

ANALÝZA RIZIKA POŽÁRU V SILNIČNÍCH TUNELECH

FIRE RISK ANALYSIS IN THE ROAD TUNNELS

Jiří Šejnoha, Jan Sýkora,
Daniela Jarušková, Eva Novotná,
Michal Šejnoha

Riziko je zde považováno za pravděpodobnou škodu způsobenou požárem v ostění tunelu. V první části příspěvku věnované pravděpodobnostním aspektům analýzy je dopravní proud popsán jako Markovův řetězec sdružených stavů tvořených kombinací nákladních vozů/autobusů (TB) a osobních vozů (PC) ze sousedních pruhů. Mohutnost požáru je měřena tepelným výkonem a jeho diskretním rozdělením pravděpodobnosti. Četnost požárů je vystižena intenzitou λ_f . Dalšími parametry modelu jsou hustota dopravního proudu AADT, délka tunelu L , procentuální zastoupení TB a počet pruhů. V druhé části, zaměřené na poškození ostění, jsou kombinovány dva modely transportu tepla a vlhkosti, a to Bažantův-Thonguthaiův a Künzelův-Kießlův, k predikci tloušťky odprysku betonu a objemu betonu poškozeného teplotou, která překročila jistou úroveň $\bar{\theta}$. Model byl validován na velkých vzorcích v peci. Data pro tepelné zatížení byla odvozená ze čtyř velkorozměrných zkoušek v tunelu v Runehamaru, statistická data poskytly rozsáhlé studie v Rakousku a Itálii. ■ Risk is calculated as a probable damage caused by a fire in the tunnel lining. In the first part of this paper, devoted to the probabilistic aspects, the traffic flow is described as the Markov chain of joint states consisting of a combination of trucks/buses (TB) and personal cars (PC) from adjoining lanes. The fire power is measured by the heat release rate and its probability mass function. Intensity λ_f reflects the frequency of fires. Traffic density AADT, the length of the tunnel L , the percentage of TBs, and the number of lanes are the remaining model parameters. In the second part, focused on damage of the tunnel lining, a combination of two approaches to model the heat and moisture transport, namely Bažant & Thonguthai's and Künzel & Kiessl's models, respectively, is proposed. It serves as a tool for prediction of thickness of the spalling zone and the volume of concrete degraded by temperatures that exceeded a certain level, $\bar{\theta}$. The model was validated against a macroscopic test on concrete samples placed into a furnace. Data for the heat loading were derived from four large-scale fire tests in the Runehamar tunnel, while the statistical data are obtained from extensive studies carried out in Austria and Italy.

V příspěvku je popsána metodika predikce rizika jako pravděpodobné škody způsobené požárem na ostění jednosměrného silničního tunelu se dvě-

ma pruhy. V nejjednodušším vyjádření je riziko součinem pravděpodobnosti mimořádné události (požáru) a finanční částky, kterou je třeba vynaložit na odstranění škody. S ohledem na vymezený rozsah příspěvku jsou teoretické základy jen stručně komentovány a následně uvedeny nezbytné vztahy. Pozornost je věnována aplikační stránce modelu ilustrovaného případovou studií. Čtenáře s hlubším zájmem o teoretické základy odkazujeme na podrobnou studii [1].

Riziko požáru je svázáno s pravděpodobností dopravní nehody, kterou nemusí být jen důsledek kolize dvou nebo více vozidel, ale jakákoliv událost vedoucí k jejich vznícení (přehřátí motoru, brzd, únik paliva apod.). Podkladem pro pravděpodobnostní model požáru jsou statistická data podložená dvěma rozsáhlými studiemi v Rakousku (viz zpráva ASFInAG [2]) a v Itálii (studie [3], [4]). Ze zprávy [2] vyplývá, že drtivá většina požárů nákladních vozidel nebo autobusů (TB) vzniká samovznícením převážně v horském terénu (97 %). K následnému vznícení po kolizi dochází spíše v rovinatém území. Italské podklady [3], [4] poskytují kromě statistických údajů o počtu dopravních nehod a požárů a způsobu jejich matematického modelování i informaci o faktorech, jež vážné nehody nejvíce ovlivňují:

- hustota dopravy AADT (Annual Average Daily Traffic),
- délka tunelu L [m],
- procentuální podíl TB v dopravním proudu,
- počet pruhů.

Pravděpodobnost požáru záleží na seskupení (skladbě) vozidel postižených požárem. Se skladbou se mění i tepelný výkon Q [MW] (Heat Release Rate). Reálné podklady pro predikci účinku Q na tunelové ostění (vývoj teploty v čase a prostoru) poskytuje zpráva [5] o výsledcích čtyř velkoroz-

měrných požárních zkoušek v tunelu v Runehamaru. Rozdělení pravděpodobnosti tepelného výkonu bylo možno odhadnout na základě ETA (Event Tree Analysis) popsané v [2], podle níž jen ve 38 % případech všech zasažených vozidel se požár vyvinul zcela nebo alespoň zčásti (kabina) uvnitř tunelu. U zbylých případů došlo k včasnému zastavení před tunelem, vyjetí z tunelu anebo k uhašení uvnitř tunelu.

Poškození ostění požárem je dvojího druhu:

- odpryskem povrchové vrstvy tlakem vodní páry,
- poklesem pevnosti betonu v části ostění zasažené vysokou teplotou.

K analýze škody je nezbytný model sdruženého transportu hmotnosti (vlhkosti) a tepla za podmínek velmi vysoké teploty. K tomu byla využita kombinace dvou modelů popsaných v [6] a [7], jež byla analyzována matematicky v [8].

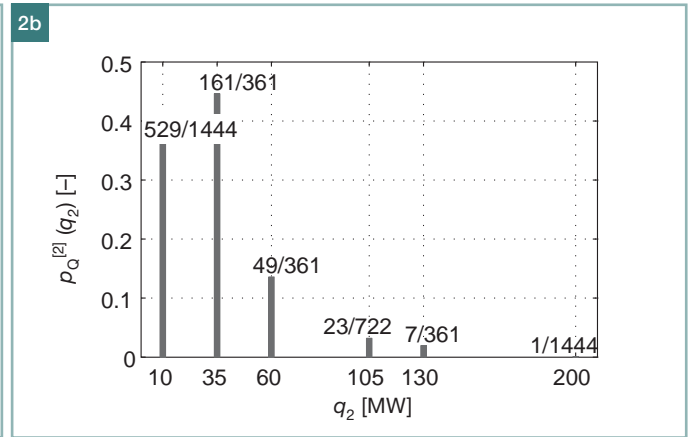
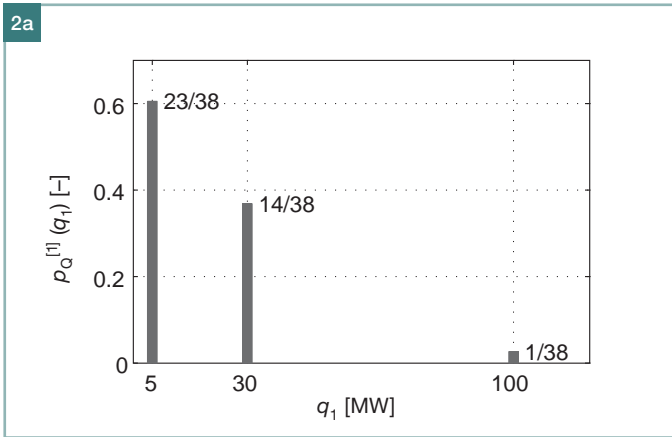
Příspěvek je uspořádán do dvou částí. V první je navržen pravděpodobnostní model rezultující ve vztah pro predikci rizika. Ve druhé části je popsán a experimentálně validován model termo-mechanického poškození.

Obr. 1 Možné paralelní skladby vozidel pro dopravu ve dvou pruzích ■ Fig. 1 Probable parallel configurations of vehicles for a two-lane traffic

Obr. 2 a) Diskretní rozdělení pravděpodobnosti $Q^{[1]}$ (jeden TB), b) diskretní rozdělení pravděpodobnosti $Q^{[2]}$ (dva TB) ■ Fig. 2 a) Probability mass function of $Q^{[1]}$ (one TB), b) probability mass function of $Q^{[2]}$ (two TBs)

Obr. 3 a) Sorpční izoterma, b) teplotně závislá pevnost v tlaku $f_c(\theta)$, c) teplotně závislá pevnost v tahu $f_t(\theta)$, d) permeabilita vodní páry $\kappa(\theta)$ jako funkce teploty ■ Fig. 3 a) Sorption isotherm, b) temperature-dependent compressive strength $f_c(\theta)$, c) temperature-dependent tensile strength $f_t(\theta)$, d) permeability $\kappa(\theta)$ as a function of temperature

| 1 | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------|----|----|----|------------------------|----|----|----|----|--|-------------------|
| Pruh 1 | V | V | PC | PC | V | TB | PC | TB | TB | | |
| Pruh 2 | V | PC | V | PC | TB | V | TB | PC | TB | | |
| Stav | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| PC | = osobní vůz | | TB | | = nákladní vůz/autobus | | V | | | | = mezeru v proudu |



Navazuje případová studie rizika a závěry, komentující přednosti a nedostatky metodiky a naznačující cesty možného zdokonalení.

PRAVDĚPODOBNOSTNÍ MODEL

Do pravděpodobnostního modelu vstupují tyto faktory: (1) Pravděpodobnost, že v místě mimořádné události bude určitá skladba vozidel, $P_f^{[i]}$, $i = 1, 2, \dots, l$, (2) pravděpodobnost, že příslušná skladba bude zasažena požárem, $P_f^{[i]}(q)$, (3) pravděpodobnost, že k požáru dojde na úseku dx , tj. $\lambda_f^{[i]} dx$, a konečně, že požár v místě x způsobí škodu $D^{[i]}(q, x)$.

(1) Možné skladby vozidel v tunelu se dvěma pruhy jsou naznačeny na obr. 1. Kromě paralelních skla-

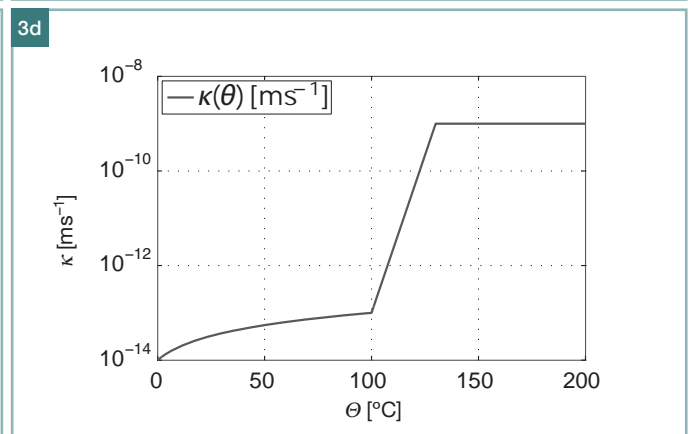
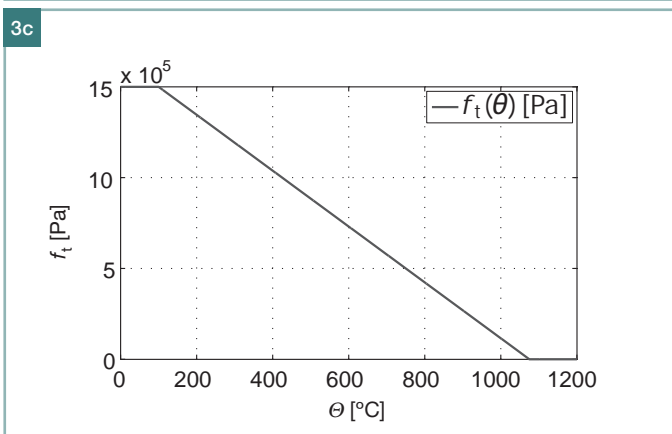
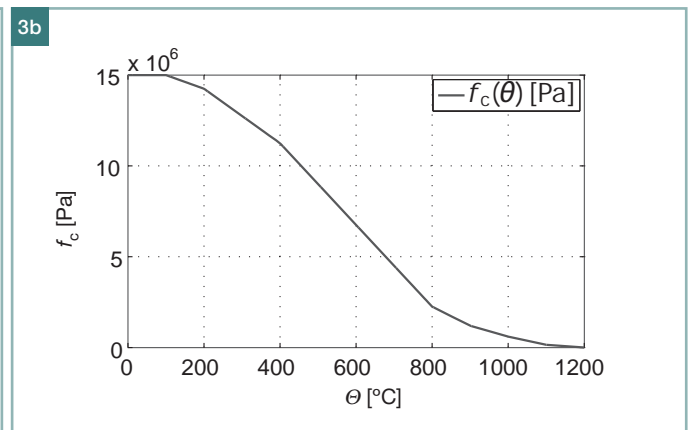
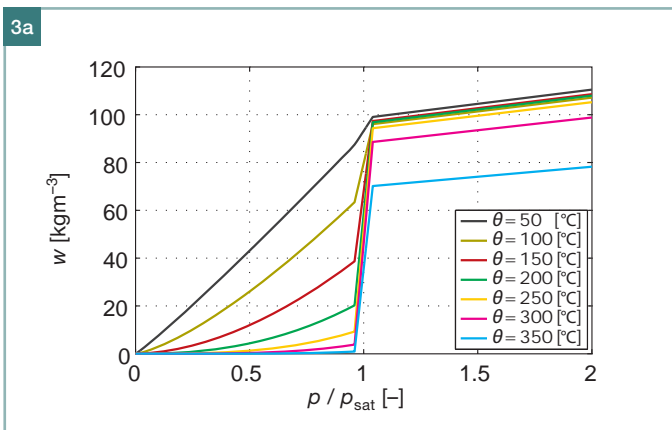
deb ze složek V-mezera v proudu, PC, TB lze uvažovat i sériové stavy, takže celkový počet kombinací může být 16. Pravděpodobnosti stavů lze získat Markovovým modelem, ať už stacionárním (homogenním) při „nekonečném“ proudu vozidel nebo nestacionárním (nehomogenním) při přerušovaném proudu. (Pojem stacionární naznačuje, že nezávisle proměnnou je čas t [den, rok]. V homogenním procesu je nezávisle proměnnou poloha nehody x [m].) Vstupními parametry modelu jsou přechodové pravděpodobnosti (resp. intenzity Markovova procesu) mezi složkami řetězce (V, PC, TB) a pravděpodobnosti (intenzity) přejezdů vozidel mezi pruhy.

(2) Pravděpodobnosti tepelných vý-

konů jsou odvozeny za předpokladu, že tepelný příspěvek PC je zanedbatelný. S ohledem na dostupné podklady budeme uvažovat jen dva stavy $[i] = 1, 2$. Rozdělení $\rho_Q^{[1]}$ (hoří jeden TB), obdrženo z ETA v [2], je na obr. 2a a vystihuje kterýkoliv ze stavů 4 až 7 z obr. 1. Rozdělení $\rho_Q^{[2]}$ (hoří dva TB, ať již v paralelní nebo sériové konfiguraci) je na obr. 2b. Při stejných tepelných výkonech obou TB a nezávislosti tepelných zdrojů platí

$$\rho_Q^{[2]}(q_2) = \sum_{(q_1)} \rho_Q^{[1]}(q_2 - q_1) \rho_Q^{[1]}(q_1). \quad (1)$$

(3) Na požární nehody v tunelu nahlížíme jako na realizace Poissonova procesu s intenzitou λ_f . Tu lze odhadnout ze vztahu



$$\lambda_f = \frac{N_f}{365 \{AADT\} L_{ref}}, \quad (2)$$

kde N_f je počet požárů za rok zjištěných v tunelech o úhrnné délce L_{ref} při průměrné hustotě dopravního proudu AADT. Dle údajů z Rakouska [2] $\lambda_f = 25 \cdot 10^{-9}$ požárů(vozokm) $^{-1}$. Data z Itálie [3], [4] dávají vyšší hodnoty, a to v poměru 4:3 u tří-pruhových:dvou-pruhovým tunelům, ale nezahrnují jen TB, ale i PC.

Na základě těchto údajů a aplikací věty o podmíněných pravděpodobnostech odhadneme průměrné riziko ze vztahu

$$RISK = T \{AADT\} \sum_{[i]} \sum_q \rho_Q^{[i]}(q) \int_L D^{[i]}(q, x) P_f^{[i]}(x) \kappa^{[i]}(x) \lambda_f(x) dx, \quad (3)$$

kde T [dny] je čas pro který se riziko počítá, L [km] je délka tunelu, $D^{[i]}$ [€, Kč] náklady, které je třeba vynaložit na odstranění škody. Je třeba zdůraznit, že $D^{[i]}$ je nelineární funkcí požárního výkonu q , takže jakékoliv zjednodušení vzorce (3), jakkoli lákavé, nelze obecně doporučit. Součinitel $\kappa^{[i]}$ přisuzuje celkovou intenzitu požáru jednotlivým stavům (obr. 1), tj.

$$\lambda_f^{[i]} = \kappa^{[i]} \lambda_f, \quad \sum_{(i)} \kappa^{[i]} = 1. \quad (4)$$

MODEL HYGRO-TERMO-MECHANICKÉHO POŠKOZENÍ

Základem je Künzellův-Kießlův popis transportu tepla a vlhkosti [7] vyjádřených vztahy

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\kappa}{g} \nabla p \right) + \frac{\partial w_d}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} - h_v \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \theta) - c_w \frac{\kappa}{g} \nabla p \cdot \nabla \theta + h_d \frac{\partial w_d}{\partial t}, \quad (6)$$

kde θ [°C] je teplota, p [Pa] pórový tlak, w [kgm $^{-3}$] obsah vody, κ [ms $^{-1}$] permeabilita vodní páry, g [ms $^{-2}$] gravitační zrychlení, w_d [kgm $^{-3}$] obsah dehydratované vody, ρ_c [Jm $^{-3}$ K $^{-1}$] tepelná kapacita, h_v [Jkg $^{-1}$] entalpie odpařování, h_d [Jkg $^{-1}$] entalpie dehydratace, c_w [Jkg $^{-1}$ K $^{-1}$] specifická tepelná kapacita vody a λ [Wm $^{-1}$ K $^{-1}$] je teplotní vodivost. Úloha je výrazně nelineární, což se projevuje vlivem velmi vysokých teplot zejména na sorpční izotermě (obr. 3a), permeabilitě (obr. 3d), [6], a na poklesu pevnosti betonu s teplotou (obr. 3b, c), [9]. Další podrobnosti lze najít v příloze studie [1].

Pro odprysk povrchové vrstvy betonu přijmeme konzervativní podmínku

$$\phi \rho \geq f_t(\theta), \quad (7)$$

kde ϕ [-] je pórovitost.

Soustava rovnic (5) a (6) se diskretizuje MKP a vzniklá soustava obyčejných diferenciálních rovnic prvního řádu se integruje v čase pomocí schématu Crank-Nicolsonové [1], [8].

EXPERIMENTÁLNÍ VALIDACE MODELU POŠKOZENÍ

Model byl validován na vzorcích o rozměrech 2 x 1 x 0,3 m z betonu FIFAC5 s průměsí popílku 230 kgm $^{-3}$ a vláken FORTA-FERRO 4,5 kgm $^{-3}$. Další složky: CEM I 52,5 R – 230 kgm $^{-3}$, zrna 0/4 – 705 kgm $^{-3}$, zrna 4/8 – 130 kgm $^{-3}$, zrna 8/16 – 865 kgm $^{-3}$, voda – 150 kgm $^{-3}$, vápencový prášek – 40 kgm $^{-3}$, Gleanium ACE – 4,2 kgm $^{-3}$ a POZZUTEC – 12 kgm $^{-3}$. Vzorky byly podrobeny zátěži v peci firmy PAVUS, a. s., ve Veselí nad Lužnicí. Na obr. 4a jsou porovnány naměřené a vypočtené průběhy teplot po hloubce vzorku z [m] v různých časech trvání tepelné zátěže. Hloubka odprysku 35 mm predikovaná modelem odráží téměř dokonale skutečnost. Na obr. 4b je patrný vývoj tlaku vodní páry. Jisté odchylky mezi naměřeným a vypočteným průběhem teplot po

Obr. 4 a) Porovnání vypočtených a naměřených průběhů teplot po tloušťce vzorku v různých časech tepelné zátěže (optimalizované materiálové parametry), b) vývoj pórového tlaku

Fig. 4 a) Comparison of calculated and monitored temperature evolutions along the thickness of the specimen at different time steps, b) evolution of pore pressures

Obr. 5 Typický průřez silničního tunelu se dvěma pruhy

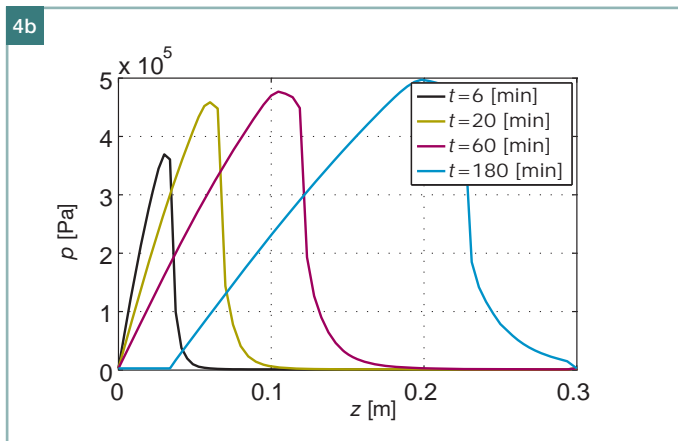
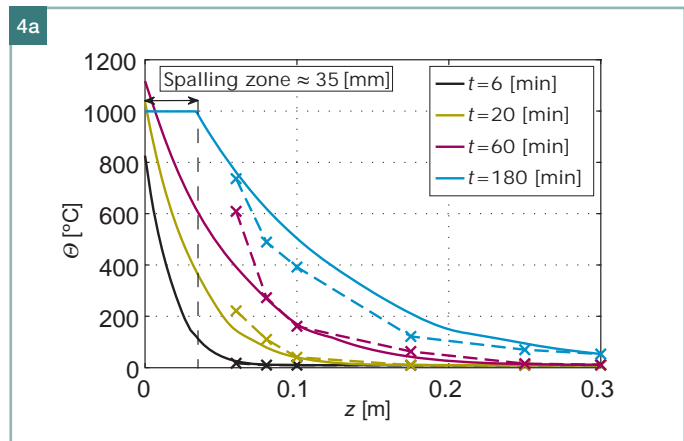
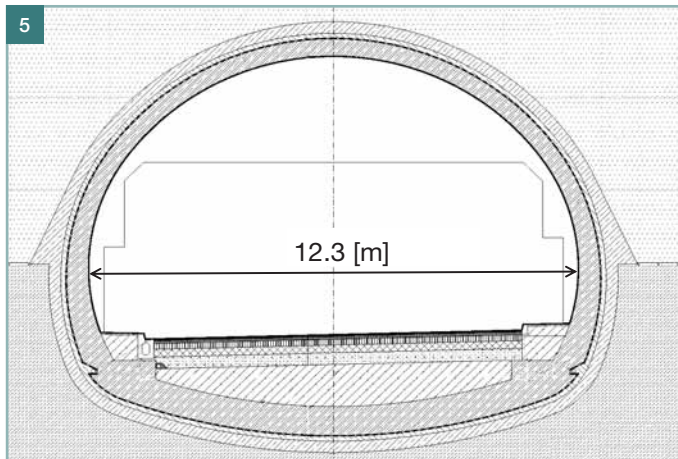
Fig. 5 Typical cross-section of the two-lane road tunnel

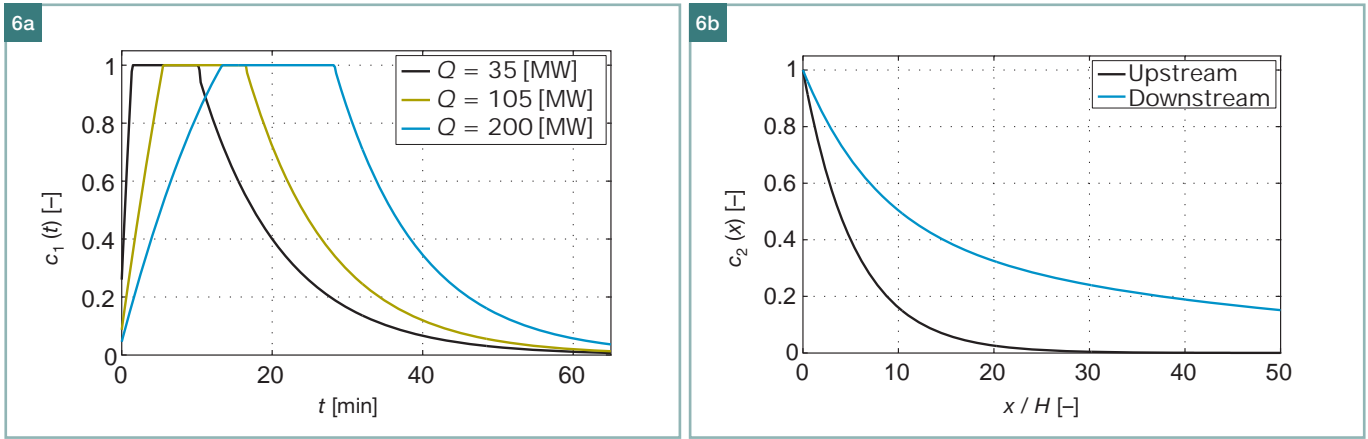
Obr. 6 a) Vývoj koeficientu c_1 v čase, b) vývoj koeficientu c_2 po délce tunelu (H je výška průřezu)

Fig. 6 a) Evolution of dimensionless coefficient c_1 in time, b) evolution of dimensionless coefficient c_2 along the length of the tunnel (H being the height of the cross-section)

Obr. 7 Porovnání rozsahu poškození při různých tepelných výkonech: a) hloubka odprysku, b) oblast s $\theta \geq \bar{\theta} = 100$ [°C]

Fig. 7 Comparison of damage range due to different heat release rates: a) depth of the spalling zone, b) area with $\theta \geq \bar{\theta} = 100$ [°C]





180 min zátěže i přes optimalizaci materiálových parametrů lze přičíst na vrub dvěma faktorům – zanedbání tlaku suchého vzduchu (projeví se po dosažení maxima tlaku vodní páry) a nevystižení vlivu poškození vzorku na permeabilitu vodní páry.

PREDIKCE RIZIKA – PŘÍPADOVÁ STUDIE

Pro ilustraci metodiky uvažujeme jednosměrný silniční tunel se dvěma pruhy na obr. 5. Jako modelovou situací předpokládáme homogenní dopravní proud, tvořený osmi PC a jedním TB v pruhu 1, a čtyřmi PC, jedním TB a jednou sériovou dvojicí TB v pruhu 2. Abychom mohli ve výpočtech zvážit délky vozidel, předpokládáme, že délka PC = Δx, délka TB = 3Δx a délka sériové dvojice = 7Δx, tj. 2 TB s odstupem Δx = 5 m. Bude-li pro jednoduchost studie zakázáno přejíždět mezi pruhy, není nutno analyzovat stacionární Markovův proces řešením Kolmogorových rovnic, nýbrž stačí napřed spočítat pravděpodobnosti základních komponent procesu (např. v pruhu 1: P₀ = 191/200 (V), P₁ = 8/200 (PC), P₂ = 3/200 (TB)). Pravděpodobnosti možných požárních skladeb (obr. 1) pak získáme za podmínky nezávislosti proudů v dílčích pruzích jako souči-

ny pravděpodobností základních komponent procesu v těchto pruzích. Paralelní skladbu TB v pruhu 1 a sérii dvou TB v pruhu 2 hodnotíme jako stav 8 na obr. 1 s tím, že prvním vozidlu ze série TB se podařilo požární nehodě uniknout. Pravděpodobnost, že alespoň jedno vozidlo TB je zasaženo požárem, je takto odhadnuta jako P_f^[1] = 0,452 [-] (součet pravděpodobností stavů 4 až 7) a P_f^[2] = 0,548 [-] (stav 8).

Vzorec (3) pro výpočet rizika se za předpokladu nezávislosti parametrů na proměnné x zjednoduší na tvar:

$$RISK = TL \{AADT\} \lambda_f \left(\sum_{q_1=5,30,100} V_{dam}^{[1]}(q_1) \rho_{Q1}(q_1) \right) \kappa^{[1]} P_f^{[1]} + TL \{AADT\} \lambda_f \left(\sum_{q_2=10,35,60,105,130,200} V_{dam}^{[2]}(q_2) \rho_{Q2}(q_2) \right) \kappa^{[2]} P_f^{[2]}, \tag{8}$$

v němž jsme škodu způsobenou konkrétním tepelným výkonem q_i vyjádřili objemem betonu V_{dam}^[i](q_i) [m³], jednak ztraceného odpryskem a jednak znehodnoceného teplotou θ ≥ θ̄. K výpočtu této veličiny, který jsme naznači-

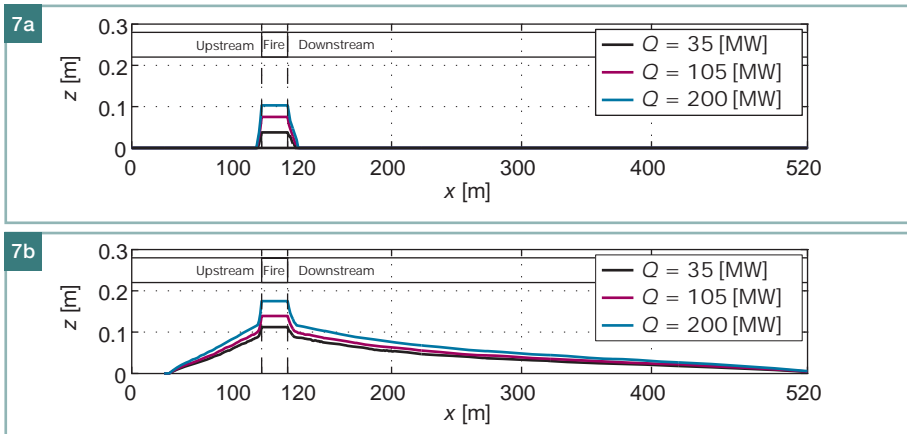
li v druhé kapitole, jsou nezbytné informace o vývoji teploty v tunelu v čase a prostoru (obr. 6a, b):

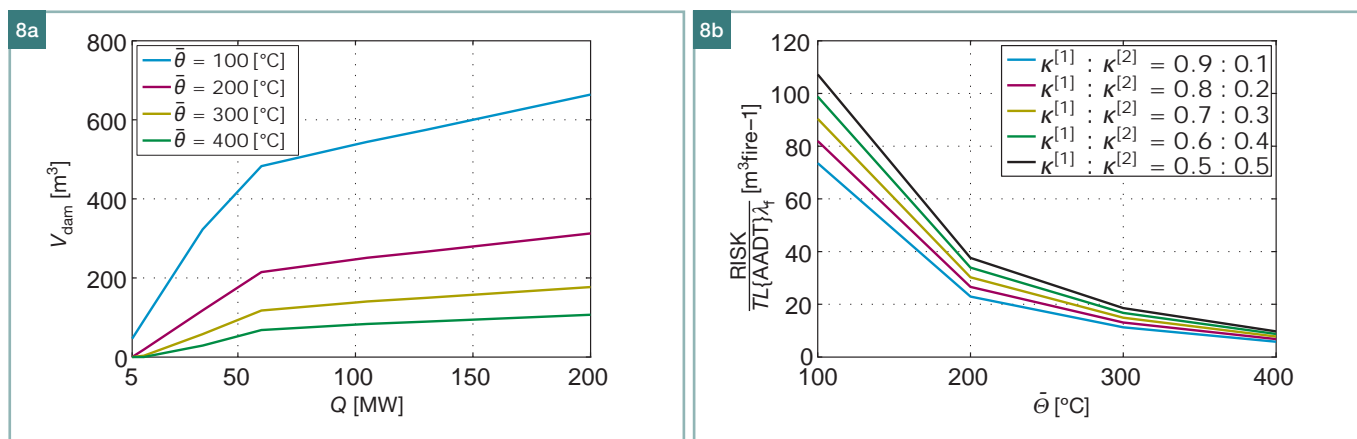
$$\theta_{max}(t, x) = c_1(t) c_2(x) \theta_{max}. \tag{9}$$

Bezrozměrné funkce, stejně jako maximálně možná teplota ve vrcholu klenby θ_{max} [°C], byly odvozeny z požárních zkoušek v tunelu v Runehamaru. Podle střednice průřezu byl předpokládán parabolický průběh teploty s θ_{max} = 0,5 θ_{max} u paty klenby. Bilanční rovnice (5) a (6) byly řešeny numericky MKP pro 2D oblast o rozměrech 0,3 × 520 m, kde d = 0,3 m je tloušťka ostění a l = 520 m je délka úseku dotčeného požárem, a výsledky pak byly interpolovány podél střednice průřezu. Pro ilustraci je vyznačen rozsah poškozené části ostění ve vrcholu klenby odpryskem (obr. 7a) a teplotou θ ≥ θ̄ = 100 [°C] (obr. 7b) jako důsledek účinků vybraných tepelných výkonů.

Zatímco diskuze o hodnotě θ_{max} ve vzorci (9) přísluší požárním expertům, volba maximálně přípustné hodnoty θ̄ bude záležet na projektantech navrhujících sanaci tunelu. V případě tunelů ražných v horninovém prostředí je k dispozici klenbový účinek obklopujícího prostředí a volba θ̄ může být poměrně odvážná. U hloubených (přesýpaných) tunelů je situace mnohem vážnější a při volbě θ̄ > 100 °C je třeba nejvyšší obezřetnosti. Volba θ̄ tak výrazně ovlivní rozsah škod, a tedy i predikované riziko.

Pro určitost jsme zvolili tyto parametry: délka tunelu L = 2 km, AADT = 17 000 vozidel.den⁻¹, T = 365 [dnů] = 1 [rok], λ_f = 30 · 10⁻⁹ požárů(vozokm)⁻¹. Protože nejsou k dispozici data o rozdělení počtu požárů na skladby s jedním TB (součinitel κ^[1]) a se dvěma TB (κ^[2]), jsou na obr. 8b při predikci rizika uvažovány všechny možné kombinace těchto součinitelů. Výsledkem je pak intervalový odhad rizika. Ze vzorce (8) a obr. 8b tak vychází, že se riziko po-





Obr. 8 a) Objemy tunelového ostění oslabeného odpryskem a znehodnoceného teplotou $\theta \geq \bar{\theta}$, b) náhodná škoda vzhledem k počtu požárních nehod ■

Fig. 8 a) Volumes of the tunnel lining degraded by spalling and high temperatures exceeding a limiting value $\theta \geq \bar{\theta}$, b) random damage relative to the number of fire accidents

hybuje v rozsahu 19 až 28 $\text{m}^3 \text{rok}^{-1}$. Pokud bychom vzali v úvahu celkový objem ostění dotčeného požárem v délce 520 m, tedy $V = 3\,463 \text{ m}^3$, bylo by relativní riziko vztažené k tomuto objemu $\text{RISK}_{\text{rel}} = 0,5$ až 0,81 %.

ZÁVĚR A DISKUSE

V příspěvku je navržen pragmatický model jako základ metodiky pro rizikovou analýzu tunelů zachvácených požárem. Snahou autorů bylo navrhnout řešení pokud možno jednoduché, přitom však vystihující skutečnost. Model má proto své přednosti, ale i nedostatky, a to jak po stránce pravděpodobnostní, tak materiálové.

Při modelování dopravního proudu jsme se omezili na stacionární procesy. Podrobnější analýza nestacionárních Kolmogorových rovnic ukázala, že pro typický proud nastává stacionární stav cca po 200 m od výchozího stanoviště (světelného návěští). Řešení nestacionárních procesů je dále podmíněno informacemi o intenzitách vý-

měny vozidel mezi pruhy, což se ovšem týká i případných simulačních modelů využívajících dynamických bayesovských sítí apod. Stále neuspokojivé jsou podklady o procentuálním zastoupení možných skladeb vozidel zachvácených požárem, stejně tak data o následných požárech po kolizi. Jejich zahrnutí by navržený model nijak nekomplikovalo. V těchto případech bude rizikový analytik nezdědka odkázán na expertní úsudek. To se týká i vývoje intenzity λ_L po délce tunelu. Z hlediska možné kolize jsou nebezpečné zejména vstupní a výstupní úseky tunelu (přechod ze světla do tmy a naopak).

Ignorovány by neměly být ani zjednodušující předpoklady modelu poškození. Zanedbání vlivu suchého vzduchu ve směsi s vodní párou by nemělo být zdaleka tak škodlivé jako zanedbání změny permeability vodní páry se vznikem trhlin v betonu. Model alespoň izotropního poškození se zdá být možným lékem na tento problém, alespoň soudě podle posledních prací Majorany a jeho spolupracovníků, např. [10].

Při uvážení všech okolností lze konstatovat, že předložený pragmatický model pro analýzu rizika je použitelný u dostatečně dlouhých tunelů. Nepochybně vyžaduje vylepšení při odhadu škody, k níž dojde poblíž portálů. Kro-

mě počítačového modelování proudu horkého plynu pomocí počítačové dynamiky proudění plynů (CFD), která ovšem má rovněž svá omezení, lze využít i možnosti expertní predikce toku plynu ve směru proudění a proti němu (srov. s obr. 6a, b).

Tento příspěvek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č. TE01020168.

prof. Ing. Jiří Šejnoha, DrSc.
e-mail: sejnoha@fsv.cvut.cz



Ing. Jan Sýkora, Ph.D.
e-mail: jan.sykora.1@fsv.cvut.cz



Ing. Eva Novotná, Ph.D.
e-mail: eva.novotna@fsv.cvut.cz



prof. RNDr. Daniela Jarušková, CSc.
e-mail: jarus@mat.fsv.cvut.cz



prof. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D., DSc.
e-mail: sejnomo@fsv.cvut.cz



všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze

Literatura:

- [1] SÝKORA, J., JARUŠKOVÁ, D., ŠEJNOHA, M., ŠEJNOHA, J. Fire risk analysis focused on damage of the tunnel lining. *Fire Safety Journal*, 2015, zasláno k recenznímu řízení.
- [2] ASFINAG, Wien, Auswertung der ASFINAG-Tunnelbrandstatistik 2006–2012, 2013.
- [3] CALIENDO, C., GUGLIELMO, M. L. D. Evaluation of traffic and fire accidents in road tunnels, and a cost-benefit analysis. *International Journal of Civil Engineering Research*, 3, 2012, s. 201–222.
- [4] CALIENDO, C., GUGLIELMO, M. L. D., GUIDA, M. A crash-prediction model for road tunnels. *Accident Analysis & Prevention*, 55, 2013, s. 107–115.
- [5] INGASON, H., LINNERMARK, A., LI, Y. Z. *Runehamar tunnel fire tests*, Tech. rep. SP Technical Research Institute of Sweden, 2011.
- [6] BAŽANT, Z. P., THONGUTHAI, W. Pore pressure in heated concrete walls: theoretical prediction. *Magazine of Concrete Research*, 31, 107, 1979, s. 67–76.
- [7] KÜNZEL, H. M., KIESSL, K. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, 1, 1996, s. 159–167.
- [8] BENEŠ, M., ŠTEFAN, R., ZEMAN, J. Analysis of coupled transport phenomena in concrete at elevated temperatures. *Applied Mathematics and Computation*, 239, 2013, s. 7262–7274.
- [9] LIE, T. T., KODUR, V. R. Thermal and mechanical properties of steel fibre-reinforced concrete at elevated temperatures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23, 4, 1996, s. 511–517.
- [10] MAZZUCCO, G., MAJORANA, C. E., SALOMONI, V. A. Numerical simulation of polypropylene fibres in concrete materials under fire conditions. *Computers & Structures*, 154, 2015, s. 17–28.