

SNIŽOVÁNÍ NÁKLADŮ A ZVYŠOVÁNÍ BEZPEČNOSTI SILNIČNÍCH TUNELŮ

REDUCING COSTS AND IMPROVING SAFETY OF ROAD TUNNELS

PETR POSPÍŠIL

ÚVOD

Současné investice do silniční a železniční infrastruktury jsou v mnoha zemích zpochybňovány. Například švýcarská federální vláda oznámila, že prostředky na provoz a údržbu silniční a železniční infrastruktury docházejí. V Austrálii zbankrotovala řada soukromě financovaných tunelů. V České republice v poslední době vedly politické tlaky k masivnímu snižování rozpočtů. Řada příkladů podobných problémů existuje i v dalších zemích.

Jedním z aspektů, které zvyšovaly náklady mnoha staveb, jsou nové bezpečnostní standardy. Normativní směrnice pro bezpečnostní vybavení tunelů, obzvláště větrání, byly vytvořeny po několika požárech v evropských silničních tunelech před více než deseti lety, hlavně s odvoláním na požáry v tunelu Mont Blanc a Tauernském tunelu v roce 1999. Předpokládá se, že tunely odpovídající novým směrnici se považují za bezpečnější než staré tunely. Avšak ne všechny požadavky skutečně vedou k bezpečnějším tunelům. Do jisté míry se velké částky vynakládají na investice a provoz zařízení, které velmi málo přispívají ke zvyšování bezpečnosti a ani nepřinášejí zlepšení v ostatních směrech. Špatná kvalita prací je naneštěstí běžná a bezpečnostní vybavení často není kompletně vyzkoušené.

Směrnice se často chápou jako striktní zákony. V případě jakékoli škody v důsledku havárie v tunelu vyžadují místní úřady a pojišťovny soulad s platnými směrnici a normami, bez ohledu na jejich užitečnost. Toto myšlení může ve skutečnosti bránit jakémukoli zlepšování. Z toho důvodu je potřebné, aby tyto směrnice a normy byly přepracovány.

Požadavky na bezpečnostní opatření vedoucí k tak vysokým nákladům, že se výstavba tunelu zpožďuje nebo se od ní kvůli finančním omezením ustupuje, by se měly zpochybnit a měly by se porovnat hlavní přínosy tunelu jako takového, jako jsou zvýšení bezpečnosti a kapacity tunelu optimalizací trasování tunelu nebo snížení dopadu na životní prostředí v porovnání s komunikací ve volném terénu.

Namísto následujících závazných předpisů se navrhuje hodnocení bezpečnostních opatření na základě rizik. Bezpečnostní opatření by se měla posuzovat podle nákladů na jejich realizaci a jejich přínosů, pomocí odhadů nákladů na zachráněný život a nákladů na odvrácení škody. V tomto článku je ukázán praktický přístup ke snižování nákladů současně se zvyšováním bezpečnosti.

CÍLE OCHRANY

Hlavní cíle jakýchkoli bezpečnostních opatření jsou, v pořadí podle důležitosti, následující:

1. Na prvním místě předcházet nehodám.
2. Minimalizovat škody na životech a zdraví osob zúčastněných na nehodě, pokud k ní skutečně dojde.
3. Chránit konstrukci tunelu samotného, pokud je to pro daný tunel považováno za důležité.

INTRODUCTION

The current investments in road and rail infrastructure are being questioned in many countries. As an example, the Swiss Federal government announced that the means for the operation and maintenance of the road and rail infrastructure are running short. In Australia, many privately financed tunnels went bankrupt. In the Czech republic, recent political pressure lead to a massive cut in budgets. There are many other examples of similar problems in other countries.

One of the aspects that raised costs in many projects are new safety standards. Prescriptive guidelines for tunnel safety equipment, particularly ventilation, have been developed after some serious fire incidents in European road tunnels more than a decade ago, with particular reference to the Mont Blanc and Tauern tunnel fire incidents in 1999. Tunnels which comply with the new guidelines are assumed to be safer than older tunnels. However, not all of the requirements actually lead to safer tunnels. To some extent significant sums are spent on investment and operation of facilities, which contribute very little to enhancing the safety, nor does it bring about improvements in other aspects. Poor workmanship is unfortunately common, and often the safety equipment is not even fully tested.

Guidelines are often understood as strict laws. In case of any damage due to an incident in a tunnel, legal authorities and liability insurances ask for compliance with current guidelines and norms, regardless of their usefulness. This thinking may actually impede any improvement and progress. Therefore, the guidelines and norms must be reformed.

The demand for safety measures which lead to such high costs that the construction of the tunnel is delayed, or even cancelled due to financial restraints, should be questioned and compared with the principal benefits of the tunnel itself, like improving traffic safety and capacity by optimising road alignments, or reducing the environmental impact in comparison with an open road.

Instead of following prescriptive regulations, a risk based evaluation of safety measures is proposed. Those measures should be assessed by their costs and benefits by estimations of 'costs per life saved', and 'cost of avoided damage'. A practical approach to reducing costs while improving safety is presented in this article.

PROTECTION GOALS

The main goals of any safety measures are, in order of importance:

1. To prevent incidents in the first place
2. To minimise damage to life and health of the involved persons if an incident does occur
3. To protect the tunnel structure itself, if deemed important for the particular tunnel

The first goal may be achieved by systemic and structural provisions, traffic management and by informing and educating

První cíl může být dosažen systematickými a konstrukčními opatřeními, řízením dopravy a informováním i vzděláváním řidičů. Tento článek je zaměřen na technická opatření, obzvláště na únikové trasy a větrání, které slouží druhému a třetímu cíli poté, co došlo k mimořádné události.

Pro každý hlavní cíl se dají definovat konkrétní cíle ochrany, například aby se osobám v tunelu po vypuknutí požáru umožnil únik do nezakouřené zóny před tím, než dorazí jakákoli pomoc (sebezáchrana). Tento scénář vede k požadavku na možné řízení odvodu kouře.

HODNOCENÍ RIZIK

V uplynulých letech byla vypracována řada analýz rizik pro silniční tunely, vytvořilo se hodně modelů a napsalo se mnoho literatury k tomuto problému. Dobrý přehled se dá nalézt v dokumentu PIARC [1] a v českých TP 229 [2]. Některé z použitých programů jsou založené na standardních tabulkových procesorech, které pro tento druh použití nejsou nijak zvlášť užitečné [7]. Příkladem vhodně použitelného nástroje je TURAM [8], který je sofistikovaným standardizovaným programem pro posuzování silničních tunelů. Byl již úspěšně použit při posuzování mnoha tunelů ve Švýcarsku a Německu [9].

Obecné závěry hodnocení rizik se dají shrnout takto:

- Nejvyšším rizikovým scénářem je srážka.
- Druhým rozhodujícím rizikem je požár v tunelu, který je o jeden řád nižší, než je riziko srážky.

Pravděpodobnost srážek a požárů je obvykle v přímém vztahu k délce tunelu, způsobu dopravy (tj. jednosměrný nebo obousměrný provoz), hustotě dopravy a procentu těžkých nákladních vozidel. Další vliv na pravděpodobnost požárů má podélný sklon přílehlých komunikací, jelikož vede k přehřívání motorů a brzd.

Další scénáře, jako je rozlití nebezpečných látek nebo výbuchy, jsou mnohem méně pravděpodobné. Pro posuzování jakýchkoli reálných pravděpodobností takových událostí nejsou k dispozici žádná data. Přesto jsou užitečné pro srovnávání rizik různých řešení, obzvláště co se týče povolení přepravy nebezpečných látek.

Z toho důvodu se bezpečnost tunelu řídí prvořadě rizikem srážek a rizikem požárů. Tato kritéria jsou definována například v německém „první krok“ hodnocení rizik [3]. Existuje pouze několik tunelů, ve kterých dochází opakovaně k požárům se statisticky relevantní frekvencí. Příklady takových tunelů jsou:

- V tunelu Elbe v Hamburku (Německo), který má čtyři tunelové trouby o délce asi 3 km a intenzita dopravy v něm je vyšší než 120 000 vozidel za den, dochází v průměru k 7 požárům za rok. Od uvedení tunelu do provozu v roce 1975 v něm v důsledku požáru nedošlo k žádným zraněním.
- Silniční tunel Gotthard (Švýcarsko) je obousměrný s délkou kolem 17 km a intenzitou dopravy 17 000 vozidel za den. Před rokem 2002 v něm docházelo průměrně ke čtyřem požárům za rok. Po katastrofálním požáru 24. 10. 2001 se za pomoci přísných opatření v řízení dopravy četnost požárů snížila. Přesto k požárům v tomto nejdelším alpském tunelu stále pravidelně dochází.

Takové „vysoce rizikové“ tunely vyžadují vyšší úroveň bezpečnostních opatření ve srovnání s průměrným tunelem. Nicméně většina požárů nevede k žádným zraněním. Některé požáry v tunelech ani nejsou zaznamenány. V mnoha tunelech nebyly zaznamenány vůbec žádné požáry po celou dobu jejich existence. V těchto případech by jakákoli opatření ke snížení rizika požáru mohla být pokládána za sporná.

drivers. This article focuses on technical measures, particularly escape routes and ventilation, which serve the second and third goals after the occurrence of an incident.

For each main goal, specific protection goals can be defined, e.g. to enable the persons in the tunnel to escape in a smoke free zone after the breakout of a fire, before any assistance arrives (self rescue). This scenario leads to the demand for possible smoke control.

RISK ASSESSMENT

Many risk analyses for road tunnels have been worked out in previous years, a number of models have been established and a lot of literature has been written about the issue. A good overview can be found in the PIARC document [1] and Czech TP 229 [2]. Some of the applied programs are based on standard spreadsheet programs, which are not particularly useful for this type of application [7]. An example of a suitably applicable tool is TURAM [8], which is a sophisticated standardised program for the assessment of road tunnels. It has been successfully used for the assessment of many tunnels in Switzerland and Germany [9].

The general conclusions of risk assessments can be summarised as follows:

- The highest risk scenario is a collision.
- The second authoritative risk is a tunnel fire, with a risk of one magnitude lower than the collision risk.

The probability of collisions and fires is usually directly related to tunnel length, traffic management (i.e. unidirectional or bidirectional), traffic volume and percentage of heavy goods vehicles. The slope of the adjoining roads has an additional influence on the probability of fires, leading to a possible overheating of engines and brakes.

Other scenarios, like spilling of dangerous substances, or explosions, are much less likely. There is no data available to evaluate any realistic probabilities of such events. Nevertheless, they are useful for comparative risk assessments, particularly regarding the permission to carry dangerous goods.

Therefore the safety of a tunnel is governed in the first order by the risk of collisions and the risk of fires. These criteria are defined, e.g., in the German 'first step' safety assessment [3]. There are only a few existing tunnels in which fires occur with a statistically relevant frequency. Examples of such tunnels are:

- The Elbe tunnel in Hamburg (Germany), consisting of 4 tubes with a length of approx. 3 km, and more than 120'000 veh/day, has an average of 7 fire incidents per year. Since the opening of the tunnel in 1975, there have been no casualties due to fires.
- The Gotthard road tunnel (Switzerland), consisting of a single tube with a length of approx. 17 km, and 17'000 veh/day, had an average of 4 fire incidents per year before 2002. After the catastrophic fire on the 24.10.2001, the fire incident rate has been reduced with the aid of strict traffic management measures. Fires do, however, still regularly occur in this longest alpine tunnel.

Such 'high risk' tunnels require a greater level of safety measures when compared to the average tunnel. Nevertheless, the majority of fire incidents do not lead to any casualties. Some fires in tunnels are not even recorded. In many tunnels there have been no recorded fire incidents at all over their operating lifetime. In these cases, any measures to reduce fire risk might be questioned.

For a detailed risk assessment, many other aspects would have to be considered. Besides the operational risk of a road

Pro podrobné hodnocení rizik by se musela vzít do úvahy spousta dalších hledisek. Vedle provozního rizika silničního tunelu je zapotřebí počítat s riziky v průběhu výstavby a uvádění do provozu i při pracích na údržbě. V mnoha případech je průměrný počet zranění v průběhu výstavby přibližně stejně velký jako v průběhu provozu tunelu. Zvláště při rekonstrukcích stávajících tunelů tak, aby odpovídaly novým bezpečnostním standardům, mohou výsledné dopravní překážky zvyšovat riziko pro řidiče.

Každá analýza rizik je založena na zjednodušení. Pouze odborná znalost může zajistit, aby se použily správné předpoklady a zjednodušení.

ANALÝZA SCÉNÁŘŮ

U mnoha modelů analýzy rizik jsou důsledky založeny pouze na předpokladech, například tunel s odsáváním kouře se považuje za bezpečnější než tunel, který má pouze podélné větrání. Tento přístup může vést k nesprávným závěrům.

Pro podrobné hodnocení rizik a pro kvantifikaci následků požárů by se musela vypracovat analýza scénářů pomocí kombinace dynamického modelu šíření kouře v tunelu s modelem evakuace (simulace sebezáchranou lidí v tunelu). V některých zvláštních případech by se do modelu mohly zahrnout i škody na konstrukcích.

Pravděpodobné a kritické scénáře se musí vyhodnocovat hlavně pomocí analýzy stromu událostí. Mají se simulovat pro všechny varianty [11]. V každém případě praxe ukazuje, že se mohou vyskytnout ještě horší scénáře, na které dříve nikdo nepomyslel.

Varianty užitečných opatření, například různé systémy větrání a vzdálenosti mezi únikovými cestami, jsou definovány tak, jak je popsáno dále v tomto článku. To může vést k desítkám nebo i stovkám simulačních souborů. Tyto simulace se provádějí přiměřeně dobře pomocí jednorozměrného simulačního nástroje. Samozřejmě zvolený simulační nástroj se musí potvrdit srovnáním s naměřenými daty.

Modelování 3-D pomocí výpočetní dynamiky kapalin (Computational Fluid Dynamics, CFD) obecně není pro takové aplikace užitečné. Tunel je v první řadě jednorozměrný systém. Simulace CFD jsou časově dost náročné, takže omezují počet simulací a mohou být těžko potvrditelné. Na druhou stranu CFD je mocný nástroj pro vyšetřování speciálních problémů, jako jsou podmínky proudění ve složitých tvarech nebo jevy stratifikace kouře.

Simulační nástroje mohou velmi účinně ukázat, jak mohou být osoby v průběhu požárů vystaveny účinkům kouře. Jsou také účinné při zjišťování, kde jsou hranice opatření pro větrání tím, že přihlížejí k prodlení ve zjištění požáru a k dynamickému vývoji podmínek proudění po spuštění systému požárního větrání. Nepředpokládá se, že by všechny osoby, které jsou vystaveny účinkům kouře, zemřely, avšak při několika jednoduchých předpokladech, co se týká toxicity a doby expozice, se dá pro každý scénář a každou variantu odhadnout počet výsledných zranění.

OPATŘENÍ

Seznam nejdůležitějších opatření ke zvýšení požární bezpečnosti v silničních tunelech je následující:

- **Způsob dopravy**

Umožnění volného proudu dopravy v jednom směru je to nejúčinnější opatření, které podstatně snižuje riziko srážky a také zmenšuje nároky na větrání a únikové cesty. Jelikož to často vyžaduje stavbu další tunelové trouby, je to také to nejnákladnější opatření.

tunnel, the risks during construction and implementation, as well as for maintenance works need to be taken into account. In many cases, the average number of casualties during tunnel construction is of approximately the same magnitude as it is during the tunnel operation. Particularly when refurbishing existing tunnels to meet new safety standards, the resulting traffic obstructions can increase the risk to drivers.

Any risk analysis is based on simplification. Only expert knowledge can assure that the 'right' assumptions and simplifications are applied.

SCENARIO ANALYSIS

In many basic Risk Analysis models, consequences are based only on simple assumptions; e.g. a tunnel with smoke extraction is considered to be safer than one with pure longitudinal ventilation. This approach may lead to wrong conclusions.

For a detailed assessment of the fire risk and to quantify the consequences of fires, a scenario analysis would have to be performed by combining a dynamic model of smoke spread in the tunnel with an evacuation model (simulation of self rescue of people in the tunnel). In some special cases, structural damages might be included in the model.

Probable and critical scenarios must be evaluated, preferably by an event tree analysis, and are to be simulated for all variants [11]. In any case, practice shows that worse scenarios can occur, of which nobody has previously thought of.

Variants of useful measures, e.g. different ventilation systems and distances between escape routes are defined, as is described later in this article. This may lead to dozens or even hundreds of simulation sets. Such simulations are performed reasonably well using a one-dimensional simulation tool. Of course, the simulation tool chosen must be validated against measured data.

3-D modelling using Computational Fluid Dynamics (CFD) is generally not useful for such applications. A tunnel is in the first order a one-dimensional system. CFD simulations are quite time consuming, therefore limiting the number of simulations, and can be difficult to validate. On the other hand, CFD is a powerful instrument to investigate special problems, such as flow conditions within complex geometries, or stratification phenomena.

Simulation tools can very effectively show how persons may be exposed to smoke during fire incidents. They are also effective at showing where the limits of the ventilation measures are, by taking into account the delay of detection and dynamic behaviour of flow conditions after the start-up of the fire ventilation system. Not all persons who are exposed to smoke are assumed to die, but with some simple assumptions about toxicity and exposure time, the number of resulting casualties can be assessed for each scenario and each variant.

MEASURES

The most important measures to improve fire safety in road tunnels are listed as follows:

- **Traffic management**

Enabling free flowing unidirectional traffic is the most effective measure, reducing the collision risk significantly and reducing also the demands for ventilation and escape routes. Because this usually requires the construction of an additional tunnel tube, it is also the most expensive measure.

Measures limiting the traffic, like drop systems or alternating unidirectional traffic in single tube tunnels improve safety without any investment, but obstruct the traffic on adjoining

Opatření k omezení dopravy, jako jsou dávkovací systémy nebo střídavá jednosměrná doprava v jedné tunelové trubě, zvyšují bezpečnost bez jakýchkoli dalších investic, avšak překážejí dopravě na přílehlých komunikacích. Výsledné snížení kapacity komunikace nemusí být politicky průchodné a může být použitelné pouze dočasně.

- **Tuneloví dispečeré a systémy řízení**

Když za správnou reakci na nehodu odpovídají tuneloví dispečeré, měly by být požadavky na výběr, vzdělávání, výcvik a pravidelná cvičení dispečerů velmi přísné. To ale vede k velkým výdajům. Musí se počítat i s rizikem lidské chyby. Z toho důvodu se počítá s automatickou reakcí řídicího systému. Tunely by měly být schopné pracovat autonomně pomocí svých řídicích systémů s tím, že zásah dispečera potřebují pouze v mimořádných případech. V tomto směru nemá zřizování řídicích center s obsluhou u každého tunelu velký smysl. Lepší je, když může centrální řídicí středisko mít dohled nad skupinou tunelů. Výše uvedené tunely s velkým rizikem mohou být výjimkou.

- **Krátké vzdálenosti mezi únikovými cestami**

V tunelech s obousměrnou dopravou anebo s jednosměrným provozem, kde dochází k dopravním zácpám, kratší vzdálenosti mezi únikovými cestami podstatně zlepšují schopnost úniku ve fázi sebezáchrany. Umožňují i lepší přístup záchraných jednotek ve druhé fázi.

U hloubených tunelů se dvěma trubami a dělicí stěnou nevyžaduje vytvoření propojení mezi tunelovými trubami vysoké dodatečné náklady. Spojení mezi dvěma raženými tunely je mnohem nákladnější a samostatné únikové tunely pro jednotrubní tunely jsou dokonce ještě dražší.

- **Detekce mimořádné události**

Detekce kouře založená na měření viditelnosti v tunelu se ukázala jako neúčinnější a nejspolehlivější metoda detekce požárů. Investiční náklady a náklady na údržbu jsou u této metody nízké. Dokonce i v tunelech bez větrání nebo jiných zařízeních umožňuje rychlá detekce uzavření tunelu a rychlé zmobilizování záchraných jednotek.

Detekce požáru lineárními tepelnými čidly je ve většině případů příliš pomalá, a čidla nejsou schopná zjistit doutnající požáry. Detekce požáru videokamerami je velmi nespolehlivá a má se používat pouze pro upozornění dispečerů.

- **Podélné větrání s pevným nastavením**

Jedná se o nejjednodušší systém větrání, který se hodí hlavně do tunelů s volným proudem jednosměrné dopravy, u kterých nezáleží na jejich délce. Cílem je hnát kouř jedním směrem k výjezdovému portálu tunelu a vytvářet nezakouřenou bezpečnou zónu, ve které jsou zablokována vozidla s pasažéry.

- **Řízené podélné větrání**

U tunelů s obousměrnou dopravou anebo s jednosměrným provozem, kde dochází k dopravním zácpám, musí být proudění vzduchu řízeno, aby se zabránilo změně ve směru proudění a zpomalil se pohyb kouře na rychlost, která je nižší, než je předpokládaná rychlost úniku osob (např. 1,5 m/s podle PIARC [4]). Tímto způsobem je i možné podpořit stratifikaci kouře. Vyžaduje se regulace v uzavřeném cyklu založená na přesných a spolehlivých měřeních proudění a na spojitě pracujících ovladačích (např. ventilátory s měniči otáček). Ve srovnání s pevnými nastaveními jsou náklady mnohem vyšší, vyžadující přísné požadavky na implementaci, pravidelné zkoušky a kalibraci přístrojů. Zvyšuje se i počet možných zdrojů chyb. U krátkých tunelů nejsou obecně tato opatření užitečná, a proto

roads. The resulting reduction of the road capacity may not be politically feasible, and only temporarily applicable.

- **Tunnel operators and control systems**

When tunnel operators are responsible for the proper reaction to an incident, the requirements for the selection, education, training and regular exercising of the operators should be very strict, which leads to high expenses. The risk of human error must also be taken into account. Therefore, an automatic response by the control system is envisaged. Tunnels should be able to operate autonomously using their control system, only requiring a response from an operator in extraordinary cases. Providing a manned control center for each tunnel does not make a lot of sense in this regard. Preferably, a central control center can supervise groups of tunnels. High risk tunnels, as mentioned above, may be an exception.

- **Short distances between escape routes**

In tunnels with bidirectional or congested unidirectional traffic, shorter distances between escape routes significantly improve the ability to escape during the self rescue phase. They also allow better accessibility for emergency services in the second phase.

For cut and cover tunnels, with two tubes and a dividing wall, the connections between the tubes don't require high additional costs. Connections between two bored tunnels are much more expensive, and separate escape tunnels for single tube tunnels are more expensive again.

- **Incident detection**

Smoke detection based on the measurement of visibility in the tunnel has been proven to be the most effective and reliable method of detecting fires. Investment and maintenance costs for this method are low. Even in tunnels without ventilation or other equipment, a fast detection enables tunnel closure and emergency services to be alerted quickly.

Fire detection by linear thermal sensors is too slow in most cases and is unable to detect smouldering fires. Video smoke detection is very unreliable and is only to be used to alert operators.

- **Longitudinal ventilation with fixed settings**

This is the simplest ventilation system, and is mainly useful in tunnels with free flowing unidirectional traffic, independent of their length. The goal is to drive the smoke in one direction, towards the exit portal of the tunnel, creating a smoke free, safe zone where the vehicles and their occupants are blocked.

- **Controlled longitudinal ventilation**

In tunnels with bidirectional or congested unidirectional traffic, the airflow must be controlled to prevent change of flow direction, and to slow down smoke movement to a velocity that is inferior to the assumed escape velocity of persons (e.g. 1.5 m/s according to PIARC [4]). That way, also a possible stratification might be supported.

A closed-loop control, based on precise, reliable flow measurements and continuous actuators (e.g. jet fans with frequency converters) is required. In comparison with fixed settings, the expenses are much higher, requiring strict demands for implementation, regular testing and calibration of instruments. This also increases the number of possible sources of error.

In short tunnels, these measures are generally not useful, and therefore the fixed setting 'ventilation switched off / no mechanical ventilation' is appropriate.

- **Smoke extraction**

In long tunnels with bidirectional or unidirectional traffic at a standstill, a smoke extraction system may be useful. In the event of a fire, the smoke zone in the tunnel can be quickly and effectively brought to a minimum.

se u nich hodí pevné nastavení strojního větrání systémem „zapnuto / vypnuto“.

- **Odsávání kouře**

U dlouhých tunelů s obousměrnou nebo jednosměrnou dopravou, která je v klidu, může být užitečný systém s odsáváním kouře. V případě požáru se může zakouřená zóna v tunelu rychle a účinně zmenšit na minimum. Systém s odsáváním kouře obecně vede k výjimečně vysokým nákladům z důvodu potřeby výstavby větracích kanálů a strojoven vzduchotechniky, požárních klapek, sacích ventilátorů a systémů jejich napájení a řízení. Navíc se musí provádět stejná opatření jako u podélného větrání. Musí se brát v úvahu i dodatečné riziko pro pracovníky v průběhu výstavby kanálů a strojoven a i pracovníků údržby při obsluze zařízení.

- **Pevný hasicí systém**

Sprinklery, skrápěcí zařízení nebo systémy vytvářející vodní mlhu mohou být účinné při hašení u mnoha scénářů, ale také vedou k vysokým nákladům souvisejícím s počáteční investicí, údržbou a pravidelným zkoušením. Je u nich i riziko náhodného spuštění.

- **Hasičské stanice**

Hasiči jsou při snižování rizika požáru užiteční, pouze pokud mohou dorazit na místo během několika minut po vzniku mimořádné události. Musí se vzít v úvahu náklady na hasičské stanice s obsluhou u tunelových portálů spolu s náklady na vybavení a osobní náklady včetně vzdělávání a výcviku.

- **Požární ochrana konstrukcí**

Ochrana konstrukce tunelu je užitečná tam, kde nelze připustit její zřícení. Pro bezpečnost života se může zanedbat účinek ochrany konstrukce s ohledem na to, že za podmínek, které vedou k poškození konstrukce, by nikdo z uživatelů tunelu a hasičů nepřežil.

Platí obecná zásada, že to nejjednodušší opatření je obvykle to nejlepší. Je pravděpodobné, že se zvyšující se složitostí technického systému se sníží spolehlivost a dostupnost a náklady na údržbu, pravidelné zkoušení a eliminování chyb se progresivně zvýší. Stavební opatření jsou obecně jednoduchá a účinná, avšak také nejdražší.

HAŠENÍ POŽÁRŮ

Hasiči mohou být při hašení požárů v tunelu velmi efektivní, pokud dorazí během pár minut po zjištění požáru. Aby to bylo možné, jsou potřebné trvale obsazené hasičské stanice na tunelových portálech. Náklady na hasičské stanice, vybavení a osobní náklady jsou enormní a jsou skutečně praktické pouze u tunelů s vysokými riziky, kde důsledky požáru a zřícení konstrukce nelze tolerovat. Může se jednat o případy, kdy náklady na sanaci po požáru by byly výjimečně vysoké, například u tunelů podcházejících řeky, městské tunely s budovami v nadloží nebo tam, kde by došlo ke ztrátě výnosu z mýtného v případě jejich uzavření. Příkladem je tunel Elbe v Hamburku.

U většiny tunelů není hašení požárů prioritou. Nejvyšší prioritou je, aby mohli lidé v případě požáru uniknout ve fázi sebezáchary. Záchranné jednotky, které přijedou později, mohou pomoci s dalším zachraňováním. Osoby v bezprostřední blízkosti požáru, které nebyly schopné uniknout v prvních několika minutách (ve fázi sebezáchary), by se mohly považovat za ztracené. Pokus o hašení požáru by se měl uskutečnit, až když je to proveditelné a bez dalšího rizika pro hasiče. Rozhodnutí o tom je v pravomoci velitele jednotky požární ochrany. V důsledku toho by se s požadavky na jednotky požární ochrany mělo počítat pouze u tunelů s vysokým rizikem a u většiny ostatních tunelů se mohou vypustit.

A smoke extraction system generally leads to extraordinarily high costs due to the need for the construction of ducts and ventilation plants, as well as dampers, exhaust fans, and their power supply and control systems. Additionally, the same measures as for controlled longitudinal ventilation have to be applied.

The additional risk for workers during the construction of ducts and plants, and also maintenance staff whilst servicing the equipment, must be taken into account as well.

- **Fixed fire fighting system**

Sprinklers, deluge or fog systems may be effective in fire suppression for many scenarios, but also lead to high costs through initial investment, maintenance and regular testing. They also carry the risk of accidental discharge.

- **Fire fighting stations**

Fire fighters are only useful for the reduction of fire risk if they can arrive onsite within a few minutes of an incident occurring. The costs of having manned fire fighting stations at the tunnel portals, together with equipment and personnel costs, including education and training, have to be taken into account.

- **Structural fire protection**

Protecting the tunnel structure is useful when a collapse would not be tolerated. For life safety, the effect of structural fire protection can be neglected, considering that under the conditions that lead to structural damage there would neither be surviving tunnel users nor fire fighters.

As a general rule, the simplest measure is usually the best. With the increasing complexity of a technical system, the reliability and availability will likely decrease, and the expenses for maintenance, regular testing and error elimination increase progressively. Constructional measures are generally simple and effective, but also most expensive.

FIRE FIGHTING

Fire-fighters can be very effective in the suppression of tunnel fires, when they arrive within few minutes of fire detection. To enable this, permanently occupied fire fighting stations at the tunnel portals are required. The expenses for fire fighting stations, equipment and personnel costs are enormous, and are only really practical for high risk tunnels, where the consequences of a fire and structural collapse cannot be tolerated. This may be the case when the costs for refurbishment after a fire incident would be extraordinarily high, e.g. for tunnels crossing below a river, city tunnels with buildings above the tunnel or for roads with loss of revenue from tolls in the case of closure. An example for that is the Elbe tunnel in Hamburg.

For most tunnels, extinguishing the fire is not the priority. The highest priority is that people are able to escape during the self-rescue phase. Emergency services arriving later may assist with the additional rescue. Persons in the immediate vicinity of the fire who were not able to escape within the first few minutes (self-rescue phase) might be considered as lost. Extinguishing the fire should only be attempted when feasible and without further risk to the fire fighters. The decision is within the responsibility of the fire brigade commander.

The consequence is, that demands from fire brigades to support fire fighting should only be taken into account in high risk tunnels, and can be omitted in most other tunnels.

As an alternative to fire fighting stations, fixed fire fighting systems (FFFS) could be considered. Sprinkler, deluge and fog systems have been proven to be effective in fire suppression in many tests and some real incidents (e.g. the Burnley tunnel fire

Jako alternativa hasičských stanic je možné zvažovat pevné hasicí systémy. U sprinklerů, skrápěcích zařízení nebo systémů pro vytváření vodní mlhy se musí prokázat, že jsou účinné při mnoha požárních testech a v případech některých reálných požárů (například požár v tunelu Burnley v australském Melbourne). Mohly by riziko požáru značně snížit. Nicméně analýza nákladů a přínosů ukazuje, že u takových zařízení je pravděpodobnost vzniku poruchy a že jsou obecně vhodná pouze pro tunely s vysokým rizikem.

PRAKTICKÁ SPOLEHLIVOST

Co se v praxi zvažuje, je implementace zvolené koncepce a realizace, řízení a provoz navrženého systému. V současných směrnících nejsou žádné požadavky na zajištění kvality bezpečnostních zařízení v silničních tunelech. Za příklad lepšího přístupu se mohou považovat normy pro průmyslové závody a elektrárny.

Běžně se diskutuje o ventilátorech a požárních klapkách, avšak praxe ukazuje, že k většině případů jejich selhání dochází v důsledku poruch dodávky proudu. V důsledku toho musí mít spolehlivost dodávky proudu vyšší prioritu než spolehlivost jednotlivého větracího zařízení.

Hlavním posláním požárního větrání je řízení šíření kouře. Aby se toho dosáhlo, musí se definovat podrobné scénáře zkoušek pro všechny možné stavy řídicích systémů, včetně druhů selhání, defektů a poruch činnosti zařízení. Pro každý z těchto scénářů se musí stanovit kritéria přijatelnosti. Zkoušky zahrnují funkci jednotlivého systému (jako je větrání) i celkovou součinnost všech bezpečnostních zařízení v tunelu [10]. Zkoušky kouřem slouží pouze pro vizualizaci činnosti požárního větrání pro některé vybrané scénáře.

U provozovaných tunelů se musí provádět i pravidelná kalibrace přístrojů a zkoušky zařízení a řídicích systémů spolu se správným servisem a údržbou. To se často zanedbává, což vede k tomu, že se zařízení s vysokými investičními náklady stanou po několika letech neschopnými provozu.

ODHAD NÁKLADŮ

Náklady spojené s mimořádnou událostí se musí zvažovat společně s její pravděpodobností, tj. musí ukázat finanční ztráty během stanoveného období.

Odhady nákladů často berou v úvahu investiční náklady. To vede k pokřivení obrazu o skutečných výdajích na stavbu. V důsledku toho se musí přihlídnout ke všem nákladům potřebným na to, aby se zaručilo, že bezpečnostní opatření bude plnit svůj účel účinně a spolehlivě po celou dobu životnosti tunelu. Musí se vzít v úvahu následující body:

- Inženýrská příprava a řízení projektu (stavby)
- Investiční náklady na výrobu a uvádění do provozu
- Zkoušky při předání a pravidelné zkoušky za provozu
- Provozní náklady (energie, provozní a spotřební materiály)
- Údržba
- Renovace

Definování ceny lidského života je nakonec politickým závazkem. Běžné hodnoty jsou v USA od 3 do 8 milionů USD/život [5], v Německu 2 miliony USD/život [6]. K fyzickým zraněním různé závažnosti by se také mělo přihlížet, avšak pro ně by se rizika a náklady těžko odhadovaly.

Prohlášení „Musí se zachránit každý život bez ohledu na náklady“ je morálně sporné, přihlídneme-li k tomu, že při omezeném rozpočtu by se vhodnými opatřeními dalo zachránit více životů v jiné oblasti.

in Melbourne, Australia). They might reduce the fire risk significantly. Nevertheless, an analysis of costs and benefits shows that such equipment also bears the probability of malfunction, and is generally only useful for high risk tunnels.

PRACTICAL RELIABILITY

What counts in practice is the implementation of the chosen concept and the realisation, control and operation of the designed system. In current guidelines, there are no requirements for the quality assurance of safety equipment in road tunnels. Standards for industrial and power plants may be taken as an example of a better approach.

The availability of fans and dampers is a common area of discussion, but practice shows that most breakdowns occur because of power supply failures. Consequently, the reliability of the power supply must have a higher priority than that of single ventilation equipment.

The control of the spread of smoke is the main goal of the fire ventilation. To achieve this, detailed test scenarios for all possible states of the control systems must be defined, including failure modes, breakdown and malfunction of equipment. For each of these scenarios, acceptance criteria must be defined. The tests include the function of single systems (like the ventilation) as well as the integral cooperation of all tunnel safety equipment [10]. Smoke tests serve only as a visualisation of fire ventilation performance for some chosen scenarios.

Calibration of instruments and testing of equipment and control systems must also be performed on a regular basis for tunnels in operation, together with proper service and maintenance works. This has often been neglected, leading to equipment with high investment costs to become inoperative after only a few years.

COST ESTIMATION

The costs of an incident must be weighed with its probability, i.e. displaying a monetary risk value over a defined period.

Cost estimations often only take into account investment costs. This leads to a distorted image of the real expenses of a project. Consequently, all costs which are necessary to guarantee that a safety measure fulfills its purpose efficiently and reliably during the lifetime of the tunnel must be taken into account. The following points are to be considered:

- Engineering and project management
- Investment costs for production, installation and commissioning
- Acceptance tests and regular testing in operation
- Operational costs (energy, operating and expendable materials)
- Maintenance
- Refurbishment

The definition of the cost of a human life is finally a political commitment. Common values are between 3 - 8 Mio. USD/life in the US [5], or 2 Mio. EUR/life in Germany [6]. Physical injuries with different severities should also be taken into account, however for that, risks and costs would be difficult to estimate.

The statement 'Each life has to be saved at whatever expense' is morally objectionable, taking into account that with a limited budget, more lives could be saved in another sector with appropriate measures.

The consequences of structural damage to the tunnel are mainly the cost of refurbishment and possibly lost revenue

Důsledky poškození konstrukce tunelu spočívají hlavně v nákladech na rekonstrukci a možné ztrátě příjmů z výběru mýta v důsledku dočasného uzavření tunelu. Když se zřítí tunel pod řekou nebo ve městě, související náklady mohou být vyšší, než by byly náklady na stavbu zcela nového tunelu. V takových případech by zřícení bylo nepřijatelné, takže takové případy vyžadují mimořádná bezpečnostní opatření, aby se taková situace vyloučila.

OTÁZKY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Kromě požadavků na bezpečnost mohou investiční a provozní náklady na silniční tunely podstatně zvýšit i omezení z důvodů ochrany životního prostředí.

U mnoha tunelových staveb se v posouzení vlivu na životní prostředí (EIA) stanoví, že jakékoli emise z tunelu se musí omezit nebo že nejsou povoleny vůbec žádné emise. V Evropě se tato omezení v praxi uplatňují velmi zřídka, avšak v zemích s vyššími automobilovými emisemi (např. v Austrálii) jsou omezení velmi přísná. Ve skutečnosti jsou na mnoha evropských tunelech šachty pro odsávání vzduchu z tunelu u portálů, které v praxi nejsou nikdy v provozu. Investice do těchto zařízení jsou diskutabilní, avšak mnoho nových projektů šachty vyžaduje, i když jsou považovány za zbytečné.

Jeden důvod je, že většina metod pro výpočty emisí nadhodnocuje koncentrace ve srovnání se skutečnými měřeními.

Šachty jsou užitečné pouze pro vytlačování výfukových plynů z tunelu vysokou rychlostí (> 15 m/s) do ovzduší, kde se emise mohou naředit. To ale vede k hlukovým emisím a velké spotřebě energie na provoz odsávacích ventilátorů. Alternativou šachet pro snížení emisí v bezprostředním okolí tunelových portálů mohou být filtry, i když příspěvek filtrů na výdechu z tunelu na snížení celkových emisí je zanedbatelný.

Měly by se vzít v úvahu obecné účinky samotných opatření na ochranu životního prostředí. Například když se energie na provoz šachty získává z uhelných elektráren, které produkují CO₂ a jiné emise, je celkový dopad opatření záporný, i když možná zlepšuje místní situaci v okolí tunelu.

POUŽITÍ ZDRAVÉHO ROZUMU

Používání hodnocení rizik a scénářů pro nalezení optimálního řešení může vést k nežádoucí složitosti s mnoha zdroji nejistot a chyb. Výsledky i složitých podrobných analýz rizik jsou stále jen hrubým odhadem, mluvíme-li o silničních tunelech. Vhodná opatření, se kterými se má počítat pro analýzu scénářů, musí být vybrána předem. Výsledky simulace se musí ověřit použitím zdravého rozumu.

V tomto směru se zdravý rozum dá získat pouze na základě praktických zkušeností. Zkušenosti inženýři řeší složité problémy pomocí jednoduchých praktických zásad, které berou v úvahu pouze důležité informace a nedávají se zmást méně relevantními aspekty. Tento přístup vede k lepším a účinnějším výsledkům než složitá podrobná analýza [12]. Proto je k identifikování, které aspekty jsou důležité, a k nalezení správných závěrů potřebné odborné know-how. Analýza rizik může být užitečná při porovnávání variant, které byly předtím hodnoceny pomocí odborných pravidel vyplývajících ze zkušeností. Odborníci se dají poznat podle toho, že mají ověřený přehled dosavadních výsledků plánovaných, realizovaných a úspěšně odzkoušených referenčních projektů. Důraz musí být kladen na zkoušení a provoz.

Důležitý aspekt je, že není možné předvídat budoucnost tak, že se vezme v úvahu minulá zkušenost. V praxi se mohou vyskytnout horší scénáře, na které předtím nikdo nepomyslel.

from tolls due to temporary tunnel closure. When a tunnel under a river or in a city collapses, the costs involved might be higher than those to build a whole new tunnel would be. In such cases, a collapse would not be allowable, therefore these cases require extraordinary safety measures to rule out such a situation from occurring.

ENVIRONMENTAL ISSUES

Along with the safety requirements, environmental restrictions may also significantly increase the investment and operational costs of road tunnels.

For many tunnel projects, an Environmental Impact Assessment (EIA) states that any emissions from the tunnel must be restricted or are not even allowed at all. In Europe, those restrictions are very rarely applied in practice, but in countries with higher car emissions (e.g. Australia), the restrictions are very strict. In fact, many tunnels in Europe are equipped with shafts for extraction of tunnel air at the portals which in reality are never in operation. The investments for those installations are questionable, but still many new projects require shafts, even when considered as unnecessary.

One reason for this is that most immission calculation methods over-estimate concentrations, when compared with real measurements.

Shafts are only useful when expelling the tunnel exhaust with high velocity (> 15 m/s) into the atmosphere, where the emissions may be diluted. That leads to noise emissions and high energy consumption for the operation of exhaust fans. Filters might be an alternative to shafts for the reduction of emissions in the immediate neighbourhood of tunnel portals, even when the contribution of tunnel exhaust filters for the reduction of overall emissions is negligible.

The general effects of the environmental measures themselves should be taken into account. As an example, when the energy for the operation of a shaft is provided by coal fuelled power plants, generating CO₂ and other emissions, the global impact of the measure is negative, even whilst possibly improving the local situation in the vicinity of the tunnel.

USING COMMON SENSE

Using risk assessments and scenario analysis for finding optimal solutions may lead to objectionable complexity with many sources of uncertainty and error. The results of even complex, detailed risk analysis are still only a rough estimation when talking about road tunnels. Appropriate measures to be taken into account for the scenario analysis have to be pre-selected. Simulation results must be checked by using a common sense approach.

In that aspect, common sense can only really be achieved through practical experience. Experienced engineers solve complex problems by applying simple rules of thumb, which take into account only the important information, while not becoming confused by less relevant aspects. This approach leads to better and more efficient results than a complex detailed analysis [12]. Therefore, expert know-how is required to identify which aspects are important and to find the right conclusion. Risk analysis might be useful to compare variants which have been previously evaluated by expert rules of thumb.

Experts can be identified by having a proven record of planned, realised and successfully tested reference projects. The focus must be on the testing and operation.

Po takové mimořádné události je obvyklé, že veřejné mínění kritizuje nedostatek vhodných opatření. Rozhodovací proces vyžaduje jistou odvahu úřadů při hledání výhodných řešení. Není možné, aby se spoléhaly na maximální opatření tak, aby se vyhnuly obviňování či odpovědnosti.

SHRNUTÍ

Subjekty zainteresované na infrastrukturních projektech by se měly pokusit přemýšlet o penězích, které se mají investovat, jako by byly jejich vlastní. Zaujmutí takového přístupu je nejlepší metodou pro zajištění, aby se projekt realizoval optimálním způsobem.

Technické normy a předpisy se musí revidovat. Namísto dodržování normativních předpisů je užitečné hodnocení bezpečnostních opatření pomocí analýzy rizik. Základní systémová rozhodnutí, která mají největší vliv na náklady, by měla být v první řadě založena na jednoduchých empirických pravidlech podle odborných znalostí, a teprve ve druhé řadě na analýze rizik se zaměřením na požární riziko.

Riziko požáru by se mělo počítat na základě analýzy scénářů, srovnávající různé varianty bezpečnostních opatření pro běžné a kritické scénáře. Tato opatření by se měla posuzovat podle nákladů na ně a jejich přínosů s použitím odhadů „nákladů na zachráněný život“ a „nákladů na zabráněnou škodu“.

Podle zvoleného systému se musí stanovit jasné úkoly a pro tyto úkoly se musí definovat postup ověřování. Nejvyšší důležitost mají podrobné specifikace pro zajištění kvality, provoz a řízení a postupy zkoušení a uvádění do provozu. Pro trvalé zlepšování se musí používat praktické zkušenosti.

Pro hodnocení a kontrolu projektové dokumentace je podstatný názor odborníků s praktickými zkušenostmi. Odborníci se musí vybírat na základě ověřeného přehledu dosud realizovaných staveb, které úspěšně prošly přísnými přijímacími zkouškami.

Cílem by měly být jednoduché a inteligentní koncepce. Se zvyšující se složitostí roste chybovost a celková bezpečnost klesá. Investice do inteligentní inženýrské přípravy může ušetřit stonásobek nákladů stavby. Placení inženýrské přípravy na základě investičních nákladů není dobrou pobídkou pro dosažení těchto cílů.

*ING. PETR POSPÍŠIL, petr.pospisil@gruner.ch,
GRUNER AG, Basilej*

Recenzoval: doc. Ing. Pavel Příbyl, CSc.

An important aspect is that you cannot predict the future by taking into account past experience. In practice, worse scenarios can occur, of which nobody has previously thought of. It is usually only after such an incident that public opinion may criticise the lack of appropriate measures. The decision process requires some courage from the authorities when looking for useful solutions. Maximum provisions cannot be relied upon just to avoid blame.

SUMMARY

The stakeholders of infrastructure projects should try to think of it as their own personal money being invested. Having such an attitude is the best method of ensuring that the project is done in an optimal way.

Technical norms and regulations must be revised. Instead of following prescriptive regulations, a risk based evaluation of safety measures is useful. Basic system decisions, which have the biggest impact on costs, should be based in first order on simple rules of thumb by expert knowledge, and in second order on risk analysis, focusing on fire risk.

The risk of fire should be calculated based on a scenario analysis, comparing different variants of safety measures for common and critical scenarios. These measures should be assessed according to their costs and benefits, using estimations of 'costs per life saved', and 'cost of avoided damage'.

According to the selected system, clear tasks must be established, and for those tasks, the verification process defined. Detailed specifications of quality assurance, operation and control and testing and commissioning procedures are of utmost importance. Practical experience must be used for ongoing improvement.

The opinion of experts with practical experience is essential for assessment and design review. Experts must be chosen on the basis of a proven record of realised projects, having successfully passed rigorous acceptance tests.

Simple, intelligent concepts should be aimed for. The error rate grows with increasing complexity, and the overall safety decreases. An investment in intelligent engineering can save a hundredfold in project costs. Engineering fees based on investment costs are not a good incentive in achieving these aims.

*ING. PETR POSPÍŠIL, petr.pospisil@gruner.ch,
GRUNER AG, Basilej*

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Risk analysis for road tunnels, PIARC 2008
- [2] TP 229, Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací – Technické podmínky. Eltodo EG, a. s., 2010
- [3] Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5), BMVBS, BASt (D), July 2008
- [4] Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC 1999
- [5] Viscusi, W. K., Gayer, T. Safety at Any Price? *Regulation*, vol. 25, no. 3/2002
- [6] Spengler, H. Kompensatorische Lohndifferentiale und der Wert eines statistischen Lebens in Deutschland. *Zeitschrift für Arbeitsmarktforschung* 3/2004
- [7] Nyvlt, O., Privara, S., Ferkl, L. *Probabilistic risk assessment of highway tunnels*. CVUT, June 2010
- [8] Bassler, A., Felix, R., Scheiwiller, A. Methodik für die Risikoanalyse von Tunnels der Nationalstrasse. Dokumentation Programm TURAM-ASTRA, Gruner AG, March 2011
- [9] Knuchel, R., Bassler, A., Felix, R. Tunnel safety in an alpine region, 6th ICTSRT Hamburg, May 2011
- [10] Pospisil, P. Acceptance tests of tunnel ventilation systems. *Tunel*, no. 4/2007
- [11] Langner, V., Hagenah, B., Pospisil, P. The benefit of event tree analysis for the ventilation design of railway tunnels. BHR 14th ISAVT, May 2011
- [12] Gigerenzer, G. *Calculated Risks: How to Know When Numbers Deceive You*. New York : Simon & Schuster, 2002. ISBN 0-7432-5423-6