon 20 MW byl umístěn shodným způsobem jako v předchozích studiích, ve středu tunelu. Maximální teplota plynu byla dosažena v čase 300 s (v tomto čase bylo provedeno srovnání všech variant).

Na obr. 2 je vidět předpokládaný vliv podélného proudění, tedy posun maximální teploty do vzdálenějšího místa od zdroje hoření (zdroj umístěn na kótě 1000 m) ve směru proudění. Společně s posunem místa výskytu maximální teploty dochází rovněž k poklesu teploty. Průběh teploty při rychlosti proudění 5 ms^{-1} s lokálním poklesem bezprostředně za místem maximální teploty naznačuje značné turbulence v proudění, které výrazně ovlivňují rozložení zplodin v průřezu tunelu.



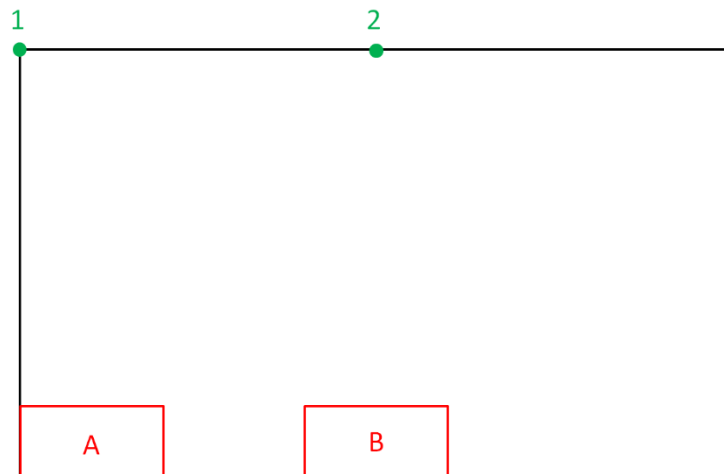
Obr. 2: Vliv rychlosti proudění na teplotu plynu.

1.6 Vliv umístění zdroje hoření

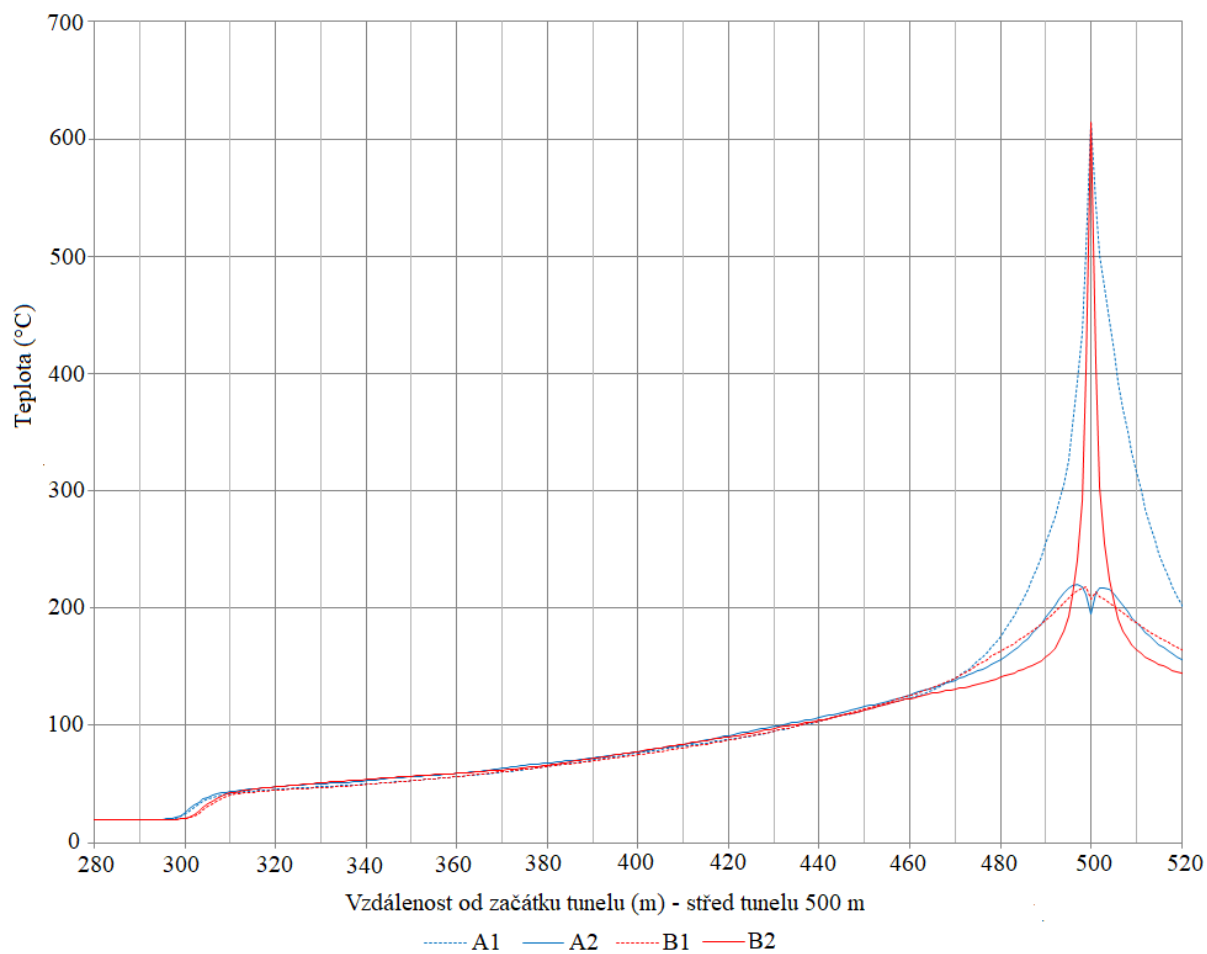
Umístění zdroje požáru bylo ověřeno na dvou situacích, naznačených na obr. 3 (červeně označena pozice zdroje hoření). Při této studii byly měřeny teploty plynu vždy ve dvou místech (na obr. 3 zeleně označené body). Model tunelu odpovídá rozměrům 6 m x 10 m, délka 1000 m. Zdroj hoření umístěný ve středu tunelu má výkon 20 MW. Maximální teplota plynu byla dosažena v čase 300 s (v tomto čase bylo provedeno srovnání všech variant).

V rámci studie byly srovnány čtyři kombinace umístění zdroje hoření a senzoru měřící teplotu plynu - A1, A2, B1, B2, kdy písmeno vždy značí pozici zdroje hoření a číslo místo měření (linie po celé délce tunelu) dle obr. 3. Výsledky studie jsou na obr. 4.

Z obr. 4 lze pozorovat, že vliv umístění požáru na rozložení teploty plynu je omezen lokálně na blízké okolí zdroje hoření, přibližně 40 m v obou směrech. Zajímavé je, že v případě umístění zdroje hoření v ose tunelu (B2) je teplota "blízkého okolí" ohraničena ostřeji než při variantě A1. Tento jev je možné vysvětlit tak, že při variantě B2 mohou horké plyny odcházet rychleji do všech směrů. Velice podobný je průběh teploty plynu u variant A2 a B1, tedy situace kdy je teplota měřena mimo pozici uložení zdroje hoření. Ve vzdáleném okolí od požáru je průběh teplot všech variant srovnatelný.



Obr. 3: Schéma modelů pro ověření vlivu polohy požáru (příčný řez).



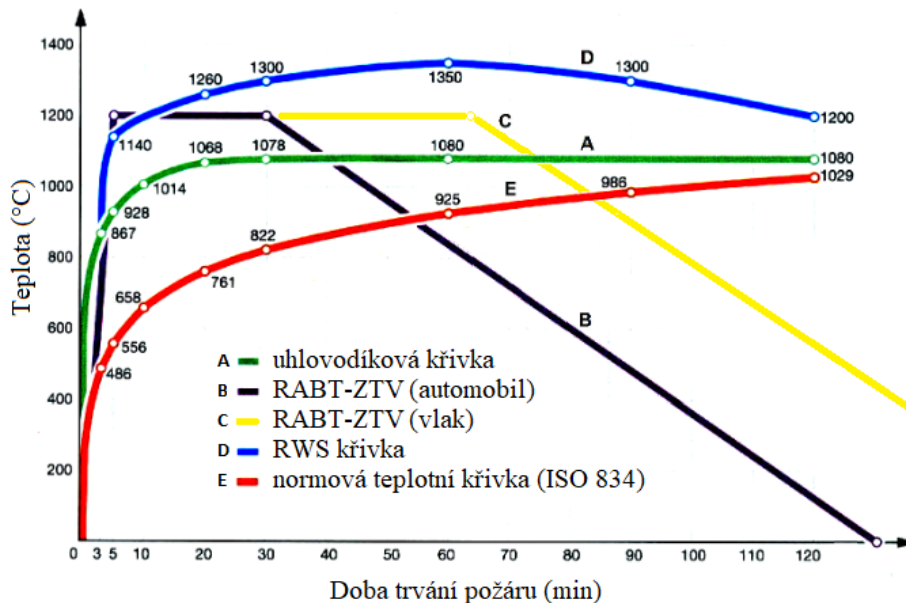
Obr. 4: Vliv umístění zdroje hoření na teplotu plynu.

2 Modely požáru pro tunelové stavby

V projekční části tunelové výstavby je požární návrh většinou řešen od délky tunelu 350 m, která je považována za délku se zvýšeným rizikem bezpečnosti. Teplota plynu a rozvrstvení toxických plynů při požáru spolu s viditelností jsou klasifikovány jako nejdůležitější parametry ovlivňující bezpečnost osob při haváriích v tunelech. Tyto parametry stejně jako délku plamene pod stropem tunelu, kterou je nutné znát k posouzení šíření požáru mezi více vozidly, lze stanovit na základě teplotních křivek a jednoduchých empirických vztahů. Cílem je však určit přesné chování požáru a šíření toxických látek v tunelu, které odpovídá skutečnosti, a nalézt tak rovnováhu mezi vybavením tunelu bezpečnostními prvky a jejich přínosem ke zvýšení bezpečnosti provozu v daném místě. V tomto případě je vhodné využít metodu dynamické analýzy plynů (CFD).

2.1 Teplotní křivky

K modelování rozvoje teplot při požáru v tunelu lze použít tři typy křivek: uhlovodíkovou, RABT a RWS křivky. Každá křivka je zaměřena na odlišný požár, je tudíž nutné předem definovat, pro jaké dopravní prostředky bude tunel využíván. Na obr. 5 jsou uvedené křivky porovnány s normovou teplotní křivkou.



Obr. 5: Teplotní křivky používané pro tunelové stavby v porovnání s normovou teplotní křivkou

2.1.1 Uhlovodíková křivka (HC)

Křivka svým rychlým nárůstem simuluje požár hořlavých kapalin jako například ropy či benzínu v částečně uzavřeném prostoru. Křivka nezahrnuje klesající fázi vlivem odhořívání paliva. Její maximální hodnota je 1100 °C, odkud je dále konstantní. Uhlovodíková křivka je dána následujícím vztahem

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

kde T je teplota v $^{\circ}\text{C}$ a t je čas v min.

Dále lze použít uhlovodíkovou křivku upravenou francouzskými předpisy, tzv. modifikovanou uhlovodíkovou křivku (HCM). Maximální teplota křivky dosahuje 1300°C . Křivka je popsána vztahem

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

kde T je teplota v $^{\circ}\text{C}$ a t je čas v min.

2.1.2 RABT-ZTV křivky

Křivky byly sestaveny na základě výsledků zkoušek evropského projektu EUREKA. Křivky mají během 5 min prudký nárůst teploty do maxima 1200°C . Poté je teplota konstantní po dobu 30 min pro automobily (RABT-ZTV car) a 60 min pro vlaky (RABT-ZTV train), poté dochází k lineárnímu poklesu teploty během 110 minut u obou typů křivek na původních 15°C . Vývoj obou křivek je popsán souřadnicemi v tab. 1.

Tab. 1: Souřadnice křivek RABT-ZTV

RABT – ZTV (vlak)		RABT – ZTV (automobil)	
Čas [min]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Čas [min]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
0	15	0	15
5	1200	5	1200
60	1200	30	1200
170	15	140	15

2.1.3 RWS křivka

Křivka vyvinutá v Nizozemsku reprezentuje požár 50 m^3 paliva o výkonu 300 MW po dobu 120 min. Použití této křivky je výhodné u tunelů s přepravou nebezpečných látek, např. při návrhu tunelového ostění na požár cisterny s hořlavým palivem. Křivka je dána souřadnicemi uvedenými v tab. 2.

Tab. 2: Souřadnice křivky RWS

RWS (RijksWaterStaat)	
Čas [min]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
0	20
3	890
5	1140
10	1200
30	1300
60	1350
90	1300
120	1200
180	1200

Při použití analytického popisu teploty plynu v tunelu pomocí teplotní křivky je nutno brát v úvahu, že teploty plynu mohou být výrazně konzervativní.

2.2 Numerické modelování

Numerické modely požáru, které se během posledního desetiletí staly účinným nástrojem v oblasti navrhování konstrukcí na účinky požáru i přípravě záchranných prací, umožňují vizualizaci šíření požáru a kouře v tunelech včetně stanovení jejich základních parametrů jako je teplota a rychlost proudění plynu, rychlost uvolňování tepla, viditelnost a obsah zplodin hoření. K simulaci hoření v tunelech lze využít metodu dynamické analýzy plynů, též označované jako výpočetní dynamické modely kapalin a plynů. Princip těchto modelů spočívá v rozdělení řešeného prostoru na velké množství kontrolních (CFD, z angl. Computational Fluid Dynamics). V současné době existuje mnoho softwarů k řešení dynamiky plynů, ať už komerčních (Smartfire, Fluent, Sofie, FLACS) či volně dostupných (FDS). Požární specifika jsou v programech zavedena jako výpočetní submodely, například submodel hoření a sdílení tepla.

Výpočetní programy jsou založeny na řešení rovnic zachování a přenosu energie, hmoty a hybnosti v každém z kontrolních objemů (metoda konečných objemů). Řešením Navier-Stokesových rovnic pro nestacionární proudění s ohledem na přenos tepla a kouře lze popsat výše zmíněné hledané veličiny. Míra přesnosti předpovědi šíření požáru závisí na správnosti veličin vstupujících do výpočtu. Výběru geometrie objektu, materiálových charakteristik, kinetice spalování a dalším okrajovým podmínkám musí být proto věnována velká pozornost. Nevýhodou CFD programů je vysoká uživatelská náročnost a obtížná dostupnost vstupních dat, zejména materiálových a požárních charakteristik, které mohou výrazně ovlivnit výstupní data. Vysoké požadavky na hardware jsou i v dnešní době limitujícím faktorem. O náročnosti výpočtu kromě vlastního simulovaného jevu rozhoduje jemnost/hrubost výpočetní sítě. Běžně se lze setkat s výpočty trvajících několik dní či týdnů.

Pro praktické využití pokročilého modelování je nutné zkontrolovat, zda je softwarový nástroj správně aplikován na konkrétní problémy. S tím souvisí dva důležité pojmy – verifikace a validace. Verifikací se rozumí ověření popisu modelu, kontrola správnosti jeho algoritmů, matematické přesnosti výpočtů, funkčnosti uživatelského prostředí apod. Validací se rozumí zhodnocení míry shody mezi počítačovou predikcí a fyzikálním modelem, tj. experimentálně získanými údaji. Správnost výsledků lze zkontrolovat pomocí ověřovacích příkladů (tzv. benchmark studies). Tyto příklady by měly být relativně jednoduché, provázené podrobnou textovou dokumentací, vstupními a výstupními údaji, aby mohly být opětovně reprodukovány. Obecné principy ověřovacích příkladů jsou uvedeny v [13, 14, 15, 16]. Validací příklad požáru v tunelu lze najít např. v [17].

2.2.1 Fire Dynamics Simulator

FDS (Fire Dynamics Simulator) je jeden z nejvíce používaných CFD programů na světě a to především díky své dostupnosti a nepřetržité údržbě. Program je velmi rozšířený i v České republice a lze nalézt mnoho příkladů jeho praktického využití, počínaje modelováním požárů v budovách, v tunelových stavbách či jiných komplikovaných prostorech. FDS je CFD model vyvíjený americkým Národním institutem pro normalizaci a technologii (NIST) [18]. K práci v programu FDS je možné využít pre-processor, který usnadní sestavování vstupního kódu, a post-processor, díky němuž je možné graficky znázornit výsledky. Grafické uživatelské rozhraní při přípravě vstupního souboru zajišťuje např. program Pyrosim. Vizualizace výsledků je umožněna pomocí programu Smokeview [19].

Vstupními parametry do programu FDS jsou: numerická síť, která tvoří velikost výpočetní oblasti, geometrie tunelu, vlastnosti materiálů, vlastnosti okolního prostředí, zdroj hoření, reakce hoření, případně rovnice pyrolýzy, výpočetní dobu a krok, a požadované výstupy. Pokročilí uživatelé mohou nastavit vlastnosti modelu turbulence a radiačního modelu.

Princip sestavování vstupního kódu a pravidla programu nejsou obsahem této metodiky. Uživatel by se měl vždy řídit příručkou odpovídající používané verzi programu.

Výstupy z programu FDS mohou být: teplota plynů, tlak a hustota plynů, rychlost proudění plynů, výška kouřové vrstvy, koncentrace plynů (vodní páry, CO₂, CO, N₂), koncentrace kouře a odhad viditelnosti, atd. Ověření shody vypočítaných dat s výsledky z experimentů je předmětem mnoha studií. Rychlost proudění a délka zpětného proudění byla ověřena např. v [20 a 21]. Studie [20 a 22] prokazují míru shody s experimentálními výsledky rychlosti proudění a teploty plynů v blízkosti zdroje hoření. Dle uvedených i dalších studií Collela [23] shrnuje, že CFD metoda může být použita pro předpověď proudění plynů a teploty plynů s dostatečnou přesností.

2.2.2 Modelování hoření

Pro numerickou simulaci požáru pomocí softwaru FDS (z ang. Fire Dynamics Simulator) lze využít tři metody modelování hoření:

- pomocí hořáku specifikované hodnoty (či funkce hodnoty na čase) rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA),
- pomocí paliva, které hoří v závislosti na dané teplotě vznícení,
- pomocí paliva, které hoří podle chemických reakcí popisující proces pyrolýzy.

Software FDS byl ověřen pro mnoho požárních scénářů. Obecně lze dobré shody mezi výsledky z FDS a experimentálními daty dosáhnout pro předpověď teploty plynů, kouře a proudění na základě modelu HRRPUA, viz např. Ma a Quintiere [24] a Li et al. [25]. Model požáru na základě HRRPUA naopak nelze využít pro předpověď rozvoje požáru, protože je jeho rychlost rozvoje předepsána. Horší shody bylo dosaženo v oblasti modelování rozvoje požáru při použití modelu s danou teplotou vznícení a modelu využívající rovnice kinetické pyrolýzy [8]. Tyto dvě metody jsou stále vyvíjeny a předtím než budou použity k spolehlivé předpovědi požárního scénáře, potřebují být dostatečně ověřeny. Pro tento typ modelování jsou jako vstupní hodnoty nezbytné data z malých zkušebních zařízení, která jsou zřídka dostupné.

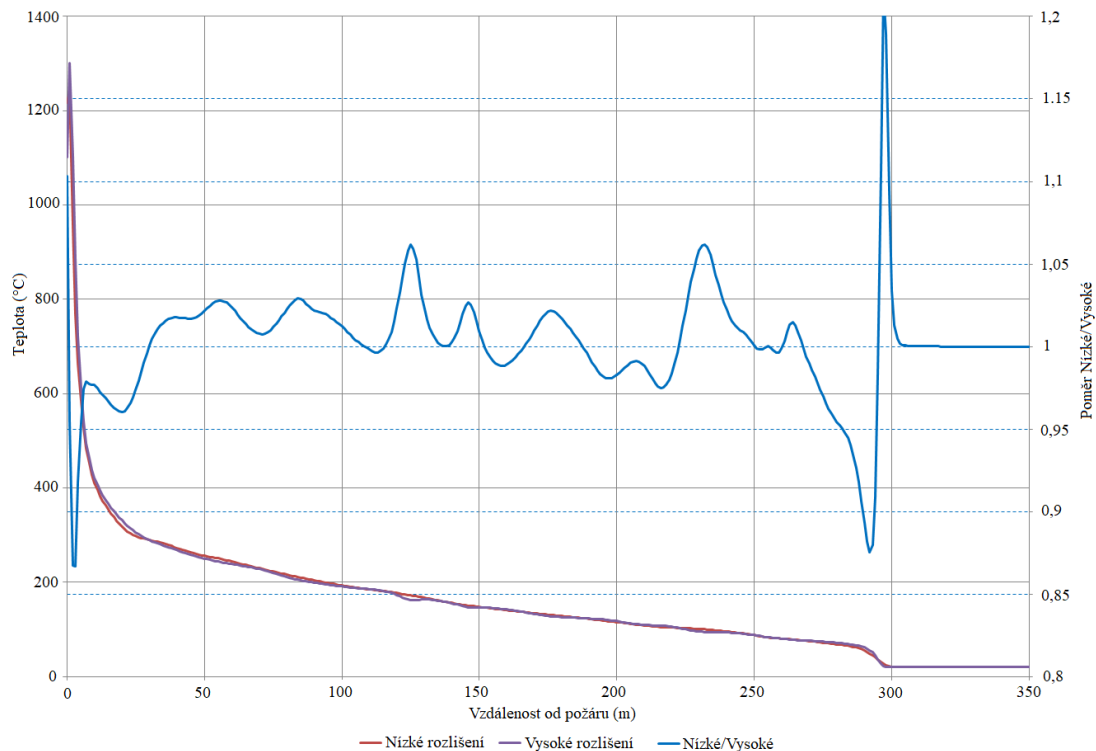
Model se zdrojem hoření v podobě dané hodnoty (či funkce hodnoty na čase) rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA) je možné s dostatečnou přesností využít k simulaci rozvoje požáru v tunelových stavbách. Je proto doporučen jako vhodná metoda pro simulaci rozvoje požáru. Podobné výsledky je možné dosáhnout i u modelu, kde je zdroj hoření popsán pomocí chemických rovnic pyrolýzy. Simulace využívající modely pyrolýzy jsou však vysoce citlivé na vstupní data. Tyto modely je proto nutné vždy validovat oproti výsledkům fyzických zkoušek.

2.2.3 Vliv velikosti buněk výpočetní sítě

Velikost buněk výpočetní sítě je jedna z veličin, která ovlivňuje přesnost výsledků. Obecně musí být všechny geometrické charakteristiky modelovaného prostoru zachyceny numerickou sítí. Objekty, které jsou menší než buňka této sítě, musí být buď aproximovány buňkou, nebo musí být vynechány. V uživatelské příručce programu FDS [18] jsou pro volbu velikosti buňky sítě doporučena jasná pravidla. Pro počáteční odhad velikosti buněk je možné využít i další volně dostupné pomůcky, např. FDS Mesh Size Calculator.

V rámci ověření vlivu velikosti výpočetní sítě na výsledky byly v programu SMARTFIRE srovnány dva modely téhož tunelu o čtvercovém průřezu 6 m x 10 m a délce 2000 m. Požár o výkonu 20 MW (křivka hoření simulována jako druhá mocnina času) byl situován v geometrickém středu půdorysu tunelu. Během výpočtu bylo maximální teploty plynu dosaženo v čase 300 s (v tomto čase bylo provedeno srovnání obou modelů). Shodný model tunelu byl řešen s různým rozlišením výpočetní sítě: a) model s “nízkým rozlišením” měl 835 380 buněk, b) model s “vysokým rozlišením” 9 960 750 buněk (poměr 11,9). V softwaru SMARTFIRE není možné zvolit přesný poměr nebo rozměr buněk. Síť je generována automaticky a má proměnné parametry v závislosti na vzdálenosti od modelovaných objektů, zdroje požáru a geometrie tunelu. Výpočetní čas modelu s nízkým rozlišením byl 13 hodin, s vysokým potom 171 hodin (poměr 13,1). Porovnání teploty plynu vypočtené těsně pod stropem tunelové konstrukce z obou modelů jsou uvedeny na obr. 6. Obrázek rovněž uvádí poměr obou hodnot, k němuž se váže svislá osa na pravé straně grafu.

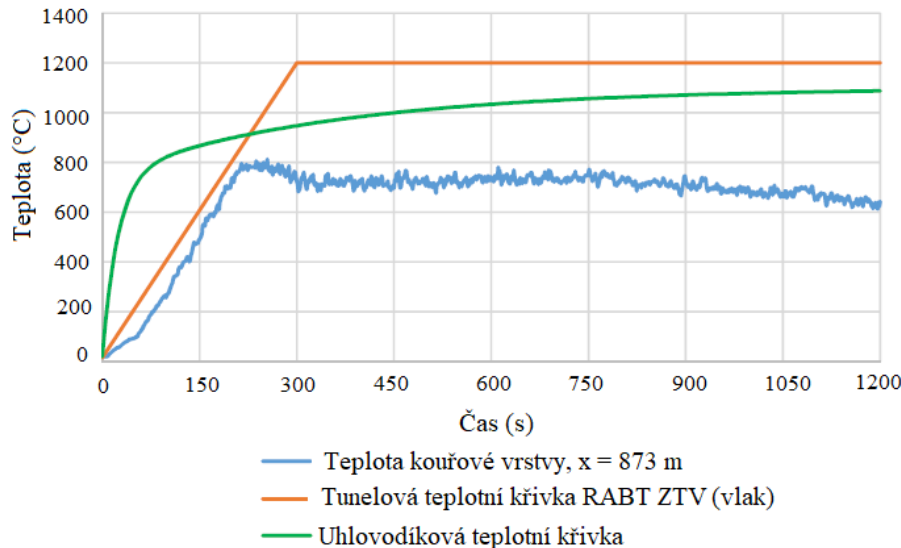
Jak je na obr. 6 patrné, rozdíly jsou relativně malé. V oblasti které je ovlivněna požárem (0 m – 350 m) je maximální odchylka 21,5%, směrodatná odchylka potom 3,4% a průměrná odchylka 0,2%. Lokálně tedy může dojít ke značnému rozdílu pozorovaných teplot. Z globálního pohledu, který je pro studovanou problematiku rozhodující, lze tyto odchylky považovat za zanedbatelné.



Obr. 6: Vliv velikosti výpočetní sítě na rozvoj teploty plynu v SMARTFIRE v čase 300 s.

2.2.4 Porovnání analytických a pokročilých modelů

Rozvoj teploty kouře v čase vypočítaný pomocí programu FDS v tunelu Špičák (praktický příklad je popsán v následující části) je porovnán s teplotními křivkami, které jsou nejčastěji používané při navrhování tunelových staveb. Teplota kouřové vrstvy pocházející ze softwaru vyjadřuje průměrnou teplotu horké vrstvy plynů, měřené na zadané svislici od spodního okraje tunelu k hornímu oblouku.



Obr. 7: Porovnání teploty kouřové vrstvy z modelu s teplotními křivkami

V grafu na obr. 7 je patrné, že nárůst teploty plynu z modelu v FDS se v počáteční fázi požáru nejlépe shoduje s teplotní křivkou RABT ZTV (pro vlaky). Při nárůstu teploty tuto křivku kopíruje a po dosažení maxima se ustálí v konstantní hodnotě. Tato hodnota je však nižší než uvedená RABT ZTV křivka (v daném případě 800 °C a 1200 °C). Rozdíl lze vysvětlit tím, že teplota pocházející z numerického výpočtu je průměrem teplot z několika čidel umístěných v horké vrstvě plynů. Pokud by byly uvedeny maximální vypočítané hodnoty, průběh křivky z numerického modelu by se normové křivce v krátkých časových intervalech přiblížil (výkyvy teplot). RABT křivka je rovněž konzervativní, aby postihla všechny možné požární scénáře.

Uhlovodíková teplotní křivka se průběhu teplot vypočítaných modelem pro požár vagonu osobního vlaku svým tvarem ani počáteční fázi příliš nepodobá. Tato křivka je sestavena pro požár hořlavých kapalin. Především je využívána pro předpověď teplot v silničních tunelech, kde se předpokládá požár pohonných hmot vozidel.

Z porovnání obou přístupů, zjednodušené předpovědi pomocí teplotních křivek a pomocí pokročilého modelování metodou CFD, je zřejmé, že v případě použití teplotních křivek ve fázi předběžného posouzení účinků požáru v železničním tunelu je vhodné použít křivku RABT ZTV pro vlaky, i když může být značně konzervativní.

3 Příklad simulace modelu požáru v tunelu Špičák

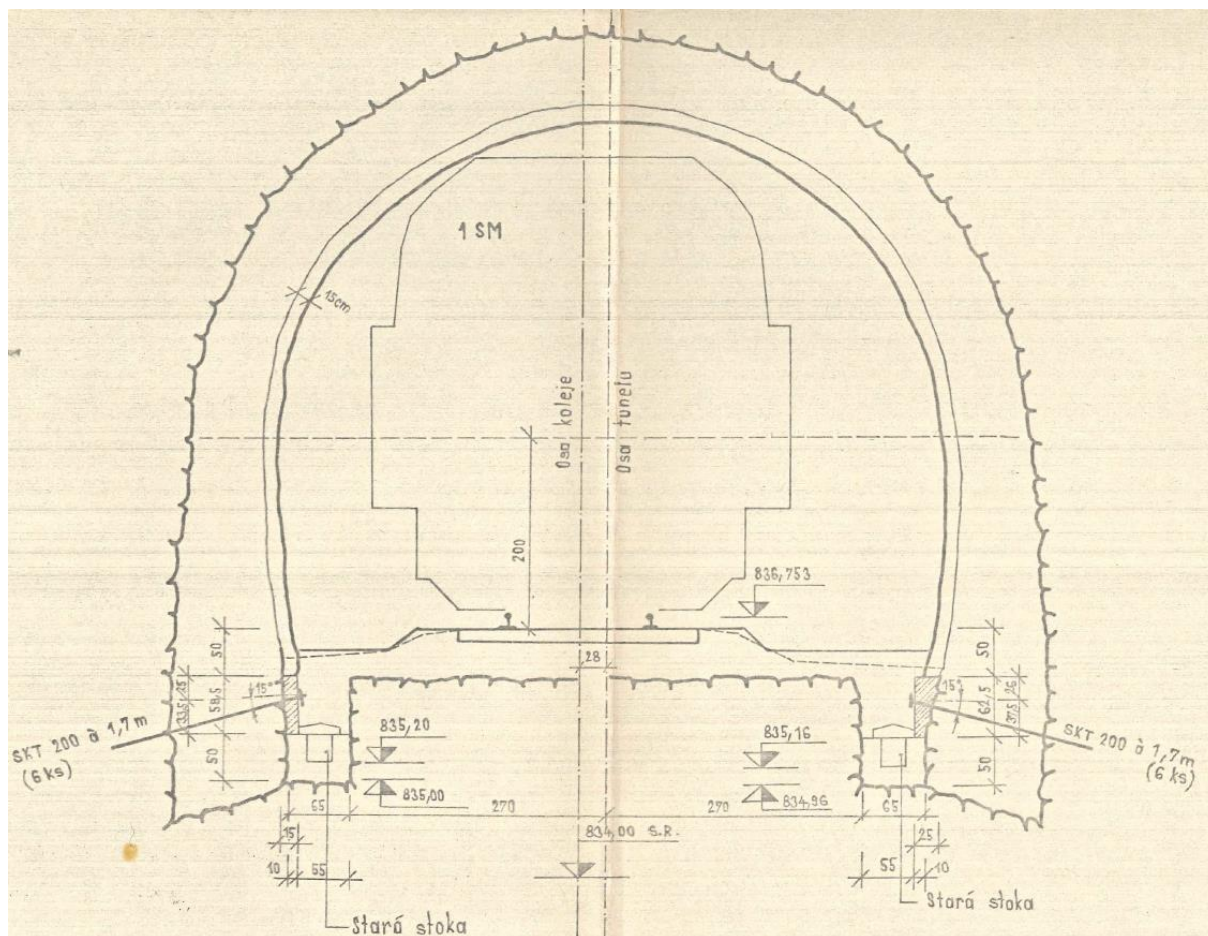
3.1 Technické údaje vybraného tunelu

V rámci aplikace pokročilých modelů na tunel skutečných rozměrů byl vybrán Špičácký železniční tunel. Tunel Špičák leží na trase Plzeň – Železná Ruda, nacházející se mezi zastávkami Hojsova Stráž – Brčálník a Špičák. Jeho délka je 1 747,25 m. Díky velké délce a pro zvýšení rychlosti výstavby, byly při stavbě tunelu Špičák zřízeny dvě svislé šachty, které vedly do středu tunelu. To umožnilo, aby stavba probíhala celkem z 6-ti směrů a to z obou konců a od každé svislé šachty na obě strany. Tyto šachty jsou patrné v podélném řezu na obr. 5. Tunel byl vyražen v letech 1874 – 1877. Za dobu provozu se na několika místech již dělalo betonové ostění stříkaným betonem a výztuží o síle 300 – 400 mm [Karel Knížek, SŽDC, Oblastní ředitelství Plzeň]. V současné době probíhá na tunelu rekonstrukce. Protože se však jedná o rekonstrukci bez změny prostorové průchodnosti, není nutno zde vytvářet nové bezpečnostní prvky jako například bezpečné oblasti apod. V tunelu bylo osazeno nové nouzové osvětlení s místním a dálkovým ovládáním, včetně náhradního zdroje. Dále zde bylo nainstalováno nové evakuační značení, aby vyhovovalo současným předpisům TSI a vysypán nový evakuační chodník o šířce 1,2 – 1,5 m. Průřez tunelu je tvarově i rozměrově různý, proto je tunel dělen na celkem 20 tunelových pasů. Sklony tunelu jsou uvedeny v tab. 3. Ostění tunelu je v pasech 1 – 18 tvořeno kamenným rádkovým obkladem, dále je tunel bez ostění (ostění tvoří skála) nebo má ostění tvořené vyztuženým stříkaným betonem. V tunelu je zřízeno 28 bezpečnostních výklenků, z toho 15 je umístěno na levé straně a 13 na pravé straně od trati. Ventilace je přirozená. Tunel má únikovou cestu, která je situována podél ostění, kde je umístěno nouzové osvětlení. Provoz je zajištěn pomocí bezstykové koleje na zapuštěném šterkovém loži. Rychlost průjezdu vlaku tunelem je navržena na 80 km.h⁻¹.

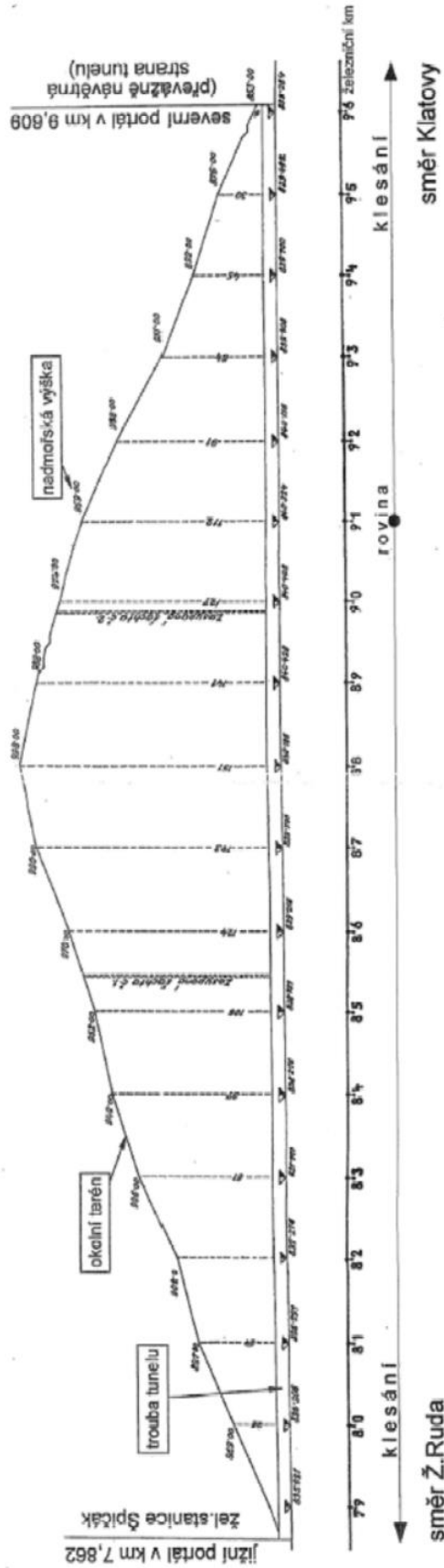
Tab. 3: Podélné sklony tunelu Špičák

Umístění [km]	Sklon [‰]
7,860 – 7,978	+ 5,40
7,978 – 8,841	+ 4,89
8,841 – 9,053	+ 1,50
9,053 – 9,453	-2,14
9,453 – 9,609	-2,60

Tunel Špičák je po své délce rozdělen na několik částí, které se od sebe liší plochou průřezu. Jeden z průřezů je na obr. 8. Tyto plochy a rozměry v osách tunelu jsou uvedeny v tab. 4. Jako průřez, který by nejvíce vystihoval nepříznivé podmínky při evakuaci, byl zvolen průřez B. Tento průřez má nejmenší výšku a v tunelu se vyskytuje v největší délce (viz obr. 9). Jeho rozměry v osách jsou pak následující: šířka = 6,97 m a výška: 5,33 m.



Obr. 8: Příčný řez tunelem Špičák, km 8,159⁴⁸, pas 20b obezděný [Ing. Hana Ponczová, SŽDC].



Obr. 9: Podélný řez tunelem Špičák [Ing. Hana Ponczová, SŽDC].

Tab. 4: Průřezy tunelu Špičák

Označení	Šířka [m]	Výška [m]	Plocha [m ²]	Délka úseku [m]
Průřez A	7,4	6,17	45,63	118
Průřez B	6,97	5,33	36,74	863
Průřez C	7,88	5,76	45,35	-
Průřez D	7,81	5,97	46,59	-

3.2 Model tunelu skutečných rozměrů

V modelech skutečných rozměrů vybraného tunelu Špičák byly posuzovány dva požární scénáře, které simulují možné zastavení vlakové soupravy v tunelu a v důsledku vývinu kouře zamezení evakuace osob. První scénář simuluje zastavení hořícího vagonu v polovině délky tunelu. Ve druhém scénáři se hořící vagon nachází ve čtvrtině tunelu.

Model tunelu Špičák je 1747 m dlouhý, průřez tunelovou troubou odpovídající průřezu B je 6,97 m široký a 5,33 m vysoký. Obloukový tvar tunelu je v modelu nahrazen schodovitě odstupňovaným průřezem vytvořený metodou „sawtooth“, viz obr. 10. Tvar jednotlivých stupňů je vytvořen tak, aby co nejlépe odpovídal buňkám výpočetní sítě a zároveň co nejlépe kopíroval původní tvar tunelu.

Výpočetní oblast se skládá z 5 sítí. Velikost buněk výpočetních sítí je zvolena podle [18], tj. stanovením bezrozměrného parametru D^*/x . Podle uvedených doporučení je zvolena hodnota parametru rovna 10. Nominální velikost buňky je tedy 0,355 m. Rozměry buněk v osách (x, y, z) jsou (0,345 m, 0,348 m a 0,355 m). V oblasti zdroje požáru (okenních otvorů vagonu) je síť zjemněna na poloviční velikost (x, y, z) = (0,182 m, 0,174 m, 0,178 m), viz obr. 11. Celkový počet buněk je 1 530 600.

V tunelu není nucené větrání a výškový rozdíl není tak velký, aby měl přirozený tah větší vliv na stratifikaci kouře. V numerickém modelu je tedy počáteční rychlost proudění vzduchu uvažována nulová. Teplota vzduchu před iniciací požáru je stanovena jako 10°C (u požárního scénáře 1) a 20°C (u požárního scénáře 2).

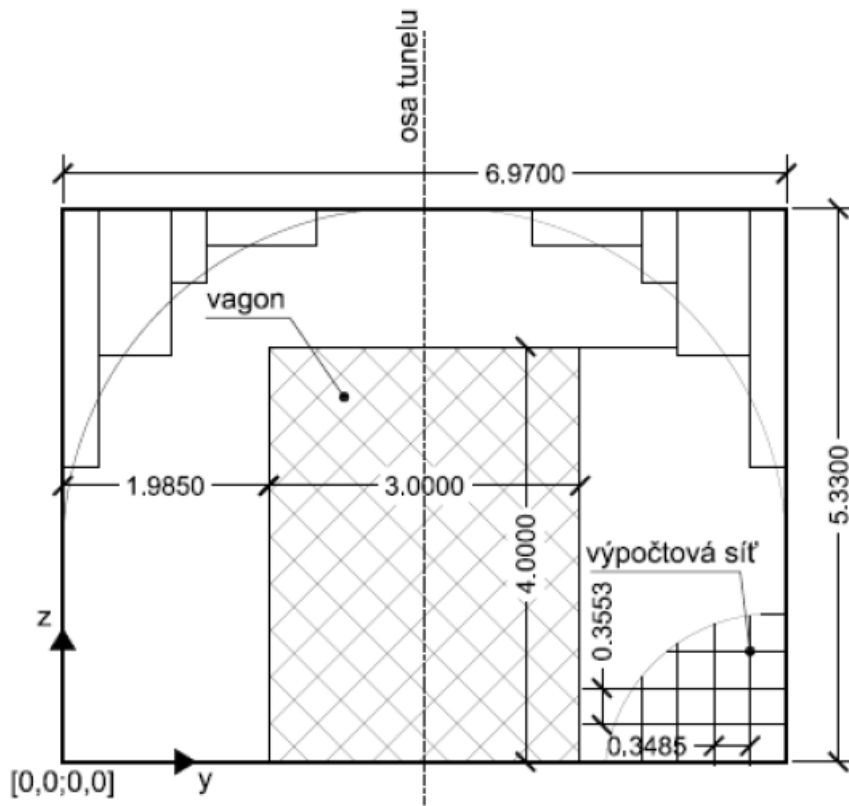
V modelu je simulován scénář hoření vagonu osobního vlaku. Tepelný tok se uvolňuje ze čtyř oken vagonu, plochy o velikosti 1,44 m². Celková plocha hoření tedy činí 5,76 m². Požár (plochy, které uvolňují teplo) je umístěn ve třetím vagonu z celkového počtu pěti vagonů. Plochy okenních otvorů jsou ve výškové úrovni 2,0 m nad podlahou. Hoření je simulováno pomocí frakčního zlomku polyuretanu, který je definován poměrným zastoupením uhlíku, vodíku, dusíku, kyslíku a pevných částí spalování – sazí ('C_6.3 H_7.1 O_2.1 N_1.0 SOOT_YIELD_0.10'). Tento materiál se vývinem kouře nejvíce podobá reálnému požáru v osobním vagonu. Většina vybavení vagonu sestává právě z tohoto materiálu.

Pro průběh rychlosti uvolňování tepla je využita „t-kvadratická“ křivka pro ultra-rychlý požár ($\alpha = 75$ s). Vzhledem k průběhu požáru v tunelových charakteristikách, tj. uzavřený prostor a zpětné sálání od teplého kouře, tato křivka nejvíce vystihuje realitu. Maximální dosažený výkon je zvolen 20 MW.

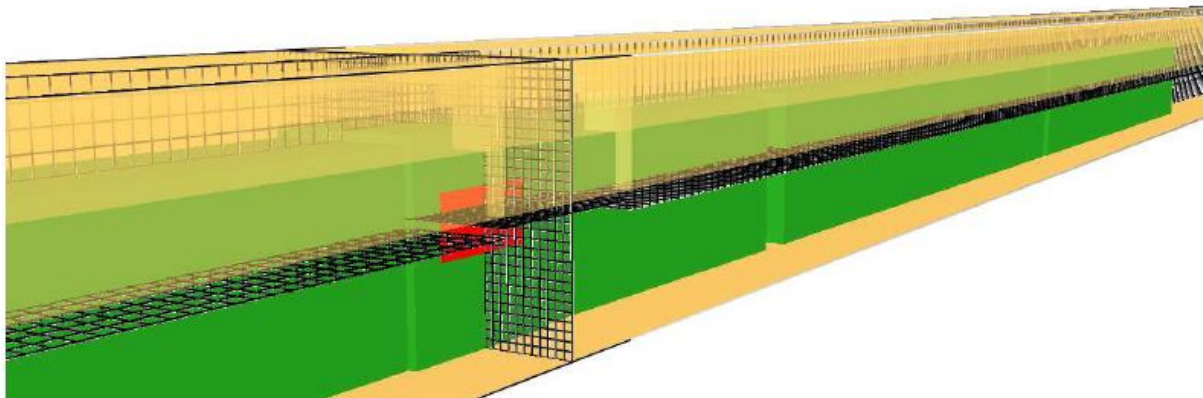
Materiál ostění je v modelu tvořen vrstvou betonu o tloušťce 0,4 m. Objemová hmotnost materiálu je uvažována 2200 kgm⁻³, tepelná vodivost 1,3 Wm⁻¹K⁻¹ a měrná tepelná kapacita 1,02 kJkg⁻¹K⁻¹.

V numerickém modelu jsou umístěny snímače výšky kouřové vrstvy ('SMOKE LAYER HEIGHT') a snímače pro měření teploty plynu kouřové vrstvy a dolní vrstvy vzduchu pod zakouřenou hladinou ('UPPER TEMPERATURE' a 'LOWER TEMPERATURE'). Tyto senzory jsou rozmístěny po vzdálenosti

50 m v ose tunelu a ve vzdálenosti 0,6 m od ostění, což je vzdálenost, kde se pohybují osoby při evakuaci. Měření těchto hodnot probíhá na svislici od počátečního bodu po koncový. Naměřené teploty jsou pak průměrné hodnoty v jednotlivých vrstvách.



Obr. 10: Schéma modelu tunelu Špičák

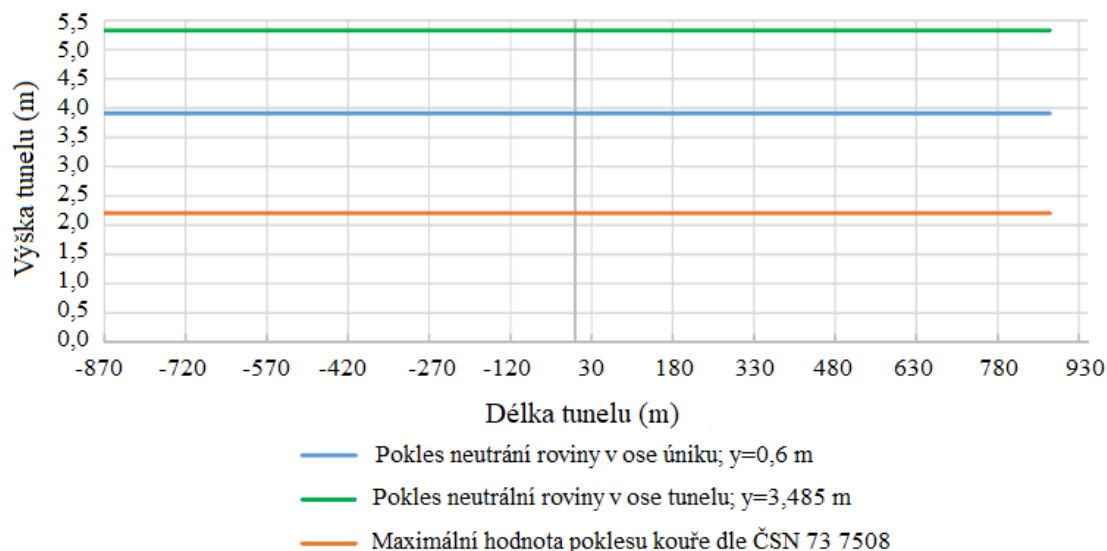


Obr. 11: Zobrazení výpočetních sítí

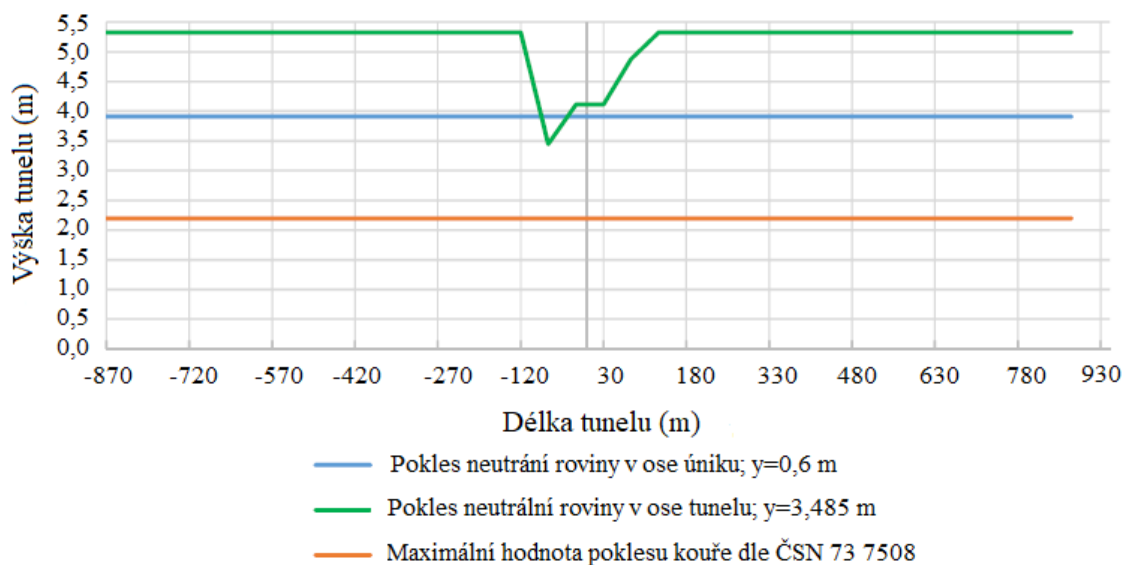
3.3 Výsledky simulace

Během prvního požárního scénáře (zdroj hoření umístěn v ose tunelu) se kouřová vrstva po iniciaci požáru rychle šířila pod povrchem horního ostění. Zde se horké plyny ochlazovaly a postupně klesaly ke spodní úrovni tunelu. Na obr. 12 – 16 jsou uvedeny grafy poklesu neutrální roviny kouřové vrstvy

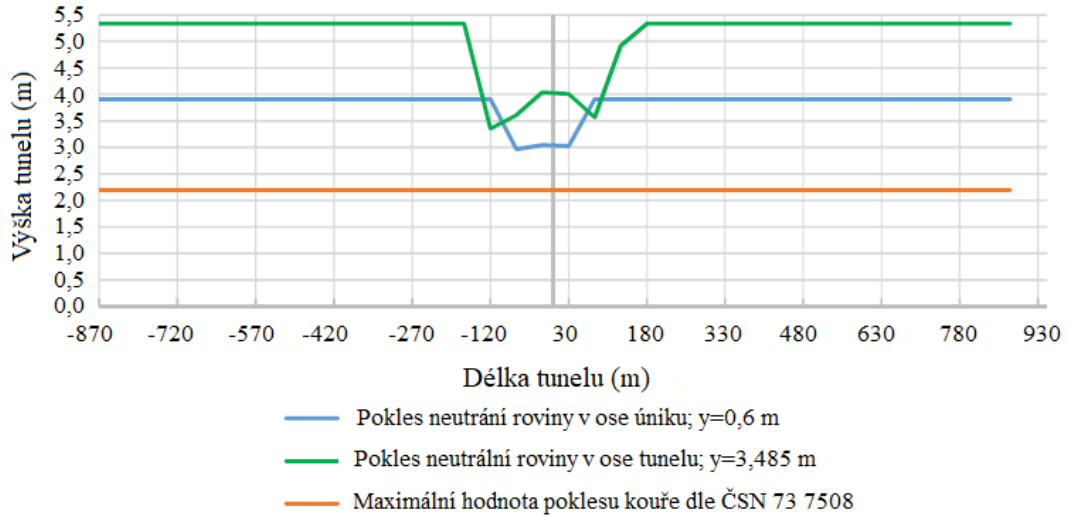
v časech 0, 2, 3, 5 a 10 min. V grafech lze vidět tři křivky – polohu neutrální roviny kouřové vrstvy vypočítané pomocí numerického modelu v ose tunelu a v ose únikového chodníku, a křivku udávající hodnotu maximálního poklesu kouřové vrstvy podle ČSN 73 7508. Na obr. 15 je vidět, že v 5 min výška kouřové vrstvy klesá pod úroveň 2,2 m, která je podle ČSN 73 7508 považována za limitní pro bezpečnou evakuaci.



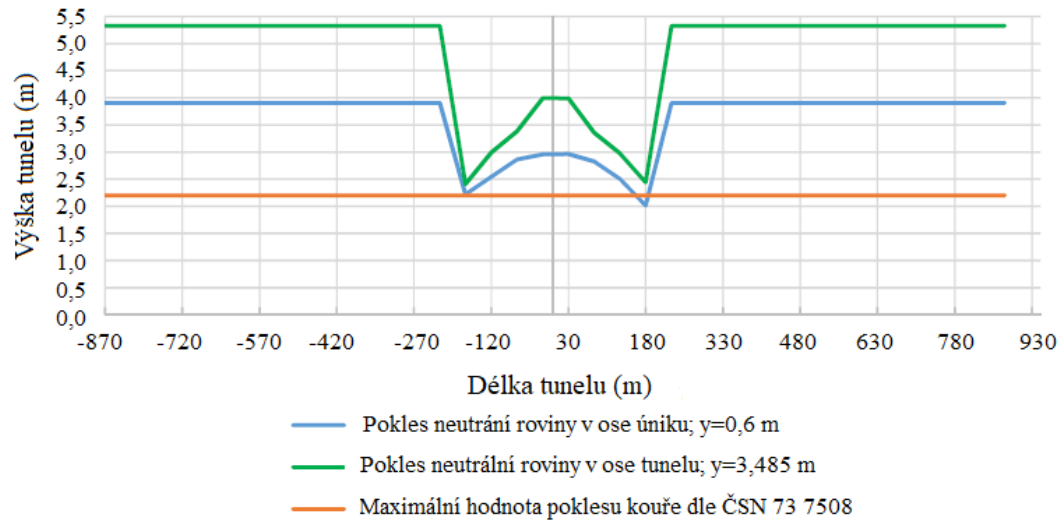
Obr. 12: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 0 min



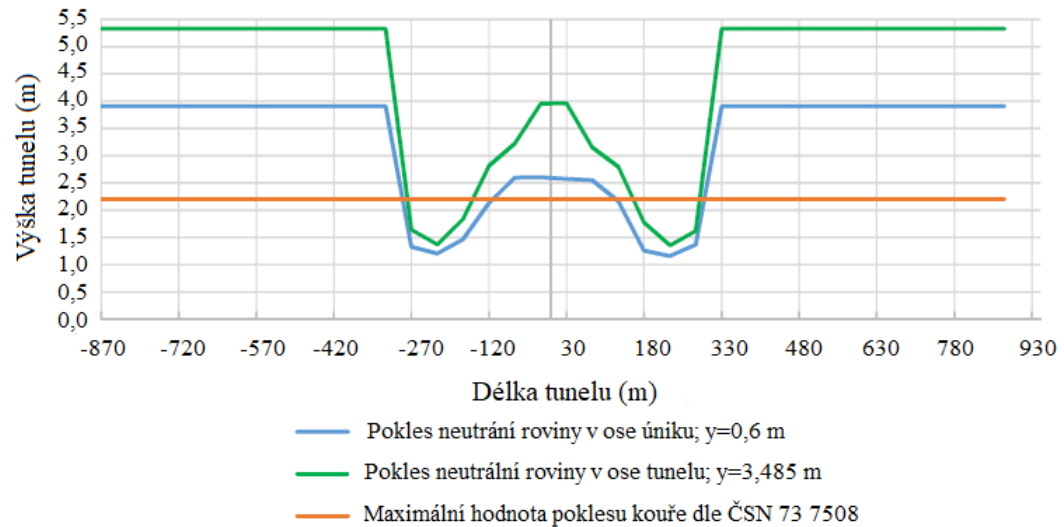
Obr. 13: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 2 min



Obr. 14: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 3 min



Obr. 15: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min



Obr. 16: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 10 min

Na obr. 17 – 19 lze pozorovat šíření kouře, jeho pokles ke spodní úrovni tunelu a snižující se rychlost postupu v časech 2, 5 a 10 min.



Obr. 17: Šíření kouře při hoření vagonu osobního vlaku v čase 2 min

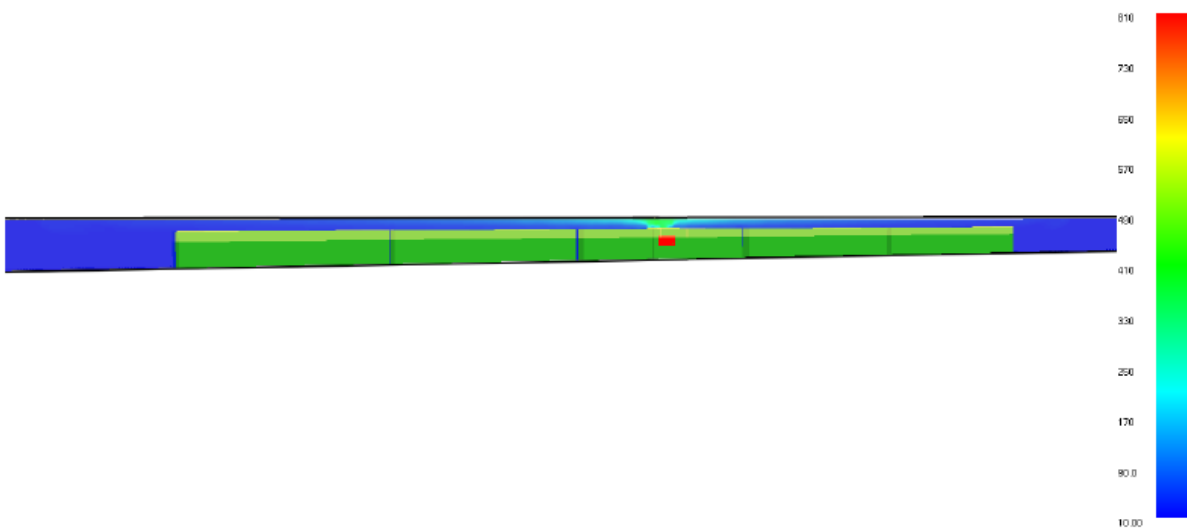


Obr. 18: Šíření kouře při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min

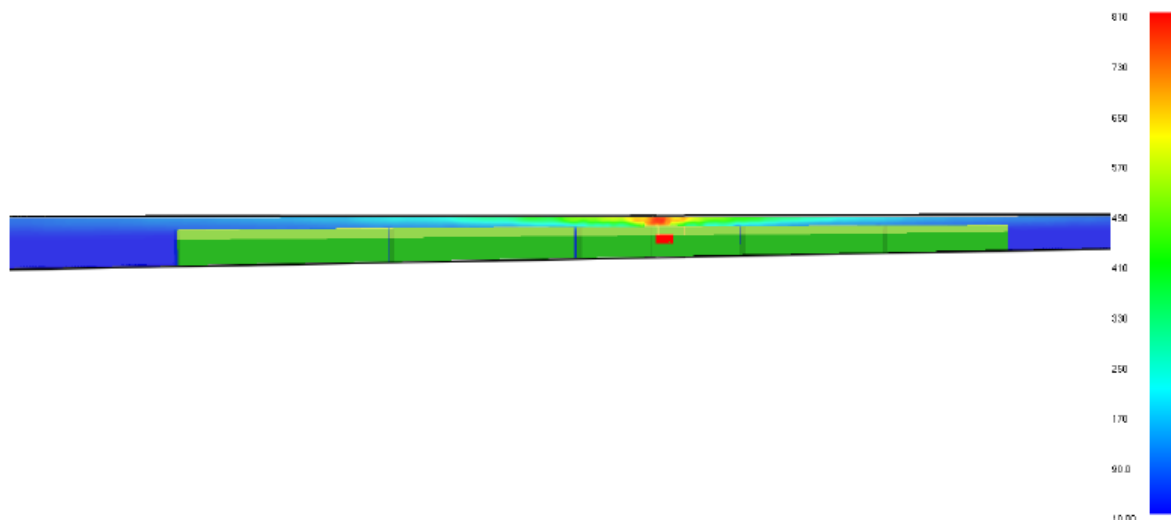


Obr. 19: Šíření kouře při hoření vagonu osobního vlaku v čase 10 min

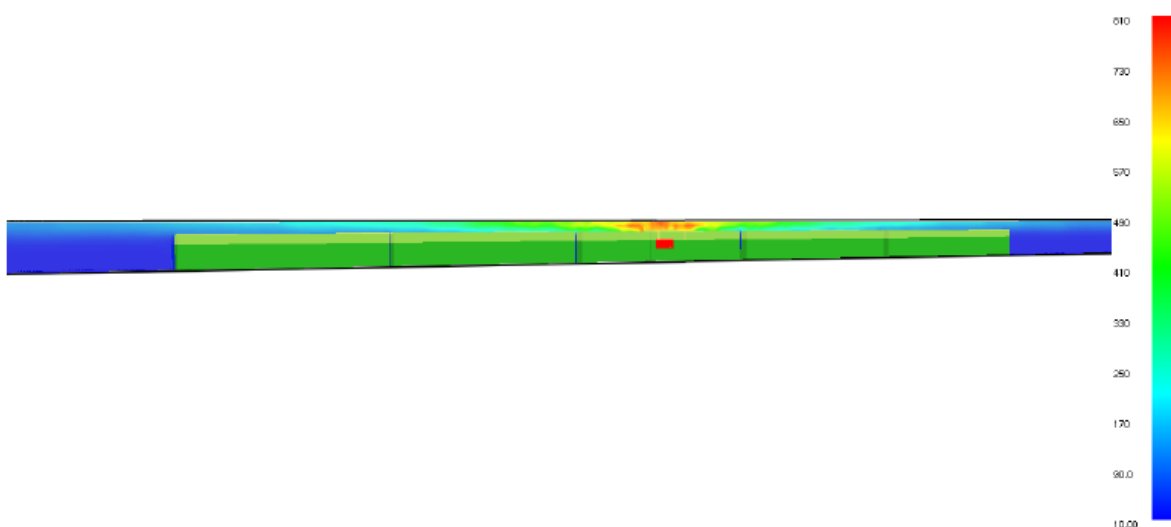
Teplota plynu vypočítaná v ose tunelu je zobrazena na obr. 20 – 22. Na obr. 23 – 25 je pak zobrazena teplota plynu v úrovni únikového chodníku, tj. ve vzdálenosti 0,6 m od ostění.



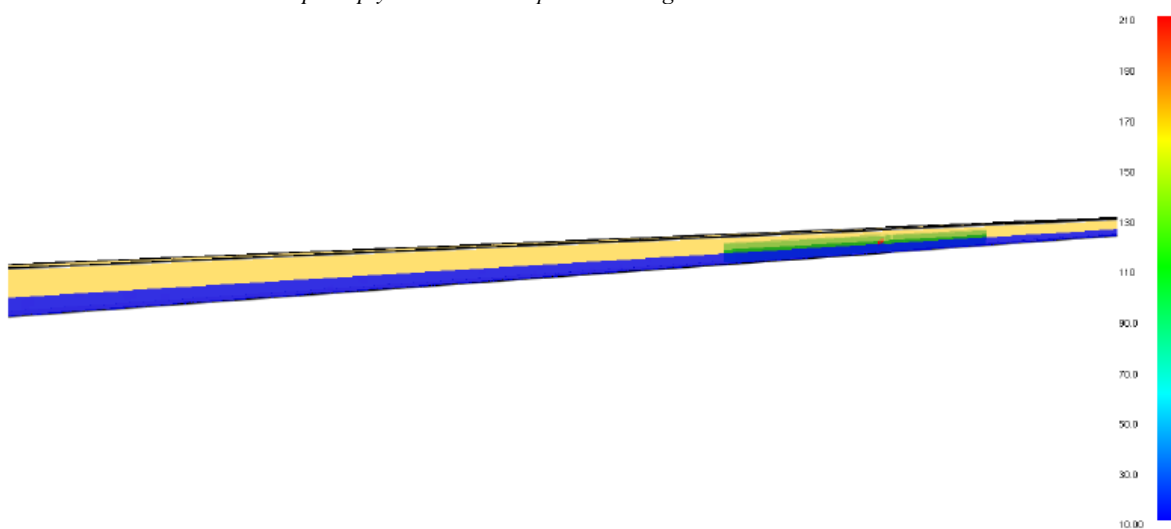
Obr. 20: Teplota plynu v ose tunelu při hoření vagonu osobního vlaku v čase 2 min



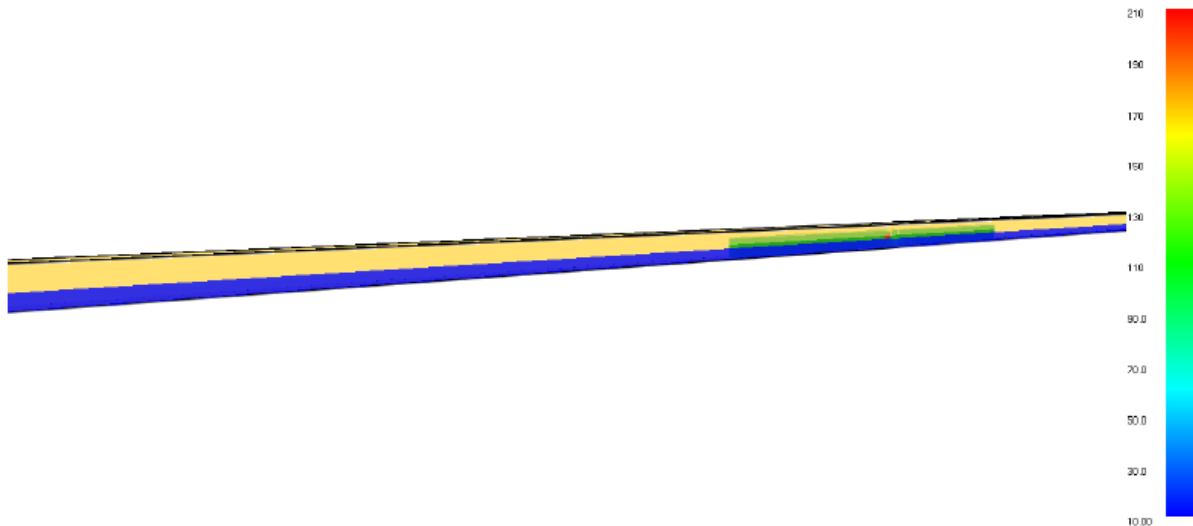
Obr. 21: Teplota plynu v ose tunelu při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min



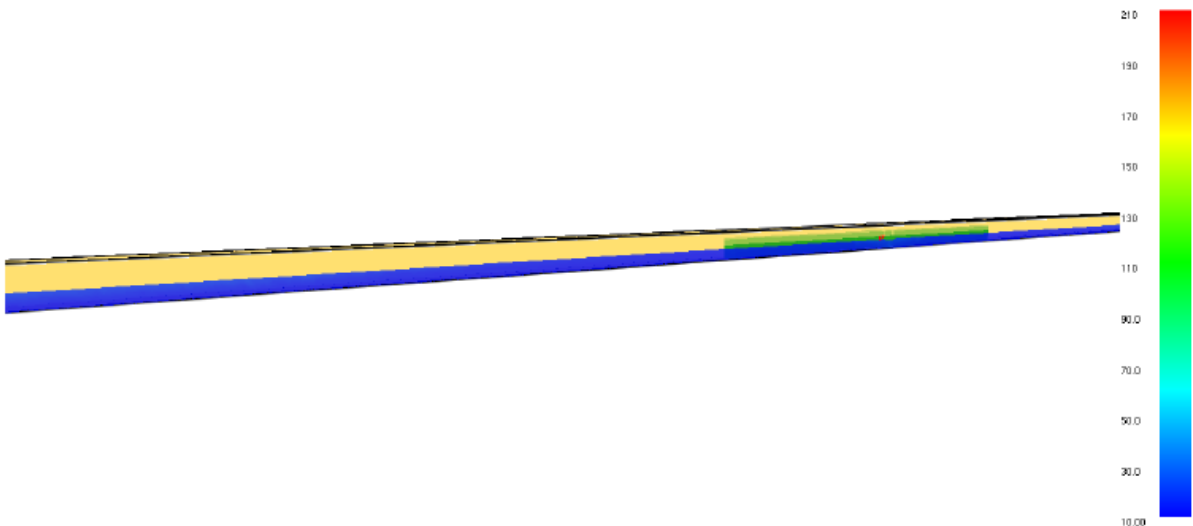
Obr. 22: Teplota plynu v ose tunelu při hoření vagonu osobního vlaku v čase 10 min



Obr. 23: Teplota plynu v únikovém chodníku při hoření vagonu osobního vlaku v čase 2 min

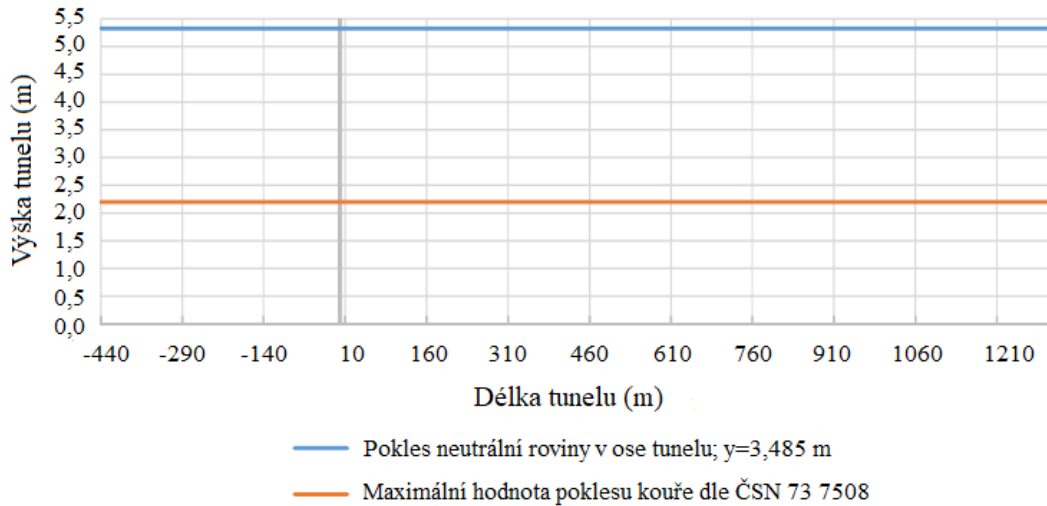


Obr. 24: Teplota plynu v únikovém chodníku při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min

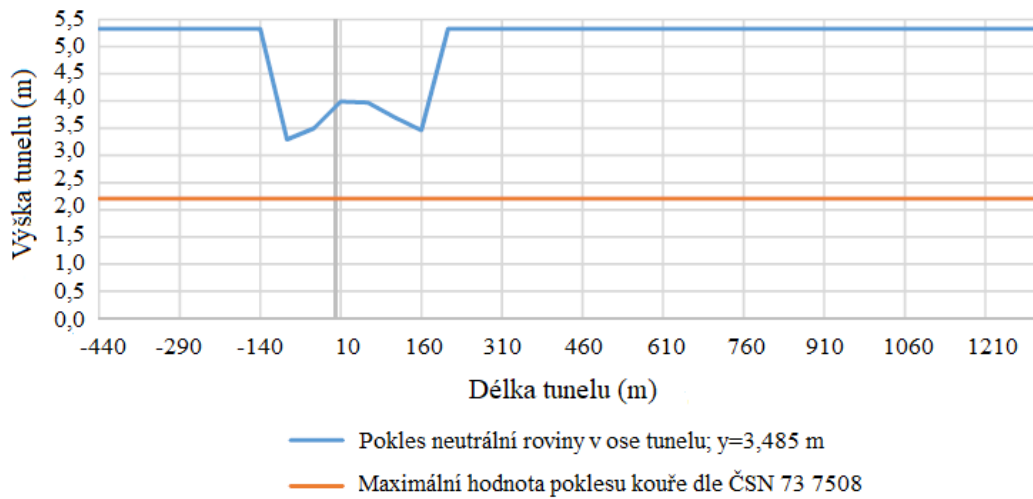


Obr. 25: Teplota plynu v únikovém chodníku při hoření vagonu osobního vlaku v čase 10 min

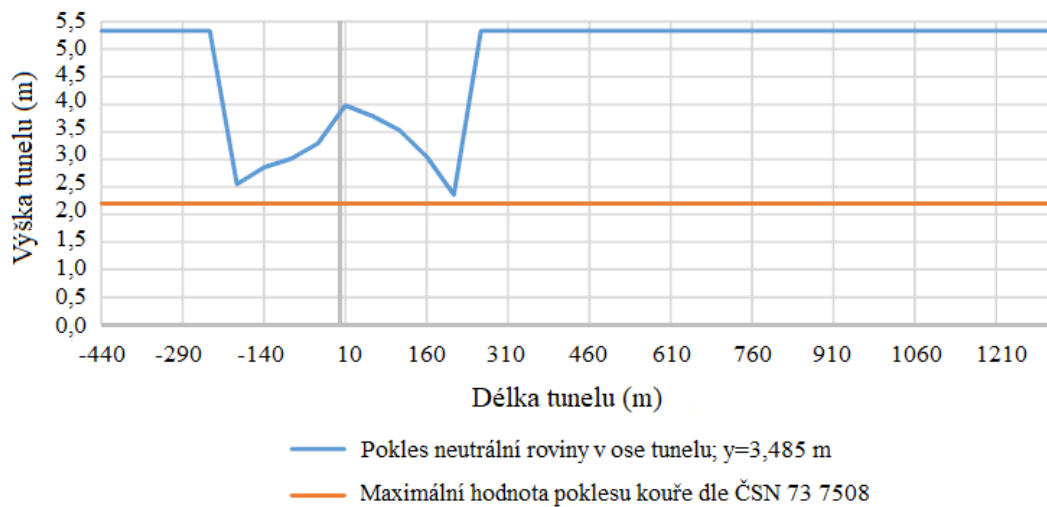
Během druhého požárního scénáře (zdroj hoření umístěn v jedné čtvrtině délky tunelu, tj. 435 m od portálu) se kouřová vrstva po iniciaci požáru rychle šířila podobným způsobem jako při prvním. Díky ochlazení horkých plynů o horní ostění dochází k poklesu úrovně zakouřené vrstvy plynů. V 5 min požáru je úroveň neutrální roviny v ose tunelu ve vzdálenosti 210 m od zdroje požáru a ve výšce 2,36 m od spodního okraje tunelu. Oproti výsledkům z prvního požárního scénáře je v tomto případě kouřová vrstva o 0,1 m výše nad povrchem. Předpokládá-li se, že hladina neutrální roviny kouře v ose úniku klesá podobně jako v předchozím případě, dosahuje pak výšky 2,1 m. Pokles neutrální roviny v časech 0, 3, 5, 10, 15 a 20 min jsou uvedeny na obr. 26 - 31. V grafech lze porovnat dvě křivky – polohu neutrální roviny kouřové vrstvy vypočítané pomocí numerického modelu v ose tunelu a křivku udávající hodnotu maximálního poklesu kouřové vrstvy podle ČSN 73 7508.



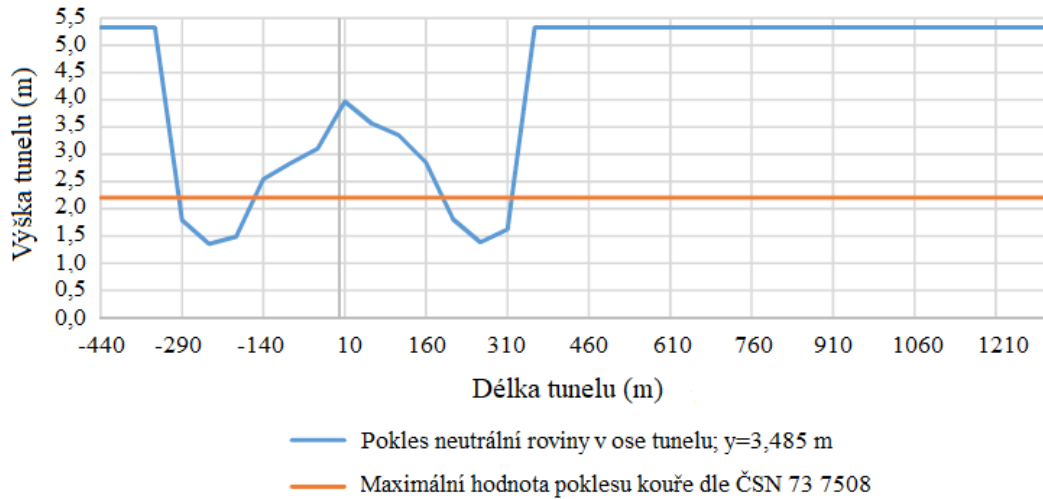
Obr. 26: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 0 min



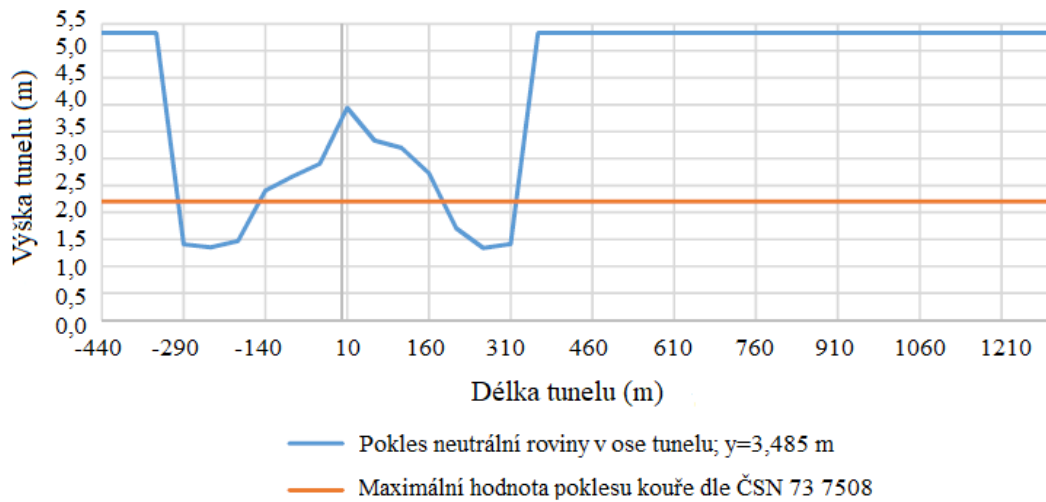
Obr. 27: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 3 min



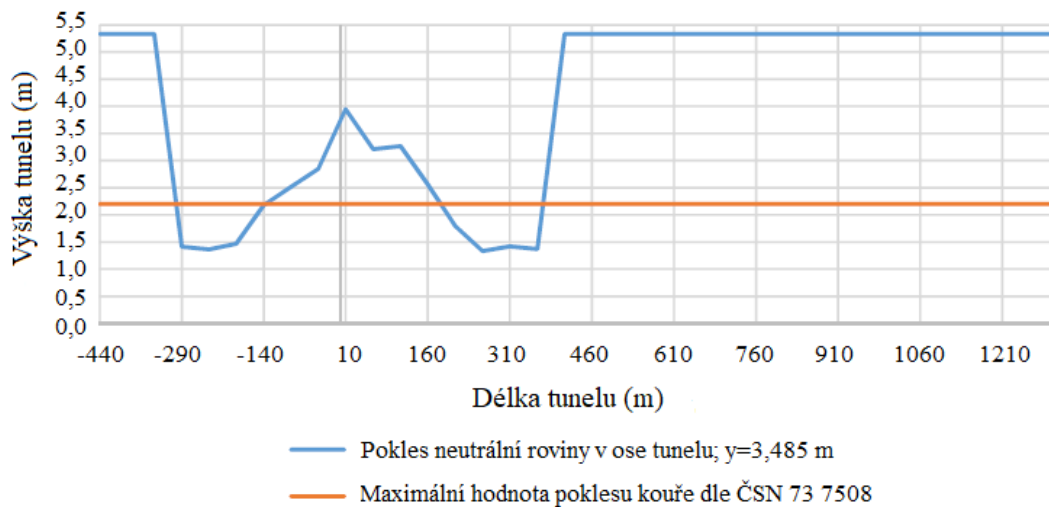
Obr. 28: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min



Obr. 29: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 10 min



Obr. 30: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 15 min



Obr. 31: Pokles neutrální roviny při hoření vagonu osobního vlaku v čase 20 min

Na obr. 32 – 34 lze pozorovat šíření kouře, jeho pokles ke spodní úrovni tunelu a snižující se rychlost postupu v časech 2, 5 a 10 min. Horký plyn kouřové vrstvy se nejprve drží pod stropem, po ochlazení o betonové ostění dochází k rozpadu vrstvy a poklesu ke spodní úrovni tunelu. Od 10 min je celý tunelový průřez zakouřen, rychlost postupu k portálům se však zpomaluje. V čase 20 min kouřová vrstva dosáhne vzdálenosti 340 m od zdroje hoření.



Obr. 32: Šíření kouře při hoření vagonu osobního vlaku v čase 2 min

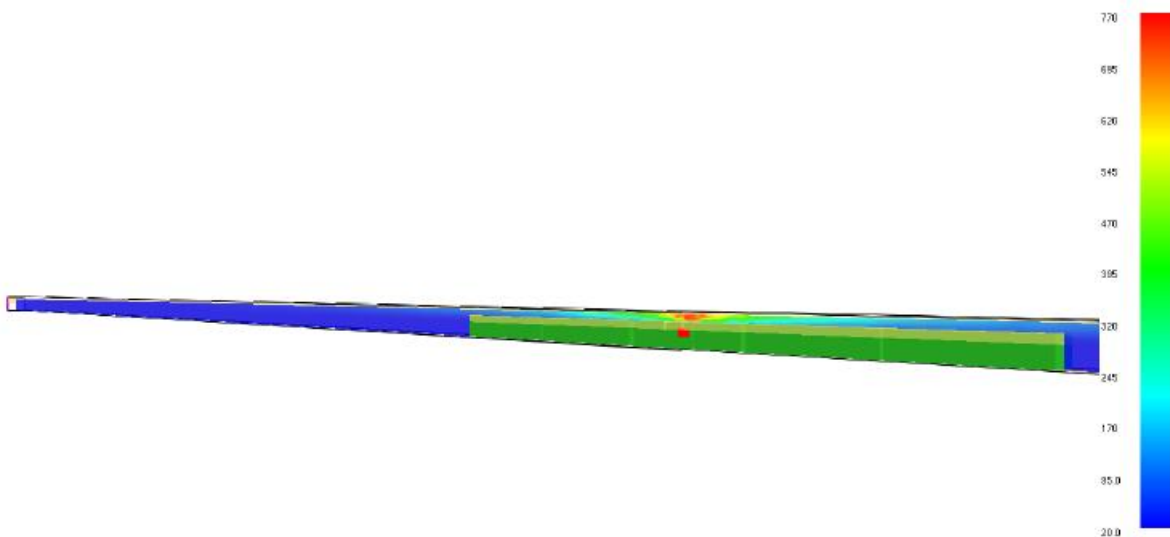


Obr. 33: Šíření kouře při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min

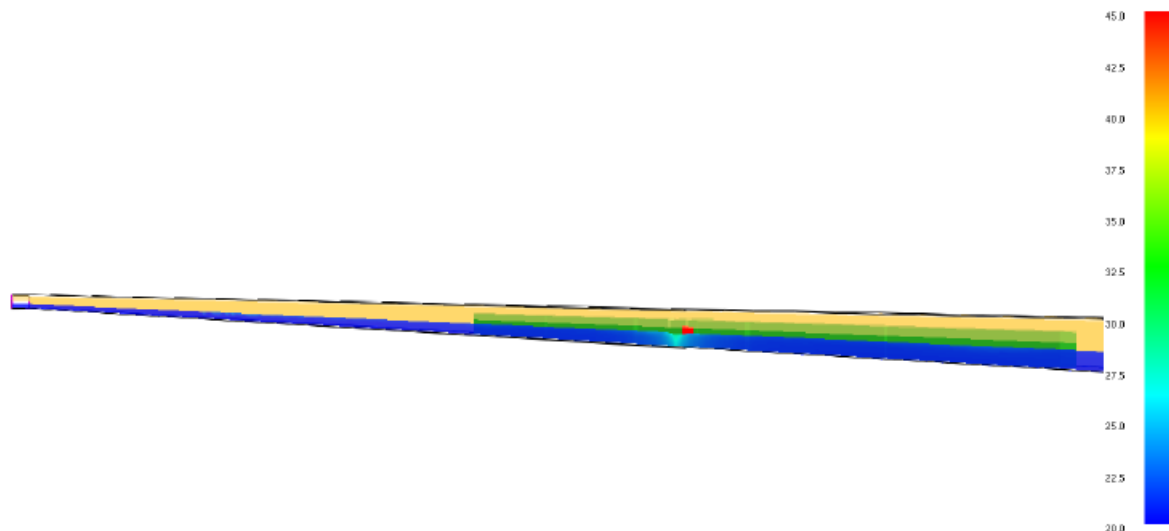


Obr. 34: Šíření kouře při hoření vagonu osobního vlaku v čase 10 min

Teplota plynu vypočítaná v ose tunelu a u ostění v prostoru únikového chodníku je zobrazena na obr. 35 – 36.

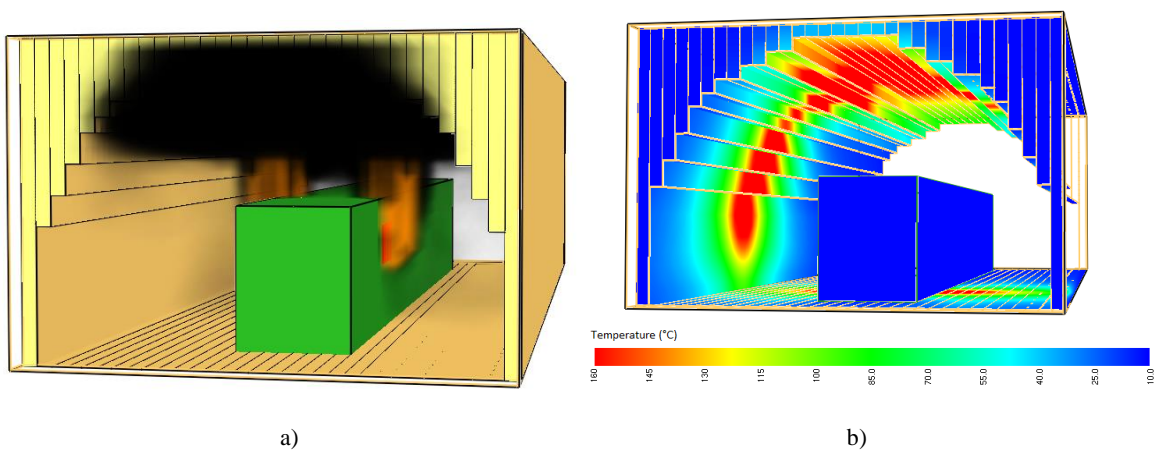


Obr. 35: Teplota plynu v ose tunelu při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min



Obr. 36: Teplota plynu v únikovém chodniku při hoření vagonu osobního vlaku v čase 5 min

Detail hoření vagonu osobního vlaku s vizualizací rozvoje kouře v čase 600 s je na obr. 37 a). Obr. 37 b) ilustruje teplotu tunelového ostění ve shodném čase.



a)

b)

Obr. 37: Model hoření vagonu osobního vlaku v tunelu – a) šíření kouře v čase 600 s; b) teplota ostění v čase 600 s

4 Hodnoty vybraných vstupních dat

4.1 Rychlost uvolňování tepla

Ke stanovení intenzity požáru slouží rychlost uvolňování tepla (HRR) vztažená na jednotku plochy (HRRPUA). Maximální hodnota rychlosti uvolňování tepla a její průběh v čase by měl vycházet z analýzy možných požárních scénářů. Jedním z možných postupů, jak určit hodnotu rychlosti uvolňování tepla HRR je požární experiment. Tento způsob je však neekonomický. Je proto vhodnější využít data z již provedených zkoušek, či křivek, které byly na jejich základě sestaveny. V literatuře je dostupné velké množství křivek průběhu HRR. V případech, kdy nejsou experimentální data vhodné křivky HRR dostupná, lze podle [26] pro výpočet HRR použít modelování a simulaci pomocí metody CFD (z ang. Computational Fluid Dynamics). V tomto případě je však nutné podrobně znát hořlavý materiál a pečlivě popsat proces pyrolýzy. Nejjednodušší předpověď rychlosti uvolňování tepla je založena na idealizované křivce zahrnující fázi rozhořívání, fázi ustáleného hoření a fázi chladnutí. Takto zjednodušený průběh může být použit jako první odhad v případě výpočtu účinku požáru. V [9] je uveden postup, jak zjednodušeně stanovit křivku HRR. Tento postup byl odvozen tak, aby výsledné křivky odpovídaly limitním hodnotám naměřených při požárních zkouškách. Dle [9] je možné zjednodušeně HRR uvažovat jako t-kvadratický požár s časem pro dosažení maximální rychlosti uvolňování tepla pro velmi rychlé požáry. Podle [9] je v mnoha případech požárů vlakových vagonů, vagonů metra a tramvaje tento čas roven 15 min.

Podle [12] může rychlost proudění v tunelu výrazně ovlivnit intenzitu požáru (HRR). Konkávní tvar stropu tunelové trouby podle [12] zvyšuje intenzitu hoření (HRR) o 10%, což může být způsobeno „čočkovým“ efektem geometrie stropu, jež "zaostřuje" zpětně vyzařované teplo do místa vzniku požáru ve středu tunelu. Dále to může být způsobeno tím, že se více kouře soustřeďuje ve středu tunelu (nad ohniskem požáru) než u stěny tunelu.

4.2 Experimentální hodnoty HRR

Na základě výše popsaných možných příčin požáru jsou vybrány následující zdroje hoření: vagon osobního vlaku, náklad v podobě osobního automobilu/-ů, nákladního automobilu, atd. Hoření jiného přepravovaného zboží či materiálu není uvažováno z důvodu převážení v uzavřených kontejnerech.

Vstupní data potřebná pro numerický výpočet v podobě rychlosti uvolňování tepla pocházejí z velko- rozměrových požárních zkoušek ze zahraniční literatury. Při využívání dat z literatury je podstatné mít na paměti, že mnohé experimenty nebyly provedeny uvnitř tunelu. Vlivem odlišných okrajových podmínek tak mohou být maximální hodnoty HRR nižší.

4.2.1 Vagon osobního vlaku

V rámci projektu EUREKA bylo provedeno několik velko- rozměrových zkoušek vagonů různých typů vlaků. V tab. 5 je uveden přehled několika zkoušek s celkovým množstvím vydané energie, maximální

hodnoty rychlosti uvolňování tepla a času potřebného pro dosažení maximální hodnoty HRR. Podrobnosti ke zkouškám je možné dohledat v [27 -29]

Tab. 5: Výsledky zkoušek projektu EUREKA

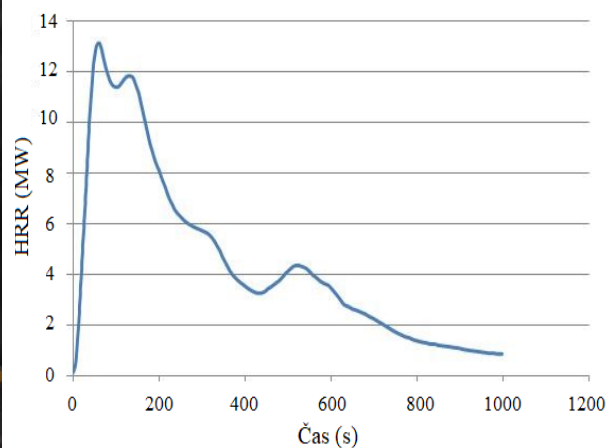
Druh vozu, číslo zkoušky, $u =$ rychlost proudění (ms^{-1})	Množství vydané energie (GJ)	Maximální hodnoty HRR (MW)	Čas k dosažení maximální hodnoty HRR (min)
Spojené vozy, dva a půl vozu, EUREKA 499, test 11, $u= 6-8/3-4 ms^{-1}$	55	43	53
Vůz německého vlaku Intercity-Express (ICE), EUREKA 499, test 12, $u= 0.5 ms^{-1}$	63	19	80
Vůz německého vlaku Intercity (IC), EUREKA 499, test 13, $u= 0.5 ms^{-1}$	77	13	25
Meziměstský vlak v Carletonu	50	32	18

Výsledky v tab. 5 ukazují, že existuje mnoho parametrů, které mohou ovlivnit intenzitu a rozvoj požáru. Parametry zahrnují např. materiál vozu, materiál výplní oken, geometrii otvorů vozu, množství a druh hořlavých látek ve voze, jejich počáteční obsah vlhkosti, rychlost proudění vzduchu v tunelu a geometrii tunelové trouby. Všechny tyto parametry by měly být při vyhledávání vhodného požárního scénáře brány v úvahu.

Vagon osobního příměstského vlaku byl podroben požárnímu testu v letech 2000 – 2003 v australské laboratoři CSIRO [30]. Vagon o délce 23 m byl plně vybaven sedadly a obložením. Požár byl iniciován 1 kg zmačkaných novin umístěných pod sedadlem v zadním rohu vozu. Uvnitř vozu i v rovině otvorů (oken a dveří) byly instalovány termočlánky k měření teplot plynu a radiometry k měření tepelného toku. Experiment se konal na volném prostranství, viz obr. 38. Během zkoušky byly naměřeny teploty dosahující 1000°C a tepelný tok 20 kWm^{-2} . Ve vzdálenosti 6 m od vozidla byl maximální zaznamenaný tepelný tok 5 – 6 kWm^{-2} . Maximální rychlost uvolňování tepla (HRR) byla naměřena 8 – 13 MW.



a)



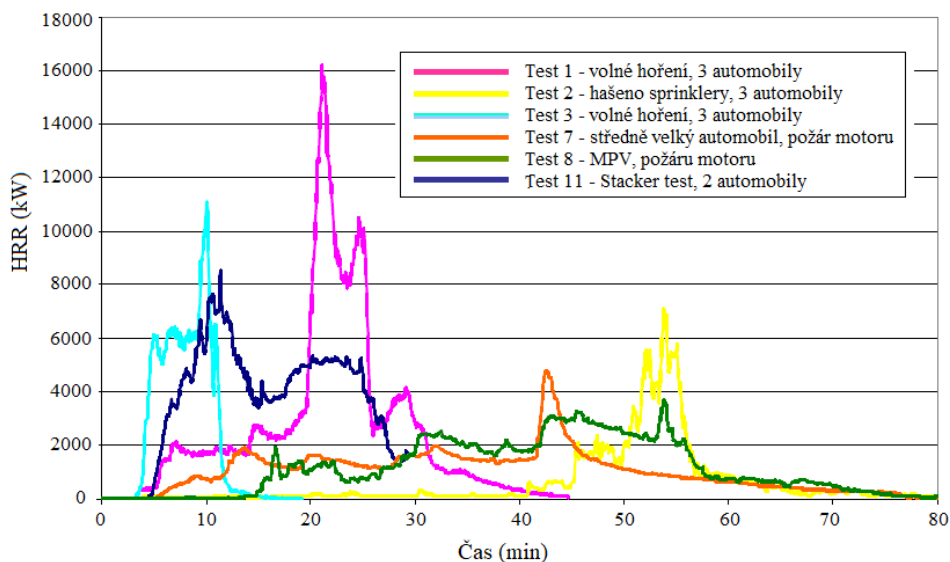
b)

Obr. 38: a) Velkorozměrová zkouška osobního vagonu; b) HRR naměřené během zkoušky [30].

Naměřené hodnoty HRR potvrzují i výsledky z experimentu na Novém Zélandu [31] provedené v rámci projektu EUREKA. Při tomto testu byla zaznamenána maximální hodnota HRR 13,095 MW. Z požárních zkoušek provedených v rámci projektu EUREKA hodnoty maximální rychlosti uvolňování tepla dosahují 15 – 20 MW. Pro účely modelování je volena nejvyšší hodnota, tzn. 20 MW.

4.2.2 Osobní automobil

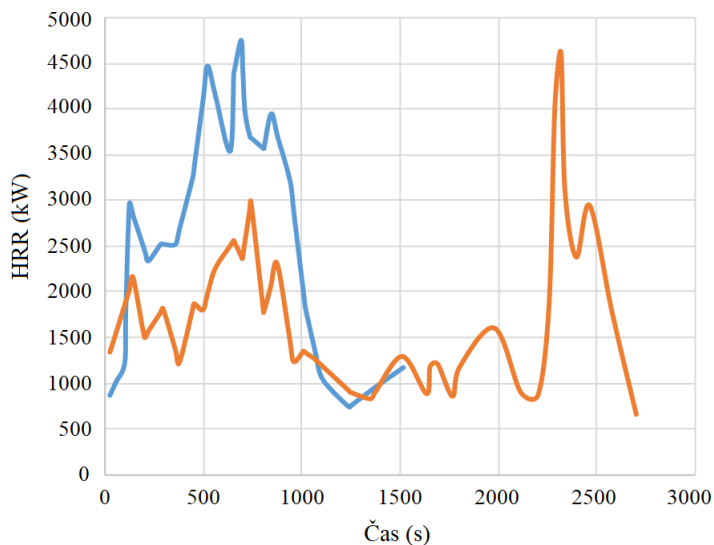
HRR hoření osobního automobilu lze najít v různých zdrojích. Např. [32 - 39] uvádí výsledky z požárních zkoušek automobilů v otevřeném prostoru, [40 - 43] výsledky ze zkoušek v částečně uzavřených garážích či požárních komorách. Na obr. 39 je záznam HRR z některých požárních testů osobních automobilů. Hodnoty HRR se u většiny požárních zkoušek jednoho automobilu pohybují pod 8 MW. V případě požáru více automobilů dosahuje maximální hodnoty HRR 16 MW.



Obr. 39: HRR požárních zkoušek osobních automobilů [31].

V [44] je možné najít výsledky požární zkoušky osobního automobilu Opel Kadet v tunelu. Obr. 40 uvádí výsledky HRR ze dvou zkoušek – s nulovou hodnotou proudění (v grafu modrá křivka) a s rychlostí proudění 6 ms^{-1} (oranžová křivka).

Pro požáry v silničních tunelech existují vstupní hodnoty návrhových požárních scénářů v závislosti na typu vozidla, viz [45], které byly odvozeny na základě experimentů. Tyto hodnoty lze převzít i pro požáry v železničních tunelech.

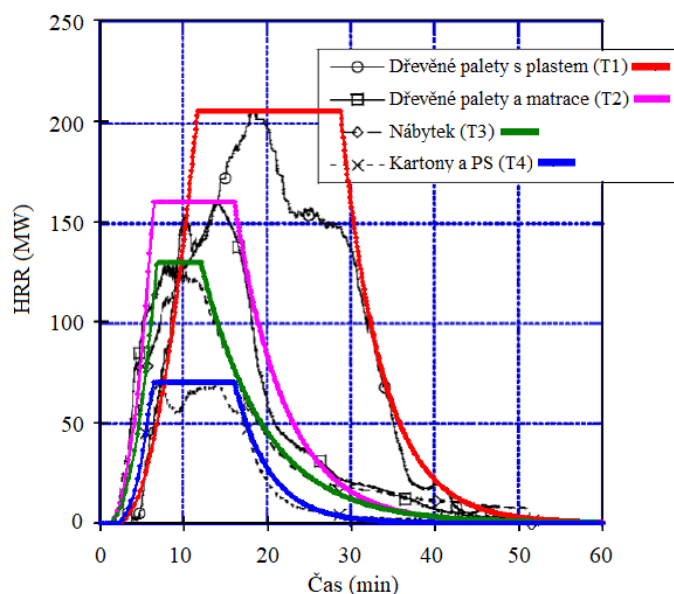


Obr. 40: HRR požárních zkoušek osobních automobilů v tunelu.

4.2.3 Nákladní automobil

Požární zkoušky provedené v tunelu Runehamar [46] ukázaly, že při požáru nákladního automobilu včetně převáženého zboží může hodnota HRR dosáhnout 67 MW – 200 MW. Výsledky některých zkoušek lze vidět na obr. 41 včetně křivek označujících zjednodušený popis dle [26]. V tab. 6 je uveden přehled několika zkoušek s celkovým množstvím vydané energie, maximální hodnoty rychlosti uvolňování tepla a času potřebného pro dosažení maximální hodnoty HRR. Výsledky pocházejí ze zkoušek v tunelu Runehamar [46] a zkoušek v rámci projektu EUREKA [47].

Další data HRR jsou dostupná např. v [49, 50]. Studie [50] obsahuje výsledky požárních zkoušek v tunelech (projektu PWRI, EUREKA 499 projekt FIRETUN, zkoušek v tunelu Second Benelux, The Memorial tunel, Runehamar tunel) i výsledky zkoušek vozidel mimo tunely.



Obr. 41: HRR požárních zkoušek nákladních vozů v tunelu Runehamar [26].

Tab. 6: Výsledky zkoušek nákladních vozů [48]

Druh vozu, číslo zkoušky, u = rychlost proudění (ms^{-1})	Množství vydané energie (GJ)	Maximální hodnoty HRR (MW)	Plocha průřezu tunelu (m^2)
12 m dlouhý škoní autobus Volvo se 40 sedadly, EUREKA 499, $u=0,3 ms^{-1}$	41	29	25 - 35
Přívěs s 10.9 tuny dřeva a plastovými paletami, zkoušky v tunelu Runehamar, test 1, $u=3 ms^{-1}$	247	202	32 - 47
Přívěs s 6.8 tuny dřeva a PUR matracemi, zkoušky v tunelu Runehamar, test 2, $u=3 ms^{-1}$	135	157	32 - 47
Leyland DAF 310ATi - nákladní vůz s 2 tuny nábytku, EUREKA, $u=3-6 ms^{-1}$	87	128	25 - 35
Přívěs s 8.5 tuny nábytku a pneumatik, zkoušky v tunelu Runehamar, test 3, $u=3 ms^{-1}$	179	119	32 - 47
Přívěs s 3.1 tuny papírových kartonů, zkoušky v tunelu Runehamar, test 4, $u=3 ms^{-1}$	62	67	32 - 47
Přívěs s 72 dřevěnými paletami, zkoušky v tunelu Benelux, test 14, $u=1-2 ms^{-1}$	19	26	50
Přívěs s 36 dřevěnými paletami, zkoušky v tunelu Benelux, test 8, 9, 10, $u=0, 4-6, 6 ms^{-1}$	10	13, 19, 16	50

4.2.4 Materiálové vlastnosti

Spolu s absencí vstupních hodnot popisující rychlost uvolňování tepla zdroje hoření bývá často problém i v případě materiálových charakteristik jednotlivých výrobků, povrchů, materiálů. Některé tepelně a požárně technické vlastnosti jsou uvedeny v [51 - 54]. Jako další zdroje mohou sloužit volně přístupné databáze vybraných vědeckých institucí:

NIST Chemistry Webbook:

<http://webbook.nist.gov/chemistry/>

Cone calorimeter data from Worcester Polytechnic Institute:

<http://www.wpi.edu/Academics/Depts/Fire/Lab/Cone/Data>

MatWeb:

<http://matweb.com>

Engineering Toolbox:

<http://engineeringtoolbox.com>



4.2.5 Reakce hoření

Dalším důležitým parametrem, který musí být v numerické simulaci popsán a často je obtížné jeho hodnoty definovat, je reaktant hoření. Příkazem pro hoření v programu FDS je REAC, viz [18]. Po definici reaktantu se budou veškeré hořlavé látky rozkládat na produkty dle zapsané reakce. Samozřejmě činitelem reakce hoření může být i složitější heteronukleární molekula, popřípadě lze přes stechiometrické poměry vytvořit látku, která bude produktem několikanásobné reakce nebo která bude směsí více reakcí najednou, jde ale již o složitější chemii. Z hlediska základních simulací účinku požáru si lze většinou vystačit s nejjednoduššími reaktanty.

U starších verzí programu FDS (FDS 5 a nižší) byl v základním nastavení jako palivo použit propan a příkaz REAC bylo možné vynechat. Od verze FDS 6 je definice reakce povinná v každé simulaci. V nejjednodušším případě lze použít příkaz, jehož vlastnosti má FDS k dispozici v databázi. V uživatelském manuálu FDS [18] jsou vyjmenovány látky, u kterých lze použít tento minimalistický zápis, jsou to např. metan, etan, propan, butan, aceton nebo etanol.

Pokud reakce není součástí databáze programu, lze ji definovat popisem počtu atomů pro každý prvek, např. C= a, H= b, O= c, N= d, OTHER= e. V tunelech hojně využívanou reakci POLYURETHAN je např. možné najít v [55]. Takový zápis je ovšem nejnütnější základem, aby simulace vůbec proběhla. Při simulaci, která má zjišťovat účinek požáru nebo kouře, je nutno reakci ještě dále specifikovat. Dalšími zpřesňujícími parametry jsou SOOT_YIELD, CO_YIELD, popř. HEAT_OF_COMBUSTION.

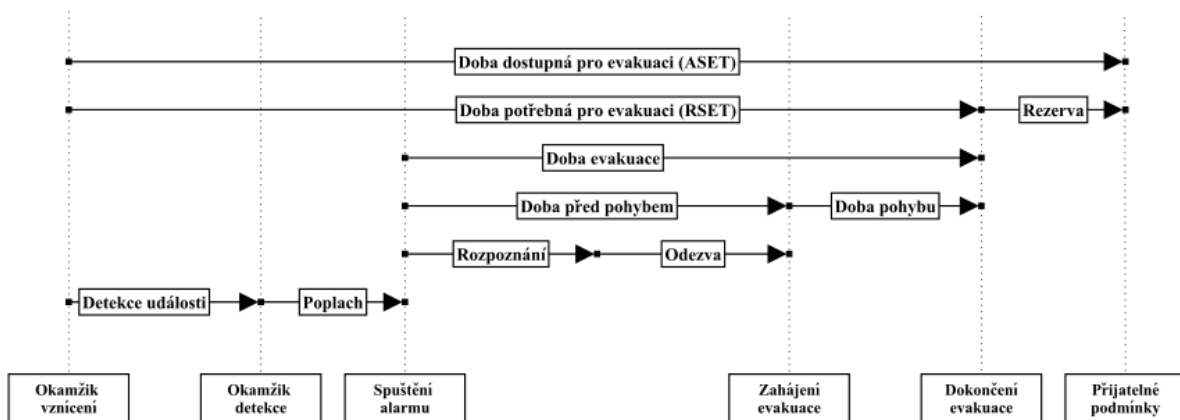
5 Základy procesu evakuace

Cílem evakuačního procesu je zajistit, aby osoby uvnitř postiženého objektu (tunelu) byly schopny v případě kritické situace (nejčastěji požáru) tento objekt opustit, přesunout se do bezpečného místa, nebo zůstat na místě nezasaženém požárem po dobu nezbytnou pro potlačení požáru. To vše bez vystavení životu či zdraví nebezpečným podmínkám, či dokonce bez uvědomění si jejich existence. Taková situace představuje ideální řešení požární bezpečnosti.

Požadavek na nulové vystavení evakuovaných osob účinkům požáru může znamenat zásadní komplikace při návrhu dotčeného objektu. Efektivnější přístup k řešení požární bezpečnosti proto představuje hledání takové úrovně expozice, která umožní efektivní evakuaci osob, a zároveň neznamená ohrožení evakuačního procesu ani zdraví evakuovaných osob. Uvedený postup znamená nutnost časového hodnocení dopadu návrhového požárního scénáře na evakuované osoby z hlediska jejich místa a podmínek.

5.1 Doba pro evakuaci osob

Predikce pohybu osob v průběhu evakuace je základním postupem při analýze efektivity požárního zabezpečení. Obecně platí, že dostatečná ochrana je zajištěna v případě, kdy doba potřebná pro evakuaci (Required Safe Egress Time - RSET) je kratší než doba dostupná pro evakuaci (Available Safe Egress Time - ASET) [56]. Vzájemné vztahy mezi jednotlivými složkami doby potřebné a dostupné pro evakuaci jsou zachyceny na obr. 42.



Obr. 42.: Struktura evakuačního procesu.

5.1.1 Doba dostupná pro evakuaci (ASET)

Doba dostupná pro evakuaci představuje časový interval, po který panují v místě evakuace přijatelné podmínky pro evakuované osoby. Příklad stanovení takových podmínek může být následující:

- viditelnost přesahuje 10 metrů,
- koncentrace CO nepřesahuje 950 ppm,
- teplota vzduchu nepřesahuje 80°C ve výšce 2 metry.

Pro stanovení hodnot vybraných veličin po dobu evakuace je vhodné použít požární model, přičemž přijatelné podmínky trvají až do okamžiku, kdy libovolná z vybraných hodnot poprvé překročí stanovený limit. Při stanovení limitu pro přijatelné podmínky využíváme některý z obecně uznávaných zdrojů, např. [56, 57].

5.1.2 Doba potřebná pro evakuaci (RSET)

Doba potřebná pro evakuaci je komplexní veličina, která je složena z řady dalších dílčích intervalů. Nejistota jejich stanovení může znamenat výrazné prodloužení celkové doby potřebné pro evakuaci a vyčerpání časové rezervy mezi dokončením evakuace a limitem pro přijatelné podmínky v budově, případně překročení tohoto limitu a ohrožení unikajících osob. Celková doba potřebná pro evakuaci se skládá dle obr. 1 z následujících základních časových intervalů:

- doba detekce události,
- doba spuštění poplachu,
- doba evakuace.

Doba detekce události je časový interval, který uplyne mezi vznícením požáru a jeho detekcí příslušným protipožárním zabezpečením, personálem budovy nebo jejími obyvateli. Pro určení tohoto časového intervalu lze použít požární model podobně jako v případě stanovení doby dostupné pro evakuaci, kdy hledáme okamžik překročení kritické hodnoty některé z veličin, které jsou pro detekci požáru rozhodující.

Doba spuštění poplachu závisí především na způsobu detekce požáru. Reakční doba elektronického protipožárního systému bude výrazně kratší než reakce obslužného personálu.

Doba evakuace závisí především na podrobné znalosti lidského chování v krizových situacích a pro její určení jsou využívány pokročilé softwarové modely. Většina z těchto modelů pracuje samostatně s *dobou před pohybem* a *dobou pohybu osob*.

Dobu před pohybem chápeme jako časový interval od okamžiku, kdy je konkrétní osoba na základě vzniklé situace poprvé vystavena vnějším podnětům (alarm, kouř, teplota apod.) až do okamžiku, kdy zahájí samotnou evakuaci na bezpečné místo. *Doba pohybu* pak představuje časovou náročnost dokončení procesu evakuace na bezpečné místo.

Existence spolehlivých údajů o předpokládané době před pohybem v různých situacích a zahrnutí těchto údajů do modelů chování při úniku je zcela zásadním předpokladem pro posouzení doby RSET a tato oblast je v současné době předmětem intenzivního výzkumu [58, 59, 60, 61].

Analýza konkrétních incidentů ukazuje, že existuje korelace mezi délkou doby před pohybem osob a následky tohoto incidentu v podobě zraněných či usmrcených osob [59].

Další studie jsou zaměřeny na vlivy sociální a fyziky prostředí (externí faktory) a na charakteristické vlastnosti osob (interní faktory) [62, 63, 64]. Dosud nicméně platí, že znalosti o chování osob před pohybem jsou méně rozsáhlé než v případě samotného pohybu během evakuace [65, 59]. Zároveň je skutečností, že většina existujících evakuačních modelů aplikuje jednoduché předpoklady o chování osob v době před pohybem, nejčastěji v podobě prosté reakční doby na alarm. V takovém případě je doporučeno použít statistické rozdělení reakční doby mezi jednotlivé evakuované osoby, nejčastěji aplikováno a doporučeno je *rovnoměrné*, *normální* nebo *lognormální* rozdělení reakční doby.

Tyto skutečnosti je proto nutné při aplikaci reakční doby jako jednoho ze základních vstupních údajů modelů pohybu osob neustále zohledňovat a dobu před pohybem chápat jako komplexní, špatně empiricky měřitelnou a extrémně variabilní veličinu se zásadním dopadem na dobu evakuace jako celku. Zanedbání této skutečnosti může mít fatální dopady na posouzení evakuačního procesu jako celku a vést ke zcela nerealistickým předpokladům.

Analýza doby pohybu je zaměřena na posouzení doby potřebné pro evakuaci osob do bezpečného místa. Konkrétní výsledek bude závislý na celé řadě vstupních údajů, mezi které patří zejména dispozice budovy, znalost budovy jejími obyvateli, místo požáru a způsob řízení požární bezpečnosti.

Pro posouzení doby pohybu je možné aplikovat modely pohybu osob na základě existujících informací a složitosti situace. Takto lze analyzovat proces evakuace a jeho časovou náročnost s dostatečnou přesností, studovat variantní řešení uspořádání prostoru, rozložení únikových východů apod.

Při analýze doby pohybu posuzujeme při využití modelu pohybu osob jako klíčové vstupní údaje zejména následující skutečnosti:

- *Počet a rozmístění osob.* Zaměřujeme se především na kapacitu prostoru. Jedním z modelovaných scénářů by měla být vždy varianta s maximálním očekávaným počtem osob. V případě, že nejsou dostupné údaje o předpokládané obsazenosti, použijeme vhodné normové či jiné zdroje. V případě rozmístění osob jako vstupní údaj bereme jejich polohu v okamžiku zahájení evakuace.
- *Charakteristika osob.* Zahrnujeme zde věk, fyzické atributy, sociální a kulturní zvyklosti, hierarchie. Obecně platí, že pouze některé atributy, o kterých máme dostupné informace, je možné bezprostředně zadat jako vstupní údaj. Patří mezi ně zejména věk osoby, rychlost jejího pohybu, mobilita, některé psychologické vlastnosti jako např. agresivita, případně specifická role v průběhu evakuace.
- *Preference únikových východů a jejich dostupnost.* Volba konkrétní únikové trasy a preference některého únikového východu má významný dopad na hustotu proudu evakuovaných osob a tedy na efektivitu evakuace. Při stanovení preference únikového východu u konkrétní osoby bereme v úvahu její znalost vnitřní geometrie budovy, obsazenost budovy, systém řízení požární bezpečnosti a požární scénář.
- *Kapacita klíčových prvků geometrie.* Pomocí dostupných empirických údajů posoudíme dostupnou kapacitu proudu v klíčových bodech únikové cesty, jakými jsou dveře, chodby, a schodiště.
- *Evakuační strategie.* Slouží pro stanovení scénáře úniku jako jednoho z důležitých údajů modelu pohybu osob.

Schopnost vybraného nástroje zohlednit popsané vstupní údaje je třeba ověřit verifikačním postupem v případě, kdy verifikační test pro daný údaj existuje. Aplikace modelu pohybu osob nám kromě hodnocení doby pohybu umožňuje posuzovat další důležité parametry, mezi které patří zejména následující:

- vzdálenost k únikovému východu,
- lokální hustota osob,
- stav a počet osob v jednotlivých dílčích sektorech geometrie,
- příchozí intenzita osob do dílčího sektoru,
- odchozí intenzita osob z dílčího sektoru.

5.2 Charakteristika osob a podmínky osob v průběhu evakuace

Při tvorbě modelu musí jeho uživatel zohlednit, které vstupní údaje má k dispozici a které nikoliv, a které je schopen ve zvoleném nástroji interpretovat přímo, a které zvolený nástroj zadat přímo neumožňuje. V případě neznalosti některého ze vstupních údajů nebo nemožnosti jej v modelu aplikovat je třeba tuto skutečnost popsat a zvolit bezpečné řešení, nejčastěji formou přidané časové rezervy k době potřebné pro evakuaci (ASET).

5.2.1 Charakteristika osob

Skupina vstupních údajů má dopad zejména na způsob a dobu potřebnou pro reakci na pokyny k opuštění budovy nebo spuštěný poplach, a dále způsob a dobu potřebnou pro evakuaci osob z budovy. Charakteristika osob ovlivňuje také jejich reakci na negativní účinky požáru, počínaje jeho spatřením až po přímé vystavení jeho negativním účinkům. Následující konkrétní skupiny vstupních údajů musí autor modelu zohlednit při jeho sestavení:

- *Počet osob, jejich hustota a rozmístění.* Nejsou-li k dispozici přesné informace, počet se určí na základě účelu užívání dle příslušného normového postupu [66]. Je třeba zohlednit, že počet a rozmístění osob v budově se může měnit v čase, v závislosti na činnosti, roční době apod.
- *Znalost prostředí.* Tento parametr silně ovlivňuje reakční dobu a preferenci únikových cest a východů. Osoby seznámené s prostředím mají lepší znalost únikových cest a výstražných systémů a lze u nich předpokládat účinnější evakuaci. Osoby, které prostředí (vlakovou soupravu či tunel) neznají, se budou snažit spíše opustit tunel stejnou cestou, kterou přišly, a jejich reakční doba na spuštění poplachu bude horší.
- *Činnost a pozornost.* Činnost prováděná v okamžiku před požárem či interakce s ostatními osobami má vliv na reakci na pozornost a tedy na reakci vyhlášení poplachu (např. stravování, spánek, práce apod.).
- *Mobilita a psychické schopnosti.* Řada souprav je přímo určena pro osoby se sníženou pohyblivostí, či zde lze očekávat jejich výskyt. Některé osoby proto budou schopny samostatného pohybu pouze omezeně či vůbec, a při evakuaci ze soupravy budou do určité míry záviset na pomoci jiných osob, delší bude rovněž období před pohybem, které bude vyžadovat více přípravných aktivit. Se sníženou mobilitou je často snížena rozpoznávací schopnost, a tedy prodloužení reakční doby na vyhlášený poplach.
- *Sociální příslušnost, postavení a odpovědnost.* Chování osob je ovlivněno tím, zda jsou osamoceny nebo ve skupině. Skupinové chování má přímý dopad na rychlost pohybu osob, protože rychlost skupiny má tendenci přizpůsobit se vlastní rychlosti nejpomalejšího člena této skupiny.
- *Vazby na činnosti vykonávané před požárem, ohnisko zájmu.* Osoby jsou přirozeně vázány na činnost, která je důvodem jejich pobytu v daném místě. V případě, že se jejich pozornost upíná konkrétním směrem (např. sportovní utkání na stadionu), mají přirozenou tendenci očekávat pokyny právě z tohoto místa.
- *Citlivost na poplach.* Reakci na vyhlášení poplachu nebo pokynu k evakuaci ovlivňuje činnost vykonávaná před jeho vyhlášením, duševní a psychologický stav, předchozí seznámení se systémem požární ochrany a pocit aktuálního ohrožení.
- *Rychlost pohybu osob.* V případě modelu a jeho simulace jde o klíčovou charakteristiku, která zásadním způsobem ovlivňuje výsledek simulace.

- *Podmínky osob.* Po vzniku požáru jsou podmínky osob výsledkem průběžně aktualizovaného hodnocení situace, které probíhá současně s analýzou evakuace. Aktuální podmínky osob mají přímý dopad na jejich zdravotní a psychický stav a schopnost další evakuace.

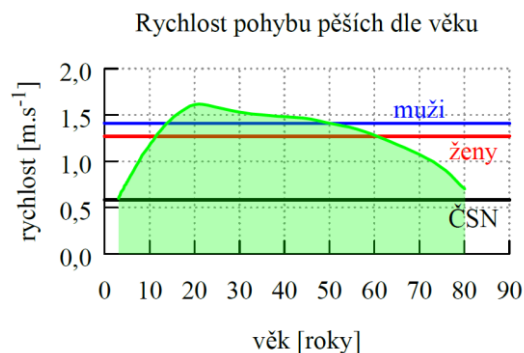
5.2.2 Rychlost pohybu osob

Rychlost pohybu osoby je důležitý parametr populace modelu, pro její stanovení je k dispozici několik zdrojů. V tuzemském prostředí lze využít normovaných hodnot dle [66]. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Norma neuvažuje s rozdílnými rychlostmi podle věku nebo schopnosti pohybu. Osoby s omezenou schopností pohybu jsou započteny při posudku evakuace zvětšením šířky únikového pruhu.

Tab. 7.: Rychlost evakuovaných osob dle ČSN 73 0802 [66].

Směr pohybu	Rychlost pohybu [ms^{-1}]
Po rovině	0,583
Po schodech dolů	0,500
Po schodech nahoru	0,417

Alternativním zdrojem dat o rychlosti osob po rovině je práce Weidmana [67]. Dokument stanovuje orientační rozdělení rychlosti dle věku, které je na obr. 1. a určuje střední rychlost pohybu pro muže a ženy, která činí $1,41 \text{ ms}^{-1}$, resp. $1,27 \text{ ms}^{-1}$. Tabelované hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.



Obr. 43: Rychlost chůze v závislosti na věku dle Weidmana [67].

Tab. 8. Podrobné rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku dle Weidmana [67].

Osoby	Min [ms^{-1}]	Max [ms^{-1}]	Osoby	Min [ms^{-1}]	Max [ms^{-1}]
Ženy (do 30 let)	0,516	1,433	Muži (do 30 let)	0,580	1,610
Ženy (30-50 let)	1,255	1,371	Muži (30-50 let)	1,410	1,514
Ženy (nad 50 let)	0,605	1,255	Muži (nad 50 let)	0,671	1,392
Ženy (om. poh.)	0,409	0,676	Muži (om. poh.)	0,460	0,760

Pokud se zaměříme na pohyb po schodech, je vhodným zdrojem informací práce Fruina [68]. Dokument rozlišuje různé věkové skupiny podobným způsobem jako [67], a zabývá se rychlostí jejich chůze po schodech s různým sklonem a oběma směry (nahoru i dolů). Výsledný soubor dat je v tab. 9.

Tab. 9: Rychlost dle Fruina na schodech s různým sklonem. Varianta A: výška 0,178 m, šířka 0,286 m, sklon 32°. Varianta B: výška 0,152 m, šířka 0,305 m, sklon 27° [68].

Osoby	A (dolů)	B (dolů)	A (nahoru)	B (nahoru)
Věk do 30 let				
Ženy	0,594	0,671	0,538	0,559
Muži	0,828	0,930	0,559	0,610
Průměr	0,757	0,813	0,549	0,584
Věk 30-50 let				
Ženy	0,508	0,650	0,478	0,544
Muži	0,691	0,813	0,513	0,589
Průměr	0,645	0,777	0,503	0,579
Věk nad 50 let				
Ženy	0,472	0,564	0,391	0,452
Muži	0,569	0,599	0,432	0,411
Průměr	0,549	0,594	0,422	0,422
Celkový průměr	0,671	0,772	0,508	0,574

5.2.3 Podmínky osob

Podmínky osob zahrnují veškeré vlivy požáru, které mění jejich chování nebo způsobují ztrátu jejich schopností. Podmínky rozdělujeme následujícím způsobem:

- psychologické vlivy,
- fyziologické vlivy,
- kombinované vlivy.

U psychologických vlivů je nezbytné stanovit, zda se osoby budou spíše cítit dostatečně v bezpečí, aby setrvaly na místě, nebo zda se budou cítit do té míry ohroženy, aby se snažily o odchod. Pokud budou chtít odejít, je nutno zjistit, zda jsou jejich podmínky v únikové cestě dostatečně dobré na to, aby se pro únik skutečně rozhodly. Tyto úvahy závisí částečně na vnímaném nebezpečí, například na spatření plamenů, a částečně na fyziologických pocitech, například na znepokojení vyvolaném dráždivým kouřem.

V případě fyziologických vlivů je třeba stanovit, zda jsou osoby fyzicky schopny uniknout. Zahrnujeme vlivy, které únik mohou zpomalit nebo ztížit, jako je působení hustého nebo dráždivého kouře. Zaměřujeme se také na stanovení okamžiku, kdy osoby pravděpodobně ztratí své schopnosti, takže nemohou uniknout bez cizí pomoci (např. ztráta vědomí v důsledku otravy oxidem uhelnatým). Důležitou součástí hodnocení je posouzení dlouhodobých nepříznivých důsledků působení a podmínek, za nichž se působení stane pravděpodobně následně smrtelným.

Mezi vlivy, které způsobují změnu chování nebo ztrátu schopností, řadíme zejména následující, přičemž s výjimkou prvních dvou mohou všechny smrtelné:

- *Spatření kouře* Zahrnujeme zde strach vstoupit do zakouřených prostor či prostor se zvýšenou teplotou, obava z ohně nebo kouře jako motivace k úniku či lákavost požáru a tendence jej pozorovat.
- *Snížená viditelnost.* Jedná se zejména o optické vlastnosti kouře a jeho negativní (dráždivé) vlivy na oči.
- *Bolest v dýchacím ústrojí, ztížené dýchání.* Vdechnutí kouře, který může být i velmi horký, může v krajním případě vést dušení způsobeném křečí hrtanu nebo astmatickým záchvatem, případně k sekundárnímu zánětu plic.
- *Dušení při vdechnutí toxických plynů.* Způsobuje zmatek, ztrátu vědomí, ohroženy jsou zejména osoby vyššího věku a osoby se srdečními chorobami.
- *Bolest na pokožce.* Vliv bývá následován přehřátím nebo popáleninami, v důsledku vede ke zhroucení.

5.2.4 Limity přijatelných podmínek pro evakuované osoby

V případě vyhodnocení přijatelných podmínek pro evakuované osoby se musíme opřít o konkrétní hodnoty klíčových produktů simulovaného požáru. Posouzení těchto podmínek v základním rozsahu předpokládá vyhodnocení teploty ve stanovené výšce nad podlahou a koncentrace CO v téže výšce, v případech odůvodněných složením hořlaviny doplněno například o HCN a HCl. Konkrétní teplota vzduchu a koncentrace CO, HCN a HCl pak v kombinaci s dobou expozice představuje konkrétní dopad na evakuované osoby. Orientační hodnoty jsou uvedeny v následující tab. 10 -14 a vychází ze standardizovaných zdrojů, využitelných pro tunelové stavby [57, 69].

Tab. 10.: Kritické hodnoty teploty, doby expozice touto teplotou a dopady na evakuované osoby.

Teplota [°C]	Expozice [min]	Dopady
60	10	Ohrožení schopnosti evakuace
80	4	Ohrožení schopnosti evakuace
120	5	Popáleniny pokožky a plic
190	1	Popáleniny pokožky a plic
500	-	Teplota vznícení bavlněného ošacení

Tab. 12.: Kritické hodnoty koncentrace CO, doby expozice touto koncentrací a dopady na evakuované osoby.

CO [ppm]	Expozice [min]	Dopady
60	10	Riziko dlouhodobých následků
80	4	Riziko dlouhodobých následků
120	5	Ohrožení schopnosti evakuace
190	1	Ohrožení schopnosti evakuace
500	-	Ohrožení schopnosti evakuace

Tab. 13.: Kritické hodnoty koncentrace HCN, doby expozice touto koncentrací a dopady na evakuované osoby.

HCN [ppm]	Expozice [min]	Dopady
150	5	Ohrožení schopnosti evakuace
250	5	Smrt
90	30	Ohrožení schopnosti evakuace
170	30	Smrt

Tab. 14.: Kritické hodnoty koncentrace HCl, doby expozice touto koncentrací a dopady na evakuované osoby.

HCl [ppm]	Expozice [min]	Dopady
500	5	Ohrožení schopnosti evakuace
16 000	5	Smrt
200	30	Ohrožení schopnosti evakuace
< 12 %	30	Smrt

5.3 Shrnutí

Při využití konceptu srovnání doby dostupné a potřebné pro evakuaci je zejména s ohledem na výsledky dosavadních, výše uvedených studií, brát v úvahu následující skutečnosti.

V současné době nelze přebírat koncept ASET/RSET v jeho původní, striktně deterministické a zjednodušené podobě. Pokud srovnáváme s dodržení výše uvedených zásad dvě evakuační strategie, z nichž obě poskytují různou hodnotu RSET, ale vždy nižší, než je hodnota ASET, lze je označit za vyhovující, ale nikoliv rovnocenné. Dnes nabývá na významu část představující časovou rezervu mezi hodnotou ASET a RSET, přičemž velikost této časové rezervy bývá považována jako klíčový vstupní údaj pro analýzu rizik a preferovaný bývá takový scénář, který tuto časovou rezervu nabízí co největší.

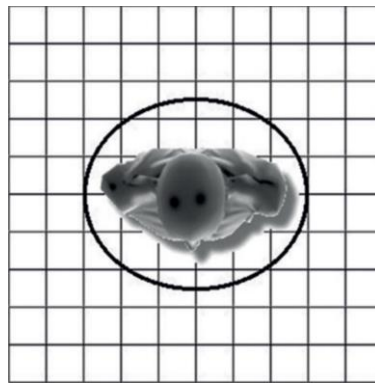
Důvodem pro popsání přístup je stochastická povaha klíčových parametrů vstupujících do tohoto konceptu. Jednotlivé klíčové časové intervaly (rozpoznání, odezva, pohyb apod.) nejsou identické napříč obyvateli objektu a nejsou identické ani v případě opakování stejné situace u stejné osoby. Vždy se jedná náhodnou veličinu s příslušným statistickým rozdělením, a takto je třeba nakládat také s výsledky, které tyto vstupní hodnoty produkují.

6 Prostorové nároky osob a dynamika davu

Pro pochopení prostorových potřeb davu je zásadní porozumění prostorovým potřebám jednotlivce. Tyto požadavky jsou vyjadřovány formou hustoty (jednotkou je m^{-2}), případně jako inverzní hodnota, tedy prostor obsazený jednou osobou (jednotkou je m^2). V praxi častěji využívanou variantou je hustota. Prostorové nároky davu jsou výrazně odlišné pro stojící a pohybující se skupiny osob. Obecně platí, že při stejné hustotě osob riziko roste úměrně se zvyšující se rychlostí jejich pohybu.

6.1 Osobní prostor jednotlivce

Jednotlivec je z hlediska minimálního prostoru, který zaujímá, a interakcí s okolními osobami, popisován tzv. elipsou těla [68]. Koncept tuto elipsu definuje jako eliptickou čáru znázorňující 95% percentil půdorysných rozměrů oblečeného dospělého muže s určitým přidaným prostorem, který odráží snahu jednotlivce vyhnout se přímému dotyku s okolními osobami. Základní elipsa těla rozměry 61 cm v delší ose a 46 cm v kratší ose, plocha této elipsy je $0,22 m^2$. Uvedené hodnoty jsou dnes široce akceptovány v inženýrské praxi a bývají s určitými odchylkami aplikovány při návrhu dopravních terminálů, tunelů apod.

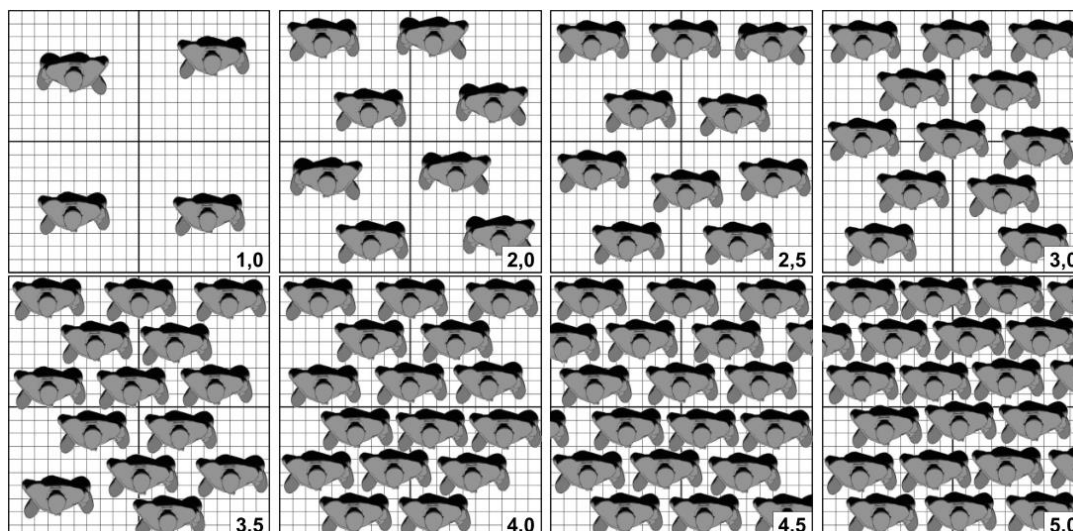


Obr. 44.: Zobrazení elipsy těla jako minimálního prostoru, který jednotlivce zaujímá. Zobrazený čtverec má hranu 1 m [68].

Pokud vezmeme v úvahu národní, věková a zdravotní specifika osob, potom plocha, kterou zaujímá jednotlivec v rámci větší skupiny osob, se pohybuje v rozmezí hodnot $0,20 m^2$ (průměrná hodnota) až $0,26 m^2$ (maximální hodnota), tedy maximální hustota osob, kterou lze ještě označit za komfortní, se pohybuje v intervalu 4–5 osob. m^{-2} .

6.2 Statická hustota skupiny osob

Následující série na obr. 45 ilustruje situace odpovídající statické hustotě osob v rozmezí 1 až 5 osob. m^{-2} . Je vždy zvoleno schématické půdorysné zobrazení. Z vizualizace je zřejmé, že hustota 5 osob. m^{-2} je z hlediska osobního komfortu a bezpečnosti hraniční, při vyšších hodnotách už dochází k porušení minimálního osobního prostoru. Současně je třeba zdůraznit, že tato hodnota platí pro skupinu osob stojící a hledící stejným směrem. V případě nahodilosti orientace osob v prostoru bude tato maximální bezpečná hustota dále klesat.

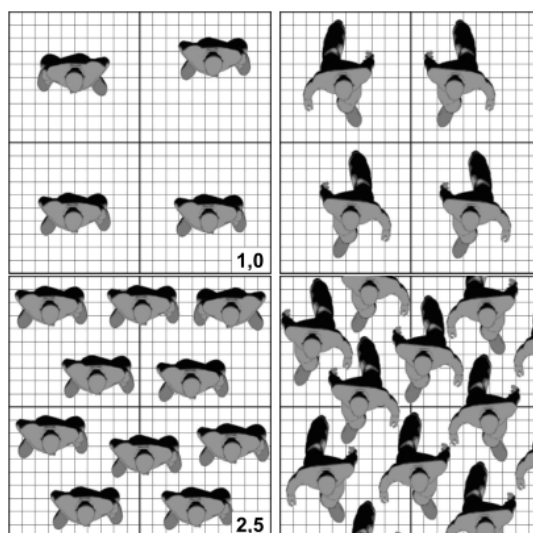


Obr. 45.: Statická hustota osob odpovídající postupně rostoucím hodnotám v intervalu 1,0–5,0 osob.m⁻² při schématickém pohledu seshora [70, 71].

6.3 Dynamická hustota skupiny osob

Prostorové nároky pohybující se osoby jsou vyšší než v případě osoby stojící, což analogicky platí také pro jejich skupiny. Na obr. 3 je zachyceno srovnání dvojice hodnot hustoty 1,0 a 2,5 osob.m⁻² při pohledu seshora, přičemž u pohybujících se osob jde o volný, neovlivněný pohyb bez vynucené interakce s okolním. Je zřejmé, že hustota přesahující 2,5 osob.m⁻² už není komfortní ani bezpečná a znamená zvýšené riziko.

Bezpečná hustota pohybující se skupiny osob je tak výrazně nižší, než v případě stojící skupiny. Tuto skutečnost je nutné vzít do úvahy zejména při bezpečnostním posouzení různých částí interiéru soupravy nebo tunelové stavby v průběhu evakuace.



Obr. 46.: Srovnání statické a dynamické hustoty osob odpovídající hodnotám v intervalu 1,0 a 2,5 osob.m⁻² při schématickém pohledu seshora. Hustota přesahující 2,5 osob.m⁻² už znamená zvýšené riziko [70, 71].



6.4 Úroveň kvality pěší dopravy

Výše popsaná rizika spojená s vysokou hustotou osob, která vzniká jako důsledek samotného evakuačního procesu a konkrétní geometrie modelovaného prostoru (např. nouzový východ z tunelu), jsou pokročilé modely evakuace osob schopny vyhodnotit. Klíčovou metrikou tohoto posouzení je tzv. úroveň kvality pěší dopravy [68].

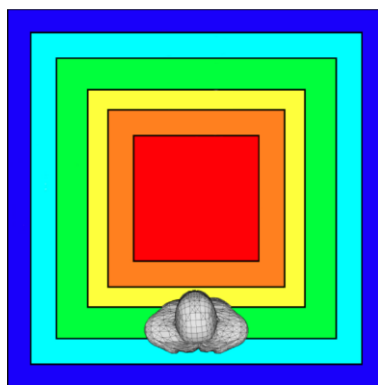
Pojem úroveň kvality má svůj původ v dopravním inženýrství, kde je používán také pod originálním názvem Level of Service (LoS). Jde o kvalitativní vyjádření situace na dopravní síti pomocí zjednodušené stupnice A-F. Úroveň kvality dopravy A znamená volnou dopravu, kdy se jednotliví aktéři vzájemně neovlivňují a pohybují se rychlostí blízkou maximální hodnotě, úroveň F pak znamená opačnou situaci, kdy se účastníci dopravy vlivem vysoké hustoty pohybují velmi pomalu či zcela zastaví. Metrika původně určená pro motorovou dopravu se postupně rozšířila do řady dalších oblastí včetně pěší přepravy.

V odborné literatuře existuje celá řada konkrétních metod pro stanovení úrovně kvality dopravy. Inženýrská praxe široce akceptuje metodu vyvinutou Fruinem [68], která rozlišuje jednotlivé úrovně pro chodníky, schodiště a čekací plochy vlivem různých dynamických vlastností pěšího proudu, popsaných v předchozí kapitole. Konkrétní číselné vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro úrovně kvality pěší dopravy jsou v tab. 15.

Tab. 15.: Rozdělení úrovně kvality pěší dopravy podle typu komunikace a hustoty osob [68].

Chodníky		Schody a rampy		Čekací plochy		Úroveň
Min [os.m ⁻²]	Max [os.m ⁻²]	Min [os.m ⁻²]	Max [os.m ⁻²]	Min [os.m ⁻²]	Max [os.m ⁻²]	
0	0,308	0	0,538	0	0,828	A
0,308	0,431	0,538	0,718	0,828	1,076	B
0,431	0,718	0,718	1,076	1,076	1,538	C
0,718	1,076	1,076	1,538	1,538	3,588	D
1,076	2,153	1,538	2,691	3,588	5,382	E
2,153	-	2,691	-	5,382	-	F

Z tabulky 15 vyplývá, že hodnoty se mezi chodníky a čekacími plochami velmi liší. Zatímco v případě chodníku je nejvyšší stupeň F dosažen pro hustotu přibližně 2,2 osob.m⁻², v případě čekací plochy je tato hodnota přibližně 5,4 osob.m⁻², tedy dvojnásobná. Pro lepší představu, jaké prostorové nároky jednotlivé hodnoty znamenají, je na obr. 47 graficky vyjádřena prostorová náročnost jednotlivých úrovní kvality pěší dopravy vzhledem k půdorysu stojící osoby.



Obr. 47.: Grafické vyjádření prostorové náročnosti jednotlivých úrovní kvality pěší dopravy vzhledem k půdorysu stojící osoby od úrovně A (modrá) po úroveň F (červená). Rozměry odpovídají úrovním kvality pěší dopravy na chodníku [68].

Pro vizuální hodnocení jednotlivých úrovní kvality dopravy, kdy nemáme k dispozici jednoznačné číslo určující hustotu, je důležitý jejich kvalitativní (slovní) popis, který je uveden v tabulce 16. Zároveň tento popis slouží jako zpětná vazba u již přiřazeného hodnocení.

Tab. 16.: Kritické hodnoty koncentrace HCN, doby expozice touto koncentrací a dopady na evakuované osoby [68].

Úroveň	Kvalitativní popis
A	Chodec se volně pohybuje všemi směry, nedochází k interakci s ostatními chodci.
B	Chodec se volně pohybuje všemi směry, sporadicky dochází k interakci s ostatními chodci a změně směru.
C	K interakci či snížení rychlosti dochází často, chůze v protisměru je obtížná.
D	Většina chodců je interakci negativně ovlivněna, dochází ke snížení rychlosti, změně dráhy, proplétání chodců mezi sebou.
E	Všichni chodci přizpůsobují rychlost svému okolí, proud se pohybuje jako celek s občasným zastavením.
F	Kritická hustota pěšího proudu, pohybuje se pomalu jako celek s častým zastavením, nepřetržitá interakce a přeskupování chodců.

7 Modelování pohybu osob a základní pojmy

Obecná definice popisuje model jako účelovou reprezentaci reálného děje nebo některé jeho části. Jedná se tedy o přiblížení reality, přičemž toto přiblížení nikdy není dokonalé, nedochází k úplnému splynutí modelu a reality.

Modely v inženýrské praxi vytváříme a používáme, abychom lépe pochopili vlastnosti a chování komplexních systémů, dokázali vysvětlit pozorované děje a zároveň předvídat jejich vývoj v budoucích očekávaných situacích, které je obtížné či zcela nemožné v danou chvíli ověřit reálným experimentem. Typickým příkladem v požárně-bezpečnostní praxi je zamýšlená změna uspořádání prostoru soupravy nebo tunelové stavby, ve kterém se pohybuje velké množství osob, a jejíž realizace může být velmi nákladná. V takové situaci může být smysluplné tuto změnu nejprve posoudit pomocí modelu a teprve na základě jeho výsledků případně přistoupit k plánované stavební úpravě.

kladných dílčích standardů, konečný dokument bude tyto postupy sjednocovat a rozšiřovat.

7.1 Technologie modelů pohybu osob

Osoby a jejich pohyb v prostoru lze modelovat různými způsoby, které se liší především mírou přiblížení k realitě. Jednotlivé přístupy mají svá omezení i výhody, které je nutné před výběrem konkrétního typu modelu znát.

Nástroje využívané pro modelování a simulaci evakuace rozdělujeme do tří základních kategorií:

- *Modely popisující chování pomocí jednoduchých rovnic.* Popis je založen na empirických údajích a rovnicích, které jsou v písemné formě nebo implementovány do softwarového nástroje. Rovnice jsou odvozeny na základě zjištěného pozorování chování osob, většinou při pohybu v běžných situacích. Tyto modely mohou být použity pro relativně dobré hodnocení doby evakuace v závislosti na stanovených předpokladech a na množství parametrů. Omezující jsou pro ni komplexní scénáře a velký počet osob.
- *Hydraulické modely.* Modely předpokládají osoby automaticky reagující na vnější podněty, nedávající prostor pro individuální rozhodování. V případě vyhlášení poplachu modely předpokládají, že dojde k okamžitému ukončení všech činností a prakticky robotickému vyklizení budovy. Rychlost chůze a směr pohybu se odvozuje pouze podle fyzikálních a geometrických parametrů, jakými je zejména lokální hustota osob a kapacita jednotlivých klíčových prvků infrastruktury. Výsledkem tohoto postupu je většinou relativně optimistické hodnocení času potřebného pro evakuaci, která v reálných případech probíhá vlivem delší doby před pohybem výrazně pomaleji.
- *Modely zahrnující chování osob.* Tyto modely berou v úvahu kromě fyzikální charakteristiky prostoru také jednotlivce jako samostatnou entitu. Zahrnují také reakce na podněty (např. požární nebezpečí) a individualitu každého jednotlivce (vlastní reakční doba, preference určitého únikového východu apod.). Tyto modely mohou poskytovat nejlepší odhad doby evakuace.

Prostor, v rámci kterého se pohybují modelované osoby, rozdělujeme dle jeho reprezentace následujícím způsobem:

- *Hrubá síť.* Prostor je v modelu rozdělen na jednotlivé sekce (pokoje, chodby, schodiště apod.), pohyb osob je rozlišován pouze na úrovni přechodu mezi těmito sekcemi.



- *Jemná síť.* Model rozděluje prostor na velkým počet relativně malých buněk, přes které se osoby pohybují.
- *Spojitý prostor.* Prostor v takovém případě není nijak diskretizován. Poloha každé osoby je aktualizována zcela přesně.

Pro reprezentaci vlastností zahrnujících chování osob v průběhu evakuace model implementuje konkrétní způsob modelování tohoto chování, které rozlišujeme následujícím způsobem:

- *Bez modelu chování.* V tomto případě je modelován pouze pohyb osob na základě fyzikálních vlivů bez specifik chování osob.
- *Implicitní chování.* Konkrétní charakteristiky chování jsou osobám přiřazeny implicitně prostřednictvím často komplikovaných pravidel závislých na externích datech, jejichž kvalita určuje validitu modelu jako celku.
- *Podmíněné chování.* Osoby reagují na situaci na základě striktně definovaných pravidel vycházejících z místních podmínek nebo lokální geometrie, které lze připodobnit programátorským technikám „pokud je situace A, potom nastává reakce B“. Všechny osoby jsou ovlivněny stejným způsobem a individuální chování je potlačeno, model je přísně deterministický.
- *Pravděpodobnostní chování.* Tato skupina modelů rozšiřuje výše uvedené podmíněné chování o pravděpodobnostní stochastický prvek, který umožňuje v chování osob variace a při opakované simulaci dává odlišné výsledky více blízké reálným očekáváním.
- *Agentní technologie.* Modely jsou zaměřeny na aplikaci umělé inteligence prostřednictvím tzv. agentní technologie. Jednotlivé osoby, tzv. agenty, jsou samostatné entity, jejich chování je odvozeno od interakce s ostatními agenty i okolním prostředím.

7.2 Statistické zpracování výsledků

Při statistickém vyhodnocení výsledků využíváme zejména následující veličiny:

Směrodatná odchylka

Jde o kvadratický průměr odchylek hodnot od jejich aritmetického průměru, který se řídí následujícím vztahem

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

kde x_i je konkrétní hodnota veličiny po simulaci modelu s pořadovým číslem i , \bar{x} je střední hodnota veličiny, N je celkový počet simulací.

Jestliže se odchylka hodnoty řídí normálním (Gaussovým) rozdělením, pak je pravděpodobnost, že se hodnota náhodné veličiny bude od střední hodnoty lišit nejvýše o jednu směrodatnou odchylku, přibližně 68,2 %, a pravděpodobnost, že se hodnota bude lišit nejvýše o dvě směrodatné odchylky, činí zhruba 95,4 %.

Interval spolehlivosti

Jde o rozsah hodnot, ve kterém leží skutečná hodnota s určitou pravděpodobností. Výběr intervalu spolehlivosti závisí především na účelu, pro který budou použity výsledky simulace. Pokud jsou např. tes-



tohány dvě velmi podobné alternativy, k jejich rozlišení je vhodné volit velmi malý interval spolehlivosti. Menší interval spolehlivosti vyžaduje větší počet simulačních procesů k dosažení dané úrovně spolehlivosti. Pro interval spolehlivosti nejčastěji používáme hladiny spolehlivosti a s úrovněmi 90 %, 95 % a 99 %. Hladina spolehlivosti 95 % pak znamená, že s touto pravděpodobností se skutečná hodnota v daném intervalu nachází.

Počet simulací nutný ke stanovení statisticky spolehlivého výsledku není možné určit předem, můžeme jej ale zjistit na základě několika prvních simulací modelu. Požadovaný minimální počet simulačních procesů lze odvodit z následující tabulky, kde *rozsah* definujeme jako interval spolehlivosti dělený směrodatnou odchylkou po prvních několika simulacích modelu.

Tab. 17: Minimální počet simulací na základě požadované úrovně spolehlivosti a požadovaného rozsahu.

Rozsah	α	Počet simulací	Rozsah	α	Počet simulací
0,5	90 %	64	1,5	90 %	9
0,5	95 %	83	1,5	95 %	12
0,5	99 %	130	1,5	99 %	18
1,0	90 %	18	2,0	90 %	6
1,0	95 %	23	2,0	95 %	8
1,0	99 %	36	2,0	99 %	12

8 Příklad analýzy evakuace osob ze železničního tunelu

V následující části je popsán příklad aplikace evakuačního modelu na konkrétní úsek Zvěrotického železničního tunelu. V rámci příkladu jsou aplikovány relevantní části metodického postupu.

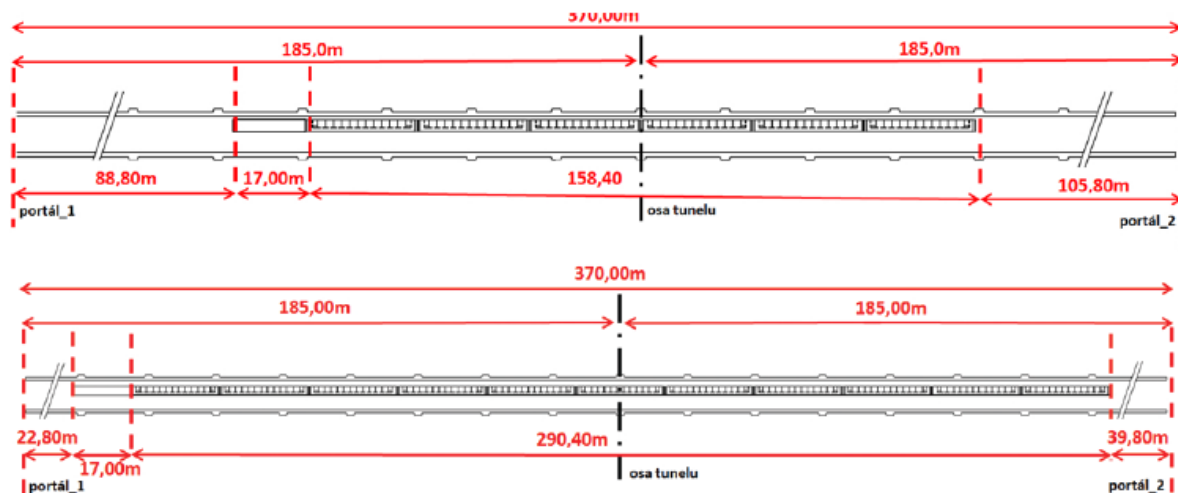
8.1 Situace

Dvoukolejný tunel se nachází na traťovém úseku Veselí n. L. - Doubí u Tábora, severně od Soběslavi. Traťový úsek je součástí IV. železničního koridoru Dolní Dvořiště - Praha Hostivař, trať je dvoukolejná s osovou vzdáleností 4,0 m a traťovou rychlostí od 130 kmh^{-1} až po 160 kmh^{-1} .

Tunel je řešen s jedním tubusem a dvěma kolejemi, jeho celková délka je 370 m. Po obou stranách je opatřen únikovým chodníkem o šířce 1,06 m, každých 20 m je opatřen nouzovým výklenkem o hloubce 0,75 m a délce 2,4 m.

Pro potřeby posouzení evakuačních časů a tras byly do modelu vloženy soupravy osobních vozů. Je uvažováno se dvěma vlakovými soupravami, se šesti osobními vozy o celkové délce 175,40 m a jedenácti osobními vozy o celkové délce 307,40 m (v obou případech je započtena lokomotiva). Vlaková souprava je vždy umístěna doprostřed tunelu, takto je modelována nejhůrší možná varianta. Situace je zachycena na obr. 6

Model tunelu s osobními vagóny je modelován tak, že prchající osoby při evakuaci z něj musí překonat výškový rozdíl 1,25 m mezi podlahou vagónu a povrchem únikového chodníku. Tento výškový rozdíl je v modelu řešen schodištěm se třemi stupni.



Obr. 48: Geometrické rozvržení s vlakovou soupravou s 6 a 11 osobními vozy.

Použitým osobním vozem v rámci modelu je typ BMZ 241, který byl vybrán z důvodu nejvyššího počtu míst k sezení; je tak modelována varianta s nejvyšší hustotou osob. Vybrané parametry vozu jsou uvedeny v tab. 8. Jsou modelovány samostatně varianty zahrnující 6 a 11 osobních vozů v soupravě s lokomotivou, geometrie osobního vozu je zachycena na obr. 6.

Tab. 18: Vybrané parametry vozu BMZ 241.

Rozchod [mm]	1 435
Délka vozu přes nárazníky [mm]	26 400
Vnější šířka vozu [mm]	2 825
Počet míst k sezení [mm]	66

Předpokládáme maximální obsazenost všech sedadel ve vozech a v rámci volných komunikačních prostor uvnitř vozu je uvažováno s obsazením max. 40 % podlahové plochy stojícími pasažéry, tedy 33 osob na jeden vůz. V modelu pro soupravu se šesti osobními vozy je tak modelována evakuace pro 594 osob, v modelu pro soupravu s jedenácti osobními vozy je modelována evakuace pro 1 089 osob.

8.2 Charakteristika osob

Modelujeme obecný scénář složení osob, předpokládáme tedy standardní věkové rozložení dle směrnice [73]. Populace je rozdělena na muže a ženy ve stejném poměru, věkové složení má střední hodnotu 50 let a směrodatnou odchylku 20 let, minimální věk osob je 10 let, maximální věk 85 let.

Národní soustava norem, např. [66] a další, předpokládá okamžitou evakuaci, tedy doba před pohybem osob zahrnující charakteristiky popsané v předchozí části je nulová. Vzhledem k výše uvedenému byly pro posouzení zvoleny v rámci modelu dvě varianty reakční doby:

- okamžitá evakuace, reakční doba 0 s,
- plynulá evakuace, reakční doba je rovnoměrně rozložena v intervalu 0 - 30 s.

Pro určení rychlosti pohybu osob lze využít normovaných hodnot dle [66]. Norma neuvažuje s rozdílnými rychlostmi podle věku nebo schopnosti pohybu. Osoby s omezenou schopností pohybu jsou započteny zvětšením šířky teoretického únikového pruhu. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.

Alternativním zdrojem dat o rychlosti osob po rovině a po schodech v závislosti na věku či pohlaví jsou práce (Weidmann, 1993) a (Fruin, 1971), konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tab 8 a 9. Vzhledem k výše uvedenému byly pro posouzení zvoleny v rámci modelu dvě varianty rychlosti pohybu:

- konstantní rychlost pohybu osob dle tuzemské normy [66],
- variabilní rychlost pohybu osob zohledňující pohlaví a věk [67, 68].

8.3 Vybrané výsledky simulace modelu evakuace

Simulace modelu evakuace osob byla uvedena pro dvě varianty vlakové soupravy (6 a 11 osobních vozů), dvě varianty reakční doby (okamžitá a plynulá evakuace v intervalu 0 – 30 s) a dvě varianty rychlosti pohybu osob. Výsledkem je 8 samostatných modelů, kombinace jejich parametrů je uvedena v tab. 19.

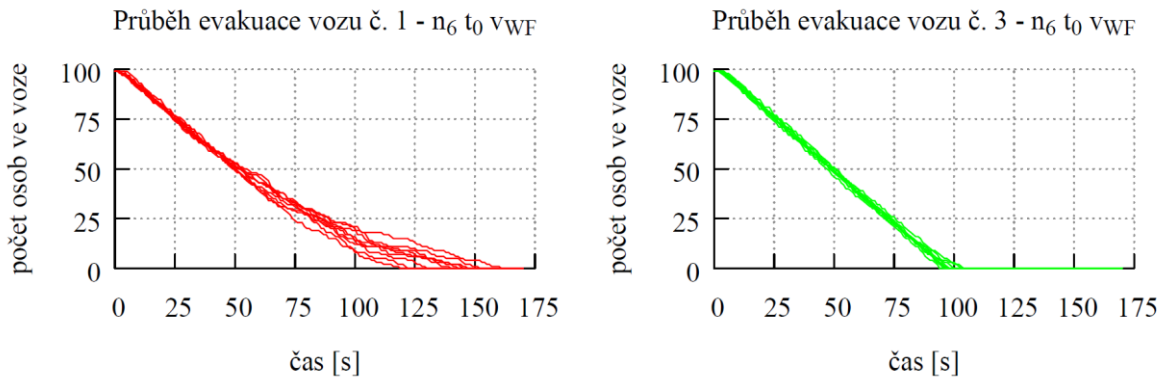
Tab. 19: Aplikované kombinace parametrů pro model evakuace osob včetně jejich označení. Výsledkem je 8 samostatných modelů evakuace, které jsou označeny dle příslušné kombinace.

Parametr	Varianta	Označení	Varianta	Označení
----------	----------	----------	----------	----------

Počet vozů v soupravě	6	n_6	11	n_{11}
Reakční doba osob [s]	0	t_0	0-30	t_{30}
Rychlost pohybu osob [ms^{-1}]	ČSN	v_{CSN}	variabilní	v_{WF}

8.3.1 Vliv pořadí vozu v soupravě na průběh evakuace

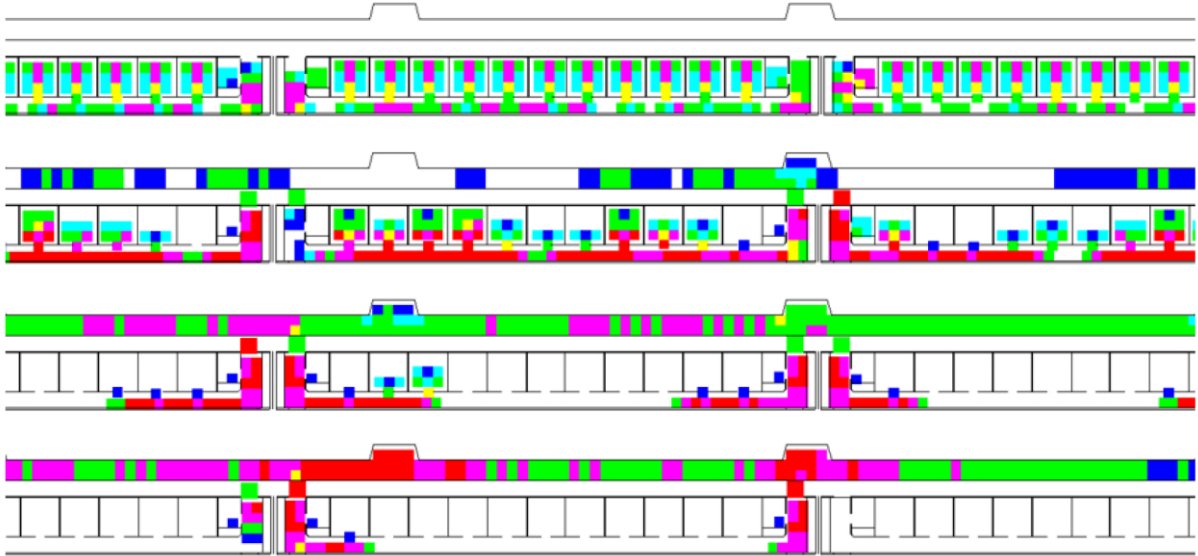
Pořadí vozu v soupravě významně ovlivňuje průběh jeho evakuace. Na obr. 49 je nejlepší a nejhorší výsledek pro jednu z variant modelu ($n_6 t_0 v_{\text{WF}}$). V případě vozu č. 1 jsou unikající osoby významně omezovány osobami, které proudí po chodníku kolem vozu směrem k portálu tunelu. Totéž platí pro poslední vůz č. 6. Naopak nejlepší výsledky vykazuje prostřední část soupravy, konkrétně vůz č. 3. Obdobné výsledky poskytuje evakuace z vozu č. 4. Obecně lze pro tento typ soupravy konstatovat, že evakuace z počátečních a koncových vozů vlakové soupravy je významně méně efektivní, než v případě vozů v prostřední části vlakové soupravy.



Obr. 49: Průběh evakuace vozů č. 1 a č. 3 pro variantu modelu s označením $n_6 t_0 v_{\text{WF}}$. Každá varianta zobrazuje výsledek 10 samostatných simulací modelu.

V případě evakuace osob kromě evakuačního času je kritickým faktorem také hustota osob, které je v různých fázích evakuace podél evakuační trasy dosaženo. Na obrázku 50 je zobrazena hustota osob pro variantu $n_{11} t_0 v_{\text{CSN}}$ v okolí vozu č. 4, který je z tohoto pohledu jedním ze dvou kritických vozů soupravy. Zobrazena je hustota evakuovaných osob v průběhu času, jednotlivé výřezy jsou odstupňovány odshora dolů v časech 0 s, 60 s, 120 s a 240 s od zahájení evakuace.

Z výsledků je patrné, že hustota osob na chodníku v okolí osobního vozu dosahuje kritických hodnot zejména v pozdější fázi evakuace, kdy na únikovém chodníku v okolí vozu činí úroveň kvality pěší dopravy F ($2,153 \text{ osob.m}^{-2}$) a dochází zde ke střetávání proudů osob opouštějících vůz a osob, které už unikly z okolních vozů a evakuují se podél chodníku. Hustota je vyjádřena v souladu s obecně uznávanou barevnou škálou pro tzv. úroveň kvality pěší dopravy dle tabulky 15. Stupeň D a vyšší je již považován za oblast zvýšeného rizika pro unikající osoby [70, 71].



Obr. 50: Průběh evakuace vozů č. 4 pro variantu modelu s označením n_{11} to v_{CSN} . Zobrazena je hustota evakuovaných osob v průběhu času, jednotlivé výřezy jsou odstupňovány odshora dolů v časech 0 s, 60 s, 120 s a 240 s od zahájení evakuace. Z výsledků je patrné, že hustota osob na chodníku v okolí osobního vozu dosahuje kritických hodnot zejména v pozdější fázi evakuace a kritická místa se nachází na únikovém chodníku.

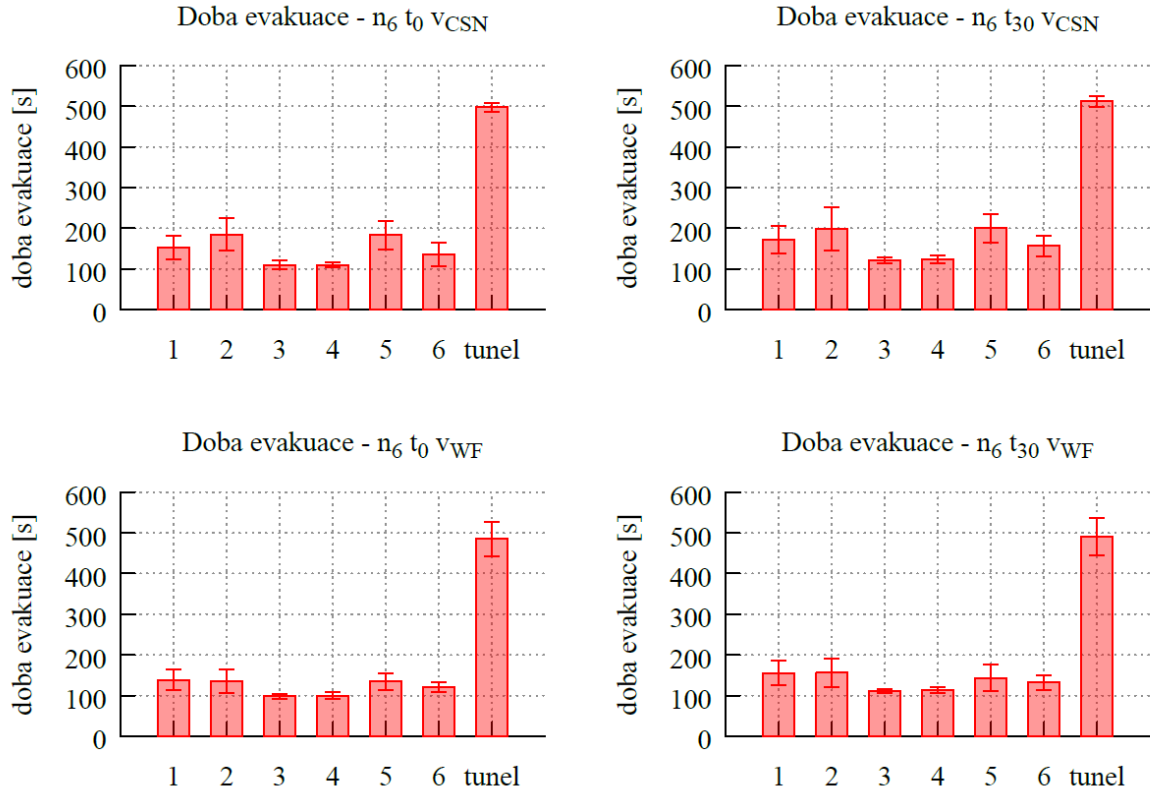
8.3.2 Vlaková souprava se 6 osobními vozy

Pro vlakovou soupravu se 6 osobními vozy byly provedeny simulace modelu s výše uvedenými 4 variantami vstupních parametrů. Pro každou variantu modelu bylo provedeno 10 nezávislých běhů simulace se statistickým rozmítáním jeho volných parametrů, zejména polohy osob ve vozech a jejich vlastností.

Statistické vyhodnocení průběhu evakuace pro soupravu se 6 osobními vozy je zachyceno na obr. 51. Vodorovná osa zobrazuje výsledky pro jednotlivé vozy (č. 1 je první vůz, číslo 6 pak poslední) a dále pak celý tunel. Chybové úsečky zobrazují oblast dvou směrodatných odchylek od střední hodnoty, tedy 2σ .

Z výsledné doby evakuace jednotlivých osobních vozů vlakové soupravy je patrné, že v případě kritické události jsou problematické krajní vozy soupravy, nikoliv však přímo první a poslední vůz. Druhý a předposlední vůz soupravy je nejvíce negativně ovlivněn osobami unikajícími ze střední části soupravy po únikovém chodníku.

Z výsledné doby evakuace tunelu jako celku je patrné, že vliv rychlosti pohybu osob nebo reakční doby na dobu evakuace tunelu jako celku je malý, resp. pohybuje se v rámci statistické odchylky doby evakuace.



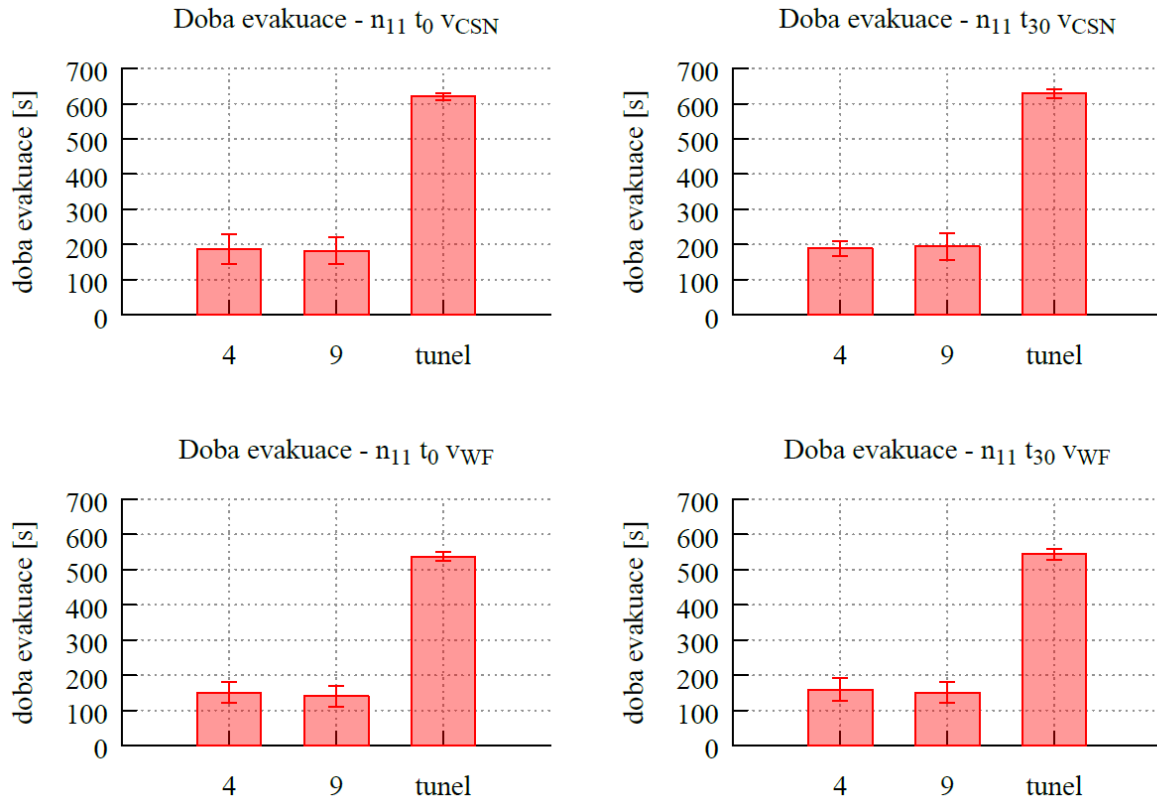
Obr. 51: Statistické vyhodnocení průběhu evakuace pro soupravu se 6 osobními vozy. Vodorovná osa zobrazuje výsledky pro jednotlivé vozy (č. 1 je první vůz, číslo 6 pak poslední) a celý tunel. Chybové úsečky zobrazují oblast dvou směrodatných odchylek od střední hodnoty, tedy 2σ .

8.3.3 Vlaková souprava s 11 osobními vozy

Pro vlakovou soupravu s 11 osobními vozy byly stejně jako v předchozím případě provedeny simulace modelu s výše uvedenými 4 variantami vstupních parametrů a 10 nezávislými běhy simulace.

Statistické vyhodnocení průběhu evakuace pro soupravu s 11 osobními vozy je zachyceno na obr. 52. Vodorovná osa zobrazuje výsledky pro nejvíce problematické vozy č. 4 a 9 soupravy a dále pak celý tunel. Chybové úsečky zobrazují oblast dvou směrodatných odchylek od střední hodnoty, tedy 2σ .

Z výsledné doby evakuace tunelu jako celku je patrné, že pro soupravu s 11 vozy a tedy větším počtem modelovaných osob, klesá statistická odchylka. Vliv reakční doby na evakuační čas je zanedbatelný, vliv rychlosti pohybu osob je již patrný a znamená snížení doby evakuace přibližně o 10 %.



Obr. 52: Statistické vyhodnocení průběhu evakuace pro soupravu s 11 osobními vozy. Vodorovná osa zobrazuje výsledky vozy č. 4 a 9 a celý tunel. Chybové úsečky zobrazují oblast dvou směrodatných odchylek od střední hodnoty, tedy 2σ .

8.3.4 Srovnání výsledků s normovým výpočtem

Výpočet doby úniku osob lze provést také normovým postupem [66] dle vztahu

$$t_u = \frac{0,75l_u}{v_u} + \frac{Es}{K_u u}, \quad (3)$$

kde l_u je délka únikové cesty (je uvažována nejhůrší varianta 185 m), v_u je rychlost osob v únikovém pruhu (je uvažována hodnota $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), E je počet evakuovaných osob (je uvažována hodnota 500 osob), s je součinitel vyjadřující podmínky evakuace (zohledňuje např. zastoupení osob s omezenou schopností pohybu či orientace, je uvažována hodnota 1,0), K_u je jednotková kapacita únikového pruhu (je uvažována hodnota $50 \text{ osob}\cdot\text{min}^{-1}$), u je počet únikových pruhů (je uvažována hodnota 1,5). Srovnání takto vypočtené hodnoty pro různé vstupní parametry je v tab. 20.

Z výsledků v tab. 20 vyplývá, že výpočet provedený normovým postupem je pro nízkou obsazenost (6 vozů soupravy) mírně pesimistický, pro vysokou obsazenost a velký počet evakuovaných osob (11 vozů soupravy) je už rozdíl značný. Dle normového postupu výpočtu činí rozdíl až cca 80 % v případě vlakové soupravy s 11 vozy a maximální obsazeností.

Tab. 20.: Srovnání doby úniku vypočtené dle příslušné normy ČSN 73 0802 a pro různé kombinace vstupních hodnot.

E [osob]	s	t_u [min]
500	1,00	10,5
594	1,00	11,83
594	1,05	12,08
1 089	1,00	18,48
1 089	1,05	18,84

Rozdíly mezi dobou evakuace na základě simulace (8,2 - 10,5 min) a na základě normového výpočtu (11,8 - 18,4 min) jsou způsobeny především odlišnou interpretací šířky únikového pruhu. Normový výpočet v příloze č. 12 předpokládá šířku únikového pruhu 1,5 násobku 550 mm, přičemž celková šířka únikového chodníku je 1 060 mm, tedy ekvivalent 1,93 násobku této šířky. Vzhledem k tomu, že pro požadavek 1,5 únikového pruhu (825 mm) se považují za vyhovující i např. dveře šíře 800 mm, jsou v případě modelu aplikovány 2 únikové pruhy.

8.3.5 Shrnutí výsledků

Souhrnné srovnání doby evakuace pro zvolené varianty modelu je uvedeno v tab. 2.8. Je zde uveden počet osob v soupravě (vyplývá z počtu osobních vozů a jejich obsazenosti), dále pak střední hodnota doby evakuace tunelu jako celku a pásmo statistické odchylky v intervalu 2σ . Z výsledků modelu evakuace lze učinit následující závěry:

- Pro nejméně příznivou variantu vlaku s 11 osobními vozy se pohybuje celková doba evakuace tunelu mírně přes 10 minut, pro kratší soupravy klesá, ale pouze nevýznamně. V případě aplikace normového výpočtu dle [66] roste celková doba evakuace pro soupravu s 11 osobními vozy přes 18 minut.
- Při posouzení evakuačního procesu a tvorbě evakuačního je nezbytné zohlednit pořadí osobního vozu soupravy. Kritické jsou zejména vozy na počátku a konci soupravy (nikoliv však přímo první a poslední), jejichž doba evakuace může být v porovnání s nejrychleji opuštěnými vozy až dvojnásobná.
- V případě uvedených kritických vozů soupravy dosahuje stupeň úrovně kvality pěší dopravy v okolí vozu na únikovém chodníku velmi nepříznivých hodnot D - F, což znamená zvýšené riziko zranění riziko pro evakuované osoby, vyplývající z extrémní koncentrace osob v daném místě.
- Vliv reakční doby cestujících na evakuační čas je zanedbatelný, což je způsobeno především kombinací nízké kapacity dveří vozů soupravy a osob, které se pohybují kolem soupravy na únikovém chodníku a zpomalují další evakuaci vozů.
- Vliv rychlosti pohybu osob, tedy jejich věku, fyzické kondice apod., na evakuační čas je naopak patrný, a to zejména v případě většího počtu vozů soupravy a osob. V modelovaném případě činí přibližně 15 %.

Reference

- [1] Beard, A., Carvel, R., et al. 2005. Handbook of Tunnel Fire Safety, ICE Publishing, Second edition, London, UK.
- [2] Carvel, R., Fire dynamics during the Channel Tunnel Fires, Fourth international symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, 2010.
- [3] Stečinský, B., Bezpečnost dopravy v železničních tunelech, Tunel, č. 15, s. 36-43, 2006.
- [4] Lacroix, D., The Mont Blanc Tunnel Fire: what happened and what has been learned. Proceedings of the 4th International conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, Spain, 2001, pp. 3-16.
- [5] Turner, S., St. Gotthard Tunnel Fire. New Civil Engineer 1 November: 5 – 7, 2001.
- [6] Beyler, C., Flammability limits of premixed and diffusion flames, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995, pp. 2-147-160.
- [7] Carvel, R., Beard, A., Jowitt, P., Drysdale, D., Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicles in tunnels, Fire Safety Journal 36 (6): 569-596, 2001.
- [8] Li, JZ., Numerical modelling of fire development in metro carriages under different ventilation conditions, SP Technical Research Institut of Sweden, BRANDFORSK Project 400-131, 2015-86.
- [9] Li, YZ., Ingason, H., A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method, In Fire Technology, 52, 1449 – 1464, 2016.
- [10] Li, YZ., Ingason, H., Lönnemark, A., Correlations between different scales of metro carriage fire tests, SP Technical Research Institute of Sweden, Boras, 2013:13.
- [11] Lemaire T., Kenyon Y., Large scale fire test in the second Benelux tunnel. Fire Technology 42, 329-350, 2006.
- [12] Beard, A., Carvel, R., Jowitt, P., Modelling fire size and spread in tunnels, Fire safety science – Proceedings of the eight international symposium, pp. 1509 – 1517, 2005.
- [13] ISO FDIS 16730, Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods, 2008.
- [14] Wald F., Burgess I., Kwasniewski Wald F., Burgess I., Kwasniewski L., Horová K, Caldová E., 2014a. Benchmark studies, Experimental validation of numerical models in fire engineering, CTU Publishing House, Czech Technical University in Prague.
- [15] Wald F., Burgess I., Kwasniewski L., Horová K., Caldová E., 2014b. Benchmark studies, Verification of numerical models in fire engineering. CTU Publishing House, Czech Technical University in Prague.
- [16] Pokorný, J., Hora, J., Požární zkoušky v tunelu Valík, Praktická aplikace některých poznatků, Sborník přednášek konference Červený kohout, 2007.
- [17] Dvořák, O., et al., Závěrečná zpráva výzkumného projektu „Vývoj a validace požárních modelů pro stanovení vývinu/šíření tepla a kouře, toxických plynů, tlakových vln pro simulaci/interpretaci scénářů požárů/výbuchů a jejich ničivých účinků, Praha, 2008.

- [18] McGrattan, K. et al. Fire Dynamics Simulator (Version 6.4), Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1019-6, p. 86, April 2016, U.S. Government Printing Office, Washington, U.S.
- [19] Ewer, J. et al. Smart Fire (Version 4.3) – User guide and technical manual. Smartfire tutorials, September 2013.
- [20] Vauquelin, O., Wu, Y. Influence of tunnel width on longitudinal smoke control Fire Safety Journal 6 vol 42, pp. 420-6, 2006.
- [21] Van, Maele, K., Merci, B., Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels, Fire Safety Journal 8(43) pp 598-609, 2008.
- [22] Vega, MG., Arguelles, Diaz, KM., Oro, JMF., Ballesteros, TR., Morros, CS., Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Memorial Tunnel case, Tunelling and Underground Space Technology 5 (23), pp. 539-51, 2008.
- [23] Collela, F., Verda, V., Borchiellini, R. Rein, G., One-dimensional and multi-scale modelling of tunnel ventilation and fires, Handbook of Tunnel Fire Safety, Chapter 17 (London: ICE), pp. 365-90, 2005.
- [24] Ma, T.G., Quintierre, J.G., Numerical Simulation of Axi-Symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations. Fire Safety Journal, 2003. 38(5): p. 467–492.
- [25] Li, Y.Z., Ingason, H., Lönnemark, A. Numerical simulation of Runehammar tunnel fire tests. in 6th International Conference on Tunnel safety and Ventilation. Graz, Austria. 2012.
- [26] Hietaniemi J., Mikkola E.: Design Fires for Fire Safety Engineering, VTT Technical Research Centre of Finland, 2010, ISBN 978-951-38-7479-7.
- [27] Steinert, C., Smoke and heat production in tunnel fires, In The international conference on fires in tunnels, Boras, Sweden, 10–11 October 1994, SP Swedish National Testing and Research Institute, pp 123–137, 1994.
- [28] Ingason, H., Gustavsson, S., Dahlberg, M., Heat release rate measurements in tunnel fires, SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, 1994.
- [29] Hadjisophocleous, G., Lee, DH., Park, WH., Full-scale experiments for heat release rate measurements of railcar fires, In International symposium on tunnel safety and security (ISTSS), New York, 2012, SP Technical Research Institute of Sweden, pp 457– 466, 2012.
- [30] White, N., Dowling, V., Barnett, J., Full-scale fire experiment on a typical passenger train, Highett, CSIRO, Fire Sciences and Technology Laboratory, 2010.
- [31] Boon Hui Chiam, Numerical Simulation of a Metro Train Fire, University of Canterbury, New Zealand, Fire Engineering Research Report, pp. 7, 2005.
- [32] Mangs J., On the fire dynamics of vehicles and electrical equipment, VTT Publications 521, ISBN 951-38-6274-7, Finland 2004.
- [33] Steinert, C., Experimental Investigation of Burning and Fire Jumping Behavior of Automobiles (in German), VFDB, Vol. 49, pp. 163-172, 2000.
- [34] Haack, A., Fire in Tunnels - Thematic network, Technical report part 1: Design fire scenarios, WTCB, Brussels, Belgium, pp. 139, 2001.

- [35] Mangs, J. and Keski-Rahkonen, O. (1994). Characterization of the Fire Behavior of a Burning Passenger Car. Part I: Car Fire Experiments, *Fire Safety Journal*, Vol. 23, 1994, pp. 17-35.
- [36] Dvořák, O., Wald, F., Large-scale fire tests with a passenger car in an open area, *The Civil Engineering Journal* 8-2015.
- [37] Van Oerle, N., Lemaire A. and van de Leur, P. (1999). Effectiveness of Forced Ventilation in Closed Car Parks (in Dutch), TNO Report No. 1999-CVB-RR1442, TNO, Delft, the Netherlands.
- [38] Steinert, C. (2000). Experimental Investigation of Burning and Fire Jumping Behavior of Automobiles (in German), *VFDB*, Vol. 49, pp. 163-172.
- [39] Katsuhiko O., Norimichi W., Yasuaki H., Tadaomi Ch., Ryoji M., Hitoshi M., Satoshi O., Hideki S., Yohsuke T., Kimio H., Yasumasa M., Jinji S. (2008). Burning behavior of sedan passenger cars, *Fire Safety Journal*, Vol. 44, pp. 301-310.
- [40] Shipp M., Fraser-Mitchell J., Chitty R., Cullinan R., Crowder D., Clark P., Fire spread in Car Parks, A summary of the CLG/BRE research programme and finding, BRE Global Limited, UK.
- [41] Shipp, M. and Spearpoint, M. (1995). Measurements of the Severity of Fires Involving Private Motor Vehicles, *Fire and Materials*, Vol.19, pp. 143-151
- [42] Zhao B., Kruppa J., Structural behaviour of an open car park under real fire scenarios, CTICM France, Second International Workshop Structures in Fire, Christchurch, 2002.
- [43] Joyeux, D. (1997). Natural Fires in Closed Car Parks: Car Fire Tests, CTICM Report No. INC 96/294d DJ/NB, CTICM, Metz, France.
- [44] Haack, A. (2001). Fire in Tunnels - Thematic network, Technical report part 1: Design fire scenarios, WTCB, Brussels, Belgium, pp. 139.
- [45] NFPA 502, Standards for road tunnels, bridges and other limited access highways, 2004 Ed., National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.
- [46] Brekelmans, J., Summary of large scale fire tests in the Runehamar tunnel in Norway, conducted in association with the UPTUN Research Program, 2003.
- [47] Ingason, H., Lonnermark, A. (2005). Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels, *Fire Safety Journal*, Vol. 40 (2005), pp. 646-668.
- [48] Ignason, H. Fire development in large tunnel fires, *Fire safety science – Proceedings of the eight international symposium*, pp. 1497 – 1508, 2005.
- [49] Cheong M K, Spearpoint M J, Fleischmann C M. Design fires for vehicles in road tunnels. Proc. 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Auckland, New Zealand, pp. 229-240, 2008.
- [50] Kit, CM., Assessment of vehicle fire development in road tunnels for smoke control ventilation design, PhD thesis, 2009, University of Canterbury, New Zealand.
- [51] Thureson P (1991), “Eurific – Cone Calorimeter Test Results Project 4 of the Eurific fire research programme”, SP Swedish National Testing and Research Institute Fire Technology.
- [52] Babrauskas V and Grayson S J (1992), *Heat Release In Fires*, London; New York : Elsevier Applied Science.

- [53] Babrauskas V (2002), “Heat Release Rate”, In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, National Fire Protection Association.
- [54] Babrauskas V (2003), Ignition handbook : principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science, Issaquah, Wash.: Fire Science Publishers.
- [55] DiNenno, P. J. (ed), SFPE Handbook of fire protection engineering. Third edition. National Fire Protection Association, Inc., Quincy, Massachusetts 02269, 2002. ISBN: 087765-451-4.
- [56] Hurley, M. J. (editor): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer, 2015.
- [57] Smith, D. B.: Fire Safety Engineering (CIBSE Guide E). CIBSE, 2010.
- [58] Purser, D. A.; Bensilum, M.: Quantification of Behaviour for Engineering Design Standards and Escape Time Calculations. In Human Behaviour in Fire 1998, 1998.
- [59] Kobes, M.; Helsloot, I.; de Vries, B.; aj.: Building Safety and Human Behaviour in Fire: A Literature Review. Fire Safety Journal, ročník 45, 2010: s. 141.
- [60] McConnell, N. C.; Boyce, K. E.; Shields, J.; aj.: The UK 9/11 Evacuation Study: Analysis of Survivor’s Recognition and Response Phase. Fire Safety Journal, ročník 45, 2010: s. 21-34.
- [61] Lovreglio, R.; Ronchi, E.; Nilsson, D.: A Model of the Decision-Making Process During Pre-Evacuation. Fire Safety Journal, ročník 78, 2015: s. 168-179.
- [62] Nenno, P. J. D. (editor): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Movement of People: The Evacuation Timing. National Fire Protection Association, 2002, s. 3342-3366.
- [63] Sherman, M. F.; Peyrot, M.; Magda, L. A.; aj.: Modelling Pre-Evacuation Delay by Evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A Revisit Using Regression Analysis. Fire Safety Journal, ročník 46, č. 7, 2011: s. 414-424.
- [64] Kuligowski, E. D.; Mileti, S.: Modelling Pre-Evacuation Delay by Occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001. Fire Safety Journal, ročník 44, č. 4, 2009: s. 487-496.
- [65] Proulx, G.: High-Rise Evacuation: A Questionable Concept. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire, 2001.
- [66] ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb — Nevýrobní objekty. 2009.
- [67] Weidmann, U.: Transporttechnik der Fußgänger. Technische zpráva, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, 1993.
- [68] Fruin, J. J.: Pedestrian Planning and Design. Elevator World, Inc., 1971.
- [69] Quincy, M.A., Standard for fixed guideway and passenger rail systems, NFPA 130, National Fire Protection Association, 2000.
- [70] Still, G. K.: Crowd Dynamics. Dizertační práce, University of Warwick, Department of Mathematics, 2000.
- [71] Still, G. K.: Introduction to Crowd Science. CRC Press, 2014.
- [72] Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. 2007.
- [73] RIMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen. 2009.

- [74] Ronchi, E.; Nilsson, D.; Kuligowski, E. D.; aj.: The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models (NIST Technical Note 1822). 2013.
- [75] Nilsson, D.; Johansson, A.: Social Influence During the Initial Phase of a Fire Evacuation - Analysis of Evacuation Experiments in a Cinema Theatre. *Fire Safety Journal*, ročník 44, č. 1, 2009: s. 71-79.
- [76] ISO/TR 13387-8 Fire Engineering: Life Safety — Occupant Behaviour, Location and Condition. 1999.
- [77] CSN 73 4205 Komíny — Pálené/Keramické komínové nástavce — Požadavky a zkušební metody. 2003.
- [78] D 7974-6:2004 The Application of Fire Safety Engineering Principles to Fire Safety Design of Buildings. 2004.
- [79] ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires. 2012.
- [80] ISO 16730:2008 Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods. 2012.
- [81] Averill, J. D.: Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, Occupant Behaviour. Egress and Emergency Communications. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [82] Averill, J. D.: Five Grand Challenges in Pedestrian and Evacuation Dynamics. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2011.
- [83] Bayer, K.; Rejnö, T.: Evacuation Alarm — Optimizing Through Full-scale Experiment. Technická zpráva, Lund University, 1999.
- [84] Brillon, W.: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2009.
- [85] Bryan, J. L.: Smoke as a Determinant of Human Behaviour in Fire Situations. Technická zpráva, National Bureau of Standards, 1977.
- [86] Bryan, L. J.: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Behavioral Response to Fire and Smoke. National Fire Protection Association, 2002, s. 3315-3340.
- [87] Cepolina, E.: Phased Evacuation: An Optimisation Model Which Takes Into Account the Capacity Drop Phenomenon in Pedestrian Flows. *Fire Safety Journal*, ročník 44, 2009: s. 532-544.
- [88] Fahy, R. F.; Proulx, G.: Toward Creating a Database on Delay Time to Start Evacuation and Walking Speeds for Use in Evacuation Modeling. In *Human Behaviour in Fire 2001*, 2001.
- [89] Frantzich, H.; Nilsson, D.: Evacuation in Dense Smoke: Behaviour and Movement: Technical Report 3126. Technická zpráva, Lund University, 2003.
- [90] Frantzisch, H.; Nilsson, D.; Eriksson, O.: Evaluation and Validation of Evacuation Programs. Technická zpráva, Lund University, 2007.
- [91] Galea, E.: Approximating the Evacuation of the World Trade Center North Tower Using Computer Simulation. *Fire Protection Engineering*, ročník 18, č. 2, 2008: s. 85-115.

- [92] Galea, E.: The UK WTC9/11 Evacuation Study: An Overview of the Methodologies Employed and Some Preliminary Analysis. In Proceedings of the fth Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference, 2008.
- [93] Galea, E.; Blake, S.: Collection and Analysis of Human Behaviour Data Appearing in the Mass Media Relating to the Evacuation of the World Trade Centre Towers of 11 September 2001. Technická zpráva, Office of the Deputy Prime Minister, 2004.
- [94] Grosshandler, W. L.; Bryner, N. P.; Madrzykowski, D.; aj.: Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [95] Gwynne, S. M. V.; Kuligowski, E. D.; Spearpoint, M.: More Thoughts on Defaults. In Fifth International Symposium on Human Behaviour in Fire, 2012.
- [96] Hamins, A.; McGrattan, K.: Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 2 (NUREG-1824). Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [97] Hartzell, G. E.: Fire Protection Handbook, kapitola Combustion Products and Their Effects on Life Safety. National Fire Protection Association, 2008, s. 11-34.
- [98] Hockey, S. M.; Rew, P. J.: Human Response to Thermal Radiation. Technická zpráva, WS Atkins Safety and Reliability, 1996.
- [99] Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.: Pedestrian Behaviour at Bottlenecks. Transportation Science, ročník 39, 2005: s. 147-159.
- [100] Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.: Microscopic Calibration and Validation of Pedestrian Models: Cross-Comparison of Models Using Experimental Data. In Traffic and Granular Flow 05, 2007.
- [101] Jin, T.: Visibility Through Fire Smoke. Report of the Fire Research Institute of Japan, ročník 42, Č. 5, 1976: s. 12-18.
- [102] Jin, T.: Studies on Human Behavior and Tenability. In Fire Safety Science — Proceedings of the Fifth International Symposium, 1997.
- [103] Jin, T.: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. National Fire Protection Association, 2008, s. 242-253.
- [104] K. D. Steckler, W. J. R., J. G. Quintiere: Flow Induced by Fire in a Compartment. Technická zpráva, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1982.
- [105] Karlsson, B.; Quintiere, J.: Enclosure Fire Dynamics. CRC Press, 1999.
- [106] Klote, J. H.; Milke, J. A.: Principles of Smoke Management. American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2002.
- [107] Korhonen, T.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide (Working paper No. 119). Technická zpráva, VTT Technical Research Center of Finland, 2009.
- [108] Kučera, P.; Pavlík, T.; Pokorný, J.; aj.: Požární inženýrství — dynamika požáru. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009.
- [109] Kuligowski, E. D.; Peacock, R. D.: Building Occupant Egress Data, Report of Test FR 4024. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2010.

- [110] Kuligowski, E. D.; Peacock, R. D.; Hoskins, B. L.: A Review of Building Evacuation Models, NIST Technical Note 1680. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [111] Lord, J.; Meacham, B.; Moore, A.; aj.: Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Computer Egress Models. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [112] Nenno, P. J. D. (editor): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Re-sponse to Fire and Smoke. National Fire Protection Association, 2002, s. 3315-3341.
- [113] Nenno, P. J. D. (editor): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola To-xicity Assessment of Combustion Products. National Fire Protection Association, 2002.
- [114] Pauls, J. L.: Vertical Evacuation in Large Buildings: Missed Opportunities for Research. Disaster Management, ročník 6, č. 3, 1994: s. 128-132.
- [115] Pheasant, S.: Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of the Work. CRC Press, 1996.
- [116] Purser, D. A.: Behavioural Impairment in Smoke Environments. Toxicology, ročník 115, 1996: s. 25-40.
- [117] Purser, D. A.: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. National Fire Protection Association, 2008, s. 2096-2193.
- [118] Ronchi, E.; Gwynne, S. M. V.; Purser, D. A.; aj.: Representation of the Impact of Smoke on Agent Walking Speeds in Evacuation Models. Fire Technology, ročník 49, č. 2, 2013: s. 411-431.
- [119] Ronchi, E.; Nilsson, D.: Fire Evacuation in High-Rise Buildings: A Review of Human Behaviour and Modelling Research. Fire Science Reviews, ročník 2, č. 7, 2013: s. 1-21.
- [120] Ronchi, E.; Nilsson, D.; Zechlin, O.; aj.: Employing Validation and Verification Tests as an Integral Part of Evacuation Model Development. In 13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering, 2013.
- [121] Seyfried, A.; Rupprecht, T.; Winkens, A.; aj.: Capacity Estimation for Emergency Exits and Bottlenecks. In 11th Fire Science Engineering Conference INTERFLAM 2007, 2007.
- [122] Tubbs, J.; Meacham, B.: Egress Design Solutions A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning. Wiley, 2007.
- [122] Wachs, M.; Samuels, J. M.; Skinner, R. E.: Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, 2000.
- [123] Wood, P. G.: The Behaviour of People in Fires. Technická zpráva, Loughborough University of Technology, 1972.