

# POŽÁRNÍ VĚTRÁNÍ TKB – OD PROJEKTU KE ZPROVOZNĚNÍ FIRE VENTILATION – FROM DESIGN TO BRINGING INTO SERVICE

JIŘÍ ZAPÁRKA

## ABSTRAKT

Projekt požárního větrání tunelového komplexu Blanka (TKB) začal před téměř 20 lety. Příspěvek volně navazuje na článek „Požární větrání tunelového komplexu Blanka k zajištění bezpečného zásahu IZS“ [1] a jeho cílem je v hlavních bodech přiblížit postupný proces projektování, zprovoznování a hlavně zkoušení požárního větrání, s bezprostředně navazujícími soubory, až do stávajícího stavu. Rozsáhlost díla, měnící se profil, sklon, vjezdové a výjezdové rampy, to vše vyžadovalo komplexní přístup a stanovení společných principů pro celý tunelový komplex a pro požadovanou úroveň bezpečnosti. Způsob odvodu kouře se v různých částech liší, ale způsob řízení směru a rychlosti podélného proudění v tunelech je společný pro celý TKB v průběhu vývoje požáru, podle požadavků na větrání. Kromě požárního větrání je hlavní pozornost věnována detekci kouře. Příspěvek uzavírá část věnovaná zkoušení technologie a prověřování komunikace jednotek IZS (Integrovaný záchranný systém) a obsluhy tunelu.

## ABSTRACT

The work on the fire ventilation design for the Blanka complex of tunnels started nearly 20 years ago. This contribution is a free follow-up to the paper "Fire ventilation of Blanka tunnel for ensuring safe Integrated Rescue System intervention" [1]. Its objective is to outline in main points the gradual process of designing, bringing into service and, first of all, testing of the fire ventilation system together with immediately relating units, up to describing the existing state. The extensiveness of the project, the varying tunnel profile, the gradient, entrance ramps and exit ramps required a comprehensive attitude and defining common principles for the entire complex of tunnels and for the required level of safety. The smoke evacuation system is different in different parts, but the system of controlling the direction and velocity of the longitudinal airflow in the tunnel is common for the whole Blanka complex of tunnels during the course of the development of a fire, depending on requirements for ventilation. Apart from the fire ventilation, the main attention is focused on the detection of smoke. The paper is closed by a part dedicated to testing of equipment and verifying communication between the units of the Integrated Rescue System (the IRS) and the tunnel operators.

## 1. STAVEBNÍ A DOPRAVNÍ ŘEŠENÍ VE VZTAHU K POŽÁRNÍMU VĚTRÁNÍ TKB

Stavební řešení TKB bylo ovlivněno zvolenou trasou a polohou portálů, která byla vybrána z několika variantních řešení. Varianta pojmenovaná Blanka byla potom dále rozpracovávána v roce 1998 v ověřovací studii. Celková délka trasy od portálu Malovanka k portálu Troja je 5,5 km s výjezdem na povrch a následným vjezdem do tunelu v místech křižovatky Prašný most a křižovatky U Vorlíků, které dělí trasu na tři tunely: Brusnický, Dejvický a Bubenečský (obr. 1).

Tunely Brusnický a Bubenečský jsou kromě portálových částí ražené a oba tunely obsahují dlouhé úseky s podélným sklonem 5 %. Při požáru v úsecích s klesáním -5 % tlačí vztlakové síly při požáru kouř tunelem (tzv. komínový efekt) proti směru jízdy těm vozidlům, kterým blokuje požár výjezd z tunelu.

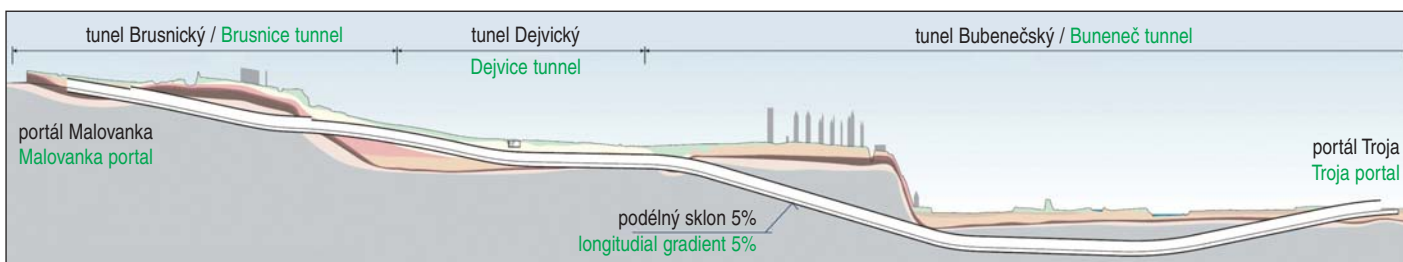
Prostřední část ležící pod ulicí Milady Horákové (Dejvický tunel) je celá hloubená, stejně jako rampy a úseky na výjezdech/vjezdech z/do tunelu. Tyto hloubené úseky jsou velice blízko pod povrchem a jejich příčný profil omezuje křížení se stanicí metra A – Hradčanská a s množstvím dalších místních inženýrských sítí pod povrchem. Tato prostorová omezení neumožnila jednotný systém odvodu kouře po délce tunelu, tak jak je tomu v ražených úsecích.

## 1. STRUCTURAL AND TRAFFIC-MANAGEMENT DESIGN IN RELATION TO THE FIRE VENTILATION SYSTEM OF THE BLANKA COMPLEX OF TUNNELS

The structural design was influenced by the alignment and locations of portals selected from several variant solutions. The variant named Blanka was subsequently worked out in a verification study in 1998. The aggregate length of the alignment from the Malovanka portal to the Troja portal amounts to 5.5 km. Exits to the surface and subsequent tunnel entrances in the locations of the Prašný Most Bridge and U Vorlíků intersections divide the alignment into three tunnels: Brusnice, Dejvice and Bubeneč (see Fig. 1).

The Brusnice and Bubeneč tunnels are mined structures (with the exception of portal parts). They contain long sections with the longitudinal gradient of 5%. During the course of a fire in sections with the longitudinal gradient of -5%, buoyancy forces induced by the fire force the smoke along the tunnel (the so-called chimney effect) against the direction of the moving vehicles the exit of which from the tunnel is blocked by the fire.

The middle part lies under Milady Horákové Street – the



Obr. 1 Podélný řez TKB od portálu Malovanka, kdy tunel klesá až pod Stromovku a Vltavu a následně stoupá k portálu Troja

Fig. 1 Longitudinal section through the Blanka complex of tunnels from the Malovanka portal, from which the tunnel descends under Stromovka Park and the Vltava River and subsequently ascends toward the Troja portal

Dalším požadavkem ovlivňujícím řešení systému větrání byla technická chodba pod vozovkou tunelu po celé délce trasy. Údržba tak má přístup do všech částí tunelového komplexu nezávisle na tunelovém prostoru.

Tvar příčného řezu tunelu ražených úseků byl dán statickým zatížením na obědvítku tunelu. Proto mají ražené úseky strop ve tvaru klenby oproti hloubeným, které mají rovný strop. Technologická chodba pod vozovkou v ražených úsecích svou průchozí výškou způsobuje velké vyklenutí protiklenby a vytváří tak velký prostor k využití pro odvodní požární kanál. Velikost a tvar příčného řezu byl prověřován ve dvou verzích: kanál pod vozovkou nebo kanál nad falešným stropem tunelu. Z ekonomického i vzduchotechnického hlediska se ukázala varianta s kanálem pod vozovkou výhodnější. Z hlediska vzduchotechnického je při požáru větší příčný profil příznivější, protože výchozí rychlost podélného proudění je nižší a kouř má následně více prostoru pro šíření, než zakouří celý profil. Tím se prodlužuje doba pro evakuaci.

Z dopravního hlediska se jedná o městský tunelový komplex s jednosměrným provozem ve 2 až 3 pruzích. Vzhledem k vysoké intenzitě dopravy přes 60 000 vozidel za 24 hodin v jednom směru, s výhledem na 75 000 vozidel a vzhledem k charakteru dopravy je nutné počítat s možností dopravní kongesce (stojící nebo pomalu jedoucí kolona vozidel). V případě požáru pak i vozidla ve směru jízdy za požárem nemohou okamžitě vyjet z tunelu a ohrožené osoby se tak vyskytují na obou stranách požáru.

Dalším specifickým je množství vjezdových a výjezdových portálů a ramp. V celém TKB je jich v rámci křižovatek v obou směrech patnáct. Množství portálů je problematické při požáru v hloubených úsecích v blízkosti portálů a ramp, kdy požární větrání musí zabránit převodu kouře z jednoho tunelu do druhého přes portály blízko u sebe.

## 2. BEZPEČNOSTNÍ KONCEPT

Požární větrání je založeno na rychlé detekci mimořádné události a okamžitým řízením směru a rychlosti podélného proudění [2][3][4][5].

Pro detekci a lokalizaci místa požáru jsou v TKB celkem tři druhy detektorů – liniový teplotní hlásič, kouřové detektory a video-detekce. Při detekci liniovým teplotním hlásičem reaguje systém automaticky vyhlášením požáru. Liniový teplotní hlásič je spolehlivý, ale je často zatížen zpožděním reakce při vyšších rychlostech podélného proudění v tunelu. Kromě rychlosti reakce je u příčného odvodu přes několik klapek důležitá přesnost lokalizace požáru, protože klapka otevřená na špatném místě může způsobit fatální následky.

V roce 2007 proběhl v silničním tunelu Gotthard úspěšný zkušební provoz s detekcí požáru založenou na nově vyvinutých detektorech kouře, konkrétně pro silniční tunely. Prokázaná spolehlivost detekce umožnila zahrnutí detektorů do automatiky požárního větrání bez potvrzení obsluhy [7]. Na základě těchto zkušeností byly detektory kouře zahrnuty do systému detekce TKB. Celý TKB byl rozdělen do 125 detekčních úseků, kde každému úseku odpovídá jeden detektor kouře. Délka detekčních úseků je 80–90 m, v ražených částech od jedné odsávací vyústky k následující. Také samotný kamerový systém je vybaven video-detekcí, která je schopna rozpoznat kouř nebo zastavení vozidla.

Cílem včasné detekce přítomnosti kouře v tunelu a možného požáru je řídit směr a rychlost podélného proudění, protože ta rozhoduje o charakteru šíření kouřové vlečky a zakouřenosti profilu, čímž zásadním způsobem ovlivňuje podmínky pro evakuaci.

Jak detektory kouře, tak video-detekce reagují velmi rychle na mimořádné události a umožňují tak zajištění příznivých podmínek pro šíření kouře při případném požáru. Dispečer tak má více času na správné vyhodnocení a lokalizaci události před potvrzením vyhlášení požáru.

entire Dejvice tunnel as well as ramps and sections at exits/entrances from/to the tunnel are cut-and-cover structures. These cut-and-cover tunnel sections are very near to the surface and their cross-section is limited by the intersection with Hradčanská metro station on the Line A and numerous other local engineering networks under the surface. These spatial restrictions did not allow designing the same unified smoke evacuation system throughout the tunnel length as designed for mined tunnel sections.

Another requirement affecting the solution to the ventilation system lied in the utility corridor under the tunnel roadway throughout the tunnel route. In this way maintenance teams have access into all parts of the complex of tunnels independently of the space above the tunnel roadway.

The geometry of the tunnel cross-section was determined by the static load acting on the tunnel lining. This is the reason why the vaulted roof is designed for mined sections, in contrast to cut-and-cover tunnel sections having flat roof decks. The utility corridor under the roadway in mined sections causes large arching of the inverted vault, thus creating large space available for the smoke evacuation fire duct. The dimensions and geometry of the cross-section was verified in two versions: a duct under the roadway or a duct above an intermediate tunnel floor. From the aspects of economy and ventilation, the variant with the duct under the roadway turned out to be more advantageous. From the aspect of ventilation, a larger cross-section is more favourable because of the fact that the initial velocity of longitudinal airflow is lower and smoke has subsequently more space for spreading before filling the whole cross-section. In this way the time available for evacuation is extended.

From the traffic-related point of view, the structure is an urban complex of tunnels with unidirectional traffic on 2 to 3 lanes. Taking into consideration the large traffic volume exceeding 60,000 vehicles per 24 hours in one direction, with the prospect for 75,000 vehicles, and with respect to the character of traffic, it is necessary to reckon with the possibility of traffic congestion (a standing or slowly moving column of vehicles). In the case of a fire even the vehicles found in the direction of travel behind the fire cannot immediately leave the tunnel, threatened people are therefore found on both sides of the fire.

Another specific feature is the number of entrance portals, exit portals and ramps. Their number in the entire complex of tunnels in both directions amounts to fifteen. The number of portals is problematic in the case of a fire in the cut-and-cover tunnel sections near the portals and ramps, where the fire ventilation has to prevent the transition of smoke from one tunnel to the other via portals located close to each other.

## 2. SAFETY CONCEPT

The fire ventilation system is based on the fast detection of an extraordinary event and immediate control of the direction and velocity of the longitudinal airflow [2][3][4][5].

There are three types of detectors detecting and locating a fire in the Blanka complex of tunnels – a linear heat detector, smoke detectors and video-detection. When the linear heat detector is activated, the system responds automatically by automatic triggering a fire alarm. The linear heat detector is reliable, but it is frequently burdened by delayed reaction at higher velocities of the longitudinal airflow in a tunnel. In addition to the reaction rate, the accuracy of the fire location is important in the case of the transverse removal system via several dampers because a damper opened at a wrong place may have fatal consequences.

V případě detekce požáru v některé části tunelu dochází k okamžité uzavírce všech příjezdů do tunelu, doprava v tunelu je přeměrována na výjezdy.

Během přípravy projektu probíhala dobrá komunikace s hasiči HZS hl. města Prahy, což umožnilo stanovení zásad pro postupy jednotek HZS podle stavu požárního větrání, případně podle místa požáru. Během komplexních zkoušek proběhlo i několik kouřových zkoušek s různými zdroji zkušební kouře a členové HZS se mohli sami přesvědčit o postupu zprovoznování požárního větrání a o účinnosti odsávání. Na závěr po uzavřeném komplexním vyzkoušení proběhlo cvičení IZS, kde byl největší důraz kladen na komunikaci mezi jednotlivými složkami IZS a obsluhou tunelu.

### 3. PROJEKT POŽÁRNÍHO VĚTRÁNÍ

V městských tunelech s velmi vysokou intenzitou dopravy a pravděpodobností kongesce je cílem v prvních minutách ustálit podélné proudění nízkou rychlostí ve směru jízdy. Při nízkých rychlostech má kouř tendenci šíření pod stropem tunelu v obou směrech.

#### 3.1 Regulace podélného proudění a systém odvodu kouře

V tunelu bývá často detekován kouř, který nemusí nezbytně znamenat požár, nebo se zdroj kouře může pohybovat a dispečer proto nesmí vyhlásit požár v místě prvního zjištění. Dispečer musí situaci vyhodnotit a požár vyhlásit až po ověření, že se jedná skutečně o požár, a že se zdroj kouře/požár nepohybuje. Následně musí přes video-detekci ověřit, že se skutečně jedná o úsek vyhodnocený řídicím systémem a až poté vyhlásit požár. Rychlá detekce je zásadní hlavně v úsecích s podélným sklonem – 5 %. Pro tento účel byl navržen a implementován režim „předvětrání“, který ještě před spuštěním požárního větrání vytváří podmínky podélného proudění obdobné 1. fázi požárního větrání (bez odsávání) a dává tak dispečerovi delší čas na reakci. „Předvětrání“ je zajištěno expertním systémem, který řídí provozní větrání. Regulace zajišťuje směr a minimální rychlost podélného proudění 1,2 m/s. Pokud je rychlost vyšší, například vlivem doznívajícího pístového efektu, regulátor nezasahuje. Jednotlivé stavy jsou přehledně vidět z průběhu rychlosti měřené v tunelu při zkouškách automatiky přechodů mezi jednotlivými stavy na obr. 2.

Výchozí podmínky pro uvedenou zkoušku byly zvoleny co nejnepříznivější. V tunelu zasaženém požárem bylo výchozí podélné proudění proti směru jízdy, což by mohlo nastat pouze v noci, při velmi malé intenzitě dopravy, protože jinak pístový efekt vozidel pohybujících se tunelem zajišťuje proudění ve směru jízdy. V rámci předvětrání bylo dosaženo rychlosti žádané a ta byla spolehlivě udržována. V okamžiku vyhlášení požáru je expertní systém odstaven a funkci přebírá požární regulátor podélného proudění. Přechod na požární regulátor je v grafu vidět v malém podkmitu po iniciaci požárního větrání. Proudění v nezasazeném tunelu je třeba reverzovat proti směru jízdy, aby nezasazený tunel přes portál nepodsál kouř unikající z portálu zasaženého tunelu.

V případě výpadku některých ventilátorů, klapek nebo celé strojovny, nebo v případě požáru nad návrhové parametry existuje možnost poloautomatického spuštění všech dostupných proudových ventilátorů v přímém směru na maximální výkon.

K ovládání podélného proudění v TKB slouží celkem 88 kusů proudových ventilátorů, z čehož je 25 proudových ventilátorů vybaveno frekvenčním měničem umožňujícím plynulou regulaci otáček a 63 je vybaveno soft startéry, které ovládají ventilátory pouze způsobem start/stop.

#### 3.2 Systém odvodu kouře

V 1. fázi požárního větrání (dále jen 1. fáze), je v ražených úsecích kouř odsáván přes 2 vyústky v klenbě tunelu: jednou před a jednou za požárem. Tuto situaci z pohledu řidiče stojícího cca 40 m před požárem lze vidět na obrázku 3. Uvedené ukázky z rozložení kouře, teploty a rychlosti v příčném řezu tunelem vycházejí z parametrů

In 2007, a successful trial operation of the tunnel with fire detection based on smoke detectors newly developed for road tunnels took place in the Gotthard road tunnel. The proved detection reliability allowed for the incorporation of the detectors into the automatic fire ventilation system not requiring confirmation by an operator [7]. On the basis of this experience, the smoke detectors were incorporated into the detection system for the Blanka complex of tunnels. The entire complex of tunnels was divided into 125 detection sections, where each section has one smoke detector assigned. The lengths of the detection sections vary between 80 – 90m; in the mined tunnel sections it is the length between one smoke extraction nozzle to the next one. Even the camera surveillance system is equipped with video-based fire detection facility capable of identifying smoke or vehicle stopping in the tunnel.

The objective of the rapid detection of the presence of smoke and a possible fire in a tunnel is to control the direction and velocity of the longitudinal airflow, because they are crucial regarding the character of the spreading of the trail of smoke and filling the tunnel profile with smoke. In this way it fundamentally influences the evacuation conditions.

Smoke detectors as well as the video-based smoke detection react very quickly to extraordinary events and allow for ensuring favourable conditions for spreading of smoke in the case of a contingent fire. Owing to this fact the management centre has more time for correct assessing and locating the event before the confirmation of triggering the fire alarm.

In the case of the detection of a fire in some part of the tunnel, all points of access to the tunnel are immediately closed and traffic in the tunnel is redirected to exits.

The communication with the units of the Fire Rescue Brigade of Prague during the preparation of the design was good, which fact allowed for setting the rules for the fire fighting procedures according to the condition of the fire ventilation or, as the case may be, according to the location of the fire. Even several smoke tests with various sources of the testing smoke were conducted during the comprehensive testing and the members of the Fire Rescue Brigade could check the procedure for putting the fire ventilation into operation and the smoke evacuation effectiveness. The Integrated Rescue System exercise took place in the conclusion, after the comprehensive testing had finished. The biggest stress was put on the communication between individual components of the Integrated Rescue System and the tunnel operators.

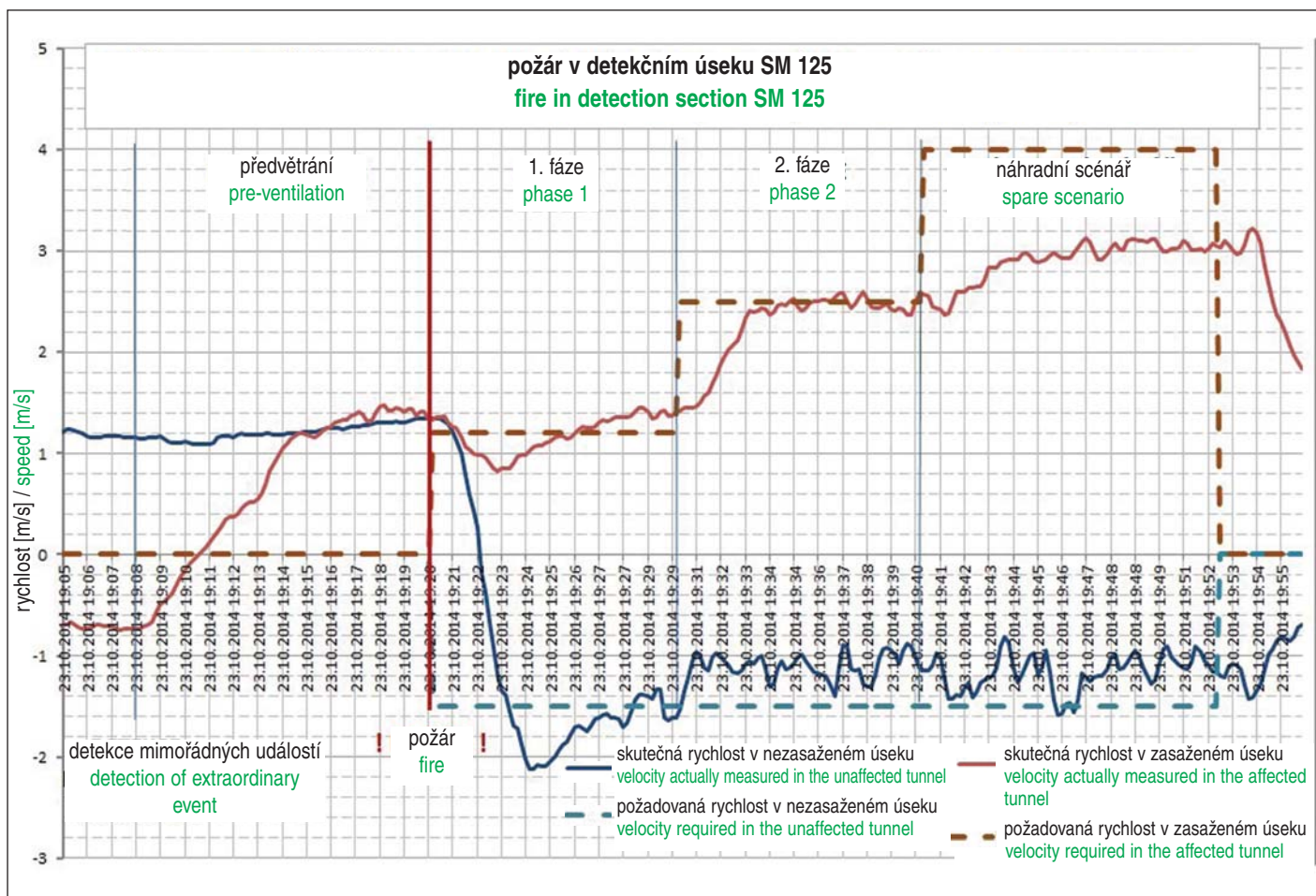
### 3. FIRE VENTILATION DESIGN

In the first minutes, the objective in urban tunnels with the large volume of traffic flow and the probability of congestion is to stabilise the longitudinal airflow at low velocity in the direction of traffic. At low velocities smoke tends to spread under the ceiling in both directions.

#### 3.1 Regulation of longitudinal airflow and the smoke evacuation system

It is a frequent case that smoke which does not necessarily mean a fire is detected in a tunnel or the smoke source can move and the operator must not trigger the fire alarm in the location of the initial detection. The operator has to assess the situation and trigger the fire alarm only after the verification that it is really the case of a fire and that the smoke source/fire is not moving. Subsequently he/she has to verify, using the video-based detection system, that it is really the case of the section assessed by the management system and only then to trigger the fire alarm. Quick detection is fundamental first of all





Obr. 2 Průběh měřené rychlosti podélného proudění v tunelu během zkoušek automatiky požárního větrání, požadovaná rychlost v 1. fázi byla 1,2 m/s a ve 2. fázi 2,5 m/s  
 Fig. 2 The course of the velocity of the longitudinal airflow measured during the tests of the fire ventilation automation; the velocity required in Phase 1 and Phase 2 was 1.2m/s and 2.5m/s, respectively

skutečného požáru. Vpravo dole je vidět klapka v místě zaústění svodu do odvodního kanálu pod vozovkou, která ovládá odvod jedinou vyústkou.

V případě návrhového požáru 30 MW a při produkovaném množství kouře 80 m<sup>3</sup>/s v 10. minutě od vzniku požáru (který odpovídá požáru nákladního vozidla), začne kouřová vlnka zaplňovat celý profil během několika minut a kouř začne ohrožovat vozidla, která jsou ve směru jízdy zablokována požárem. V této chvíli dispečer aktivuje (nejpozději na povel velitele zásahu) 2. fázi požárního větrání.

2. fáze požárního větrání má za cíl zabránit šíření kouře na stranu vozidel stojících před požárem (proti směru proudění), a tím rovněž umožnit přístup záchranných složek k místu požáru. Požadovaná rychlost proudění vzduchu se navýší na 2,2–3,6 m/s a rovněž se navýší i odsávaný průtok vzduchu strojovnou na maximální výkon.

Strojovny odvádějí kouř na maximální výkon. V ražených úsecích se uzavírá klapka před požárem (na straně zablokovaných vozidel) a otvírají se další dvě (ve dvoupruhových úsecích tunelu) až tři klapky (ve třípruhových úsecích tunelu) ve směru jízdy.

V hloubených úsecích je odvod kouře řešen hromadným odvodem, kdy místo několika vyústek je kouř odsáván pouze v jednom místě.

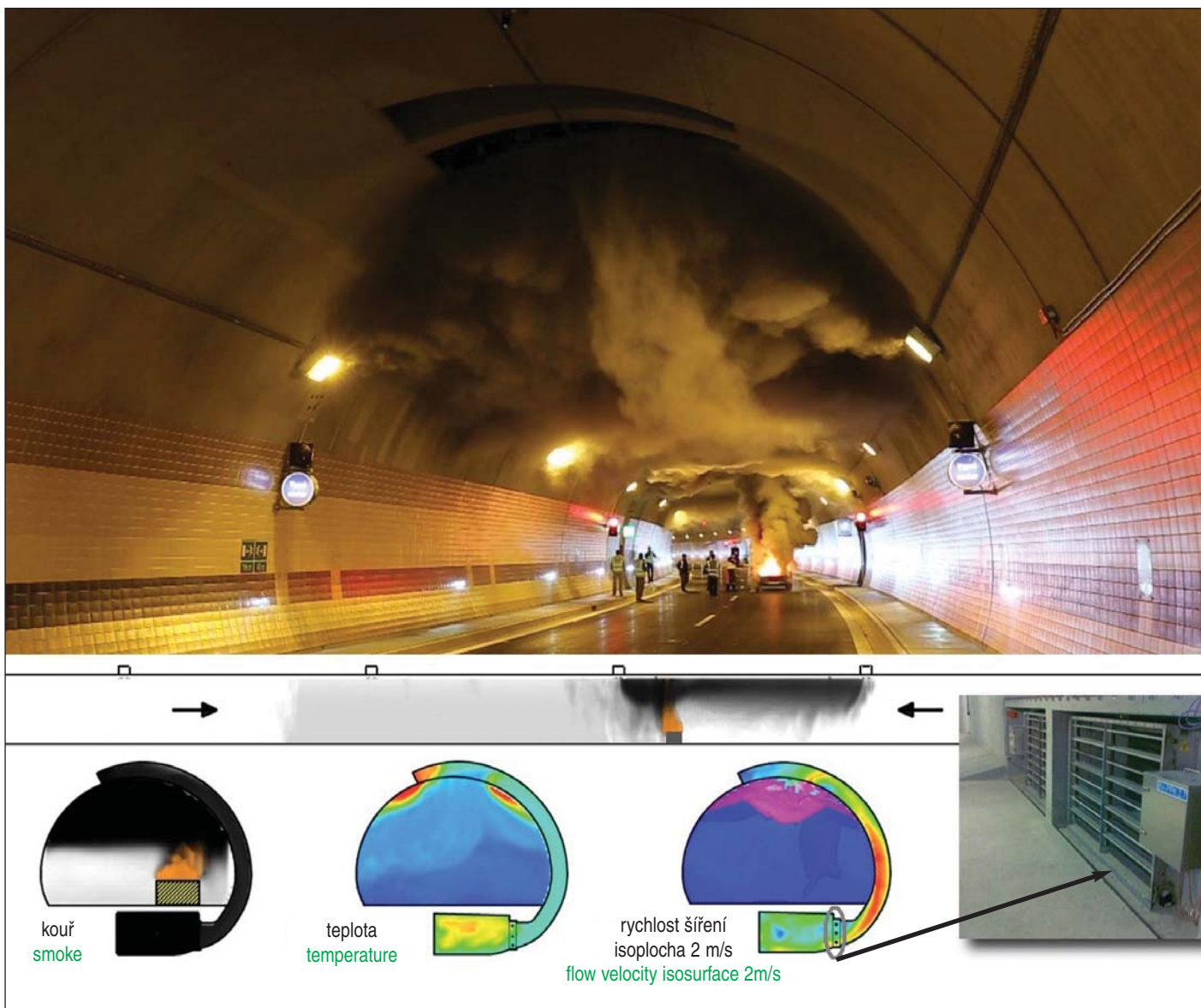
V hloubených úsecích končících výjezdovým portálem je kouř odváděn čistě podélně.

Nezávisle na způsobu odvodu kouře (rozloženého přes několik klapek, hromadně nebo čistě podélně) je vždy požadovaná regulace na nízkou rychlost v 1. fázi a kritickou rychlost  $u_{krit}$  – zajišťující šíření kouře pouze jedním směrem.

Pro odvod kouře v případě požáru slouží celkem pět strojoven: Troja, Letná, Prašný most, Špejchar a Střešovice, tj. celkem 30 axiálních ventilátorů s možností plynulé regulace otáček.

in the sections with the longitudinal gradient of – 5%. The so-called “pre-ventilation” was designed and implemented for this purpose. It creates longitudinal airflow conditions similar to Phase 1 of the fire ventilation (without exhaustion) even before the fire ventilation system is started. It provides the operator with longer time for responding. The “pre-ventilation” is ensured by an expert system managing the ventilation system. The regulation ensures the direction and minimum velocity of the longitudinal airflow of 1.2m/s. If the velocity is higher, for example owing to the fading piston effect, the controller does not intervene. Individual states can be synoptically seen from the course of the velocity measured in the tunnel during the course of the tests of the automation of the transition between individual states in Fig. 2.

As much as possible favourable initial conditions for the above-mentioned test were chosen. The air in the tunnel hit by the fire flew longitudinally against the direction of traffic. This situation could take place only during a night, at very low intensity of traffic, because otherwise the piston effect induced by vehicles moving along the tunnel ensures flowing in the direction of travel. The required velocity was achieved within the framework of the “pre-ventilation” and was reliably maintained. The expert system is disconnected at the moment of triggering the fire alarm and the function is taken over by the controller of the direction and velocity of the longitudinal airflow. The transition to the airflow controller can be seen in the graph in the form of a small undershoot after the initiation of the fire ventilation. It is necessary to reverse the airflow against the direction of travel so that the unaffected tunnel does not



Obr. 3 Šíření kouřové vlečky odpovídající 1. fázi požáru, kdy je otevřena jedna klapka ovládající odvod zobrazené vyústky a druhá klapka na vzdálené straně od požáru

Fig. 3 Spreading of the smoke trail corresponding to Phase 1 of the fire, where one damper controls the extraction through the depicted outlet and another damper controls it on the remote side of the fire

### 3.3 Dimenzování odvodu kouře

Pro dimenzování příčného odvodu kouře byla rozhodující tzv. kritická rychlost  $u_{krit}$ , což je potřebná rychlost v 2. fázi požárního větrání pro šíření kouře pouze jedním směrem, ve směru jízdy.

Kritická rychlost  $u_{krit}$  [m/s] vynásobená příčným profilem [m<sup>2</sup>], udává potřebný průtok [m<sup>3</sup>/s], který je určující pro stanovení výkonu odvodu strojovnou při požáru.

Na obr. 4 je porovnání šíření kouřové vlečky při požáru v klesajícím a ve stoupajícím tunelu. Cílem požárního větrání je tlačít kouř pomocí proudových ventilátorů ve směru jízdy a zajistit přetlakově chráněnou stranu požáru pro zásah. Kouř je odváděn třemi vyústkami za požárem, ve směru šíření kouře. Rozdíl je v potřebné rychlosti. V klesání je potřeba k udržení kouře ve směru jízdy rychlost podélného proudění 3,6 m/s, a ve stoupání stačí k dosažení stejného stavu rychlost pouze 2,2 m/s. Na obrázku stoupání je vidět, jak je odvod kouře při nižším průtoku tunelem mnohem efektivnější.

Minimální výkon odvodu kouře na jednu vyústku je 80 m<sup>3</sup>/s. Při odvodu z dvoupruhové části přes 3 vyústky celkem 240 m<sup>3</sup>/s a při odvodu z třípruhové části přes 4 vyústky celkem 320 m<sup>3</sup>/s. V hloubených úsecích s hromadným odvodem je stejné minimální množství odváděno strojovnou v jednom místě.

suck the smoke escaping from the portal of the affected tunnel through its portal.

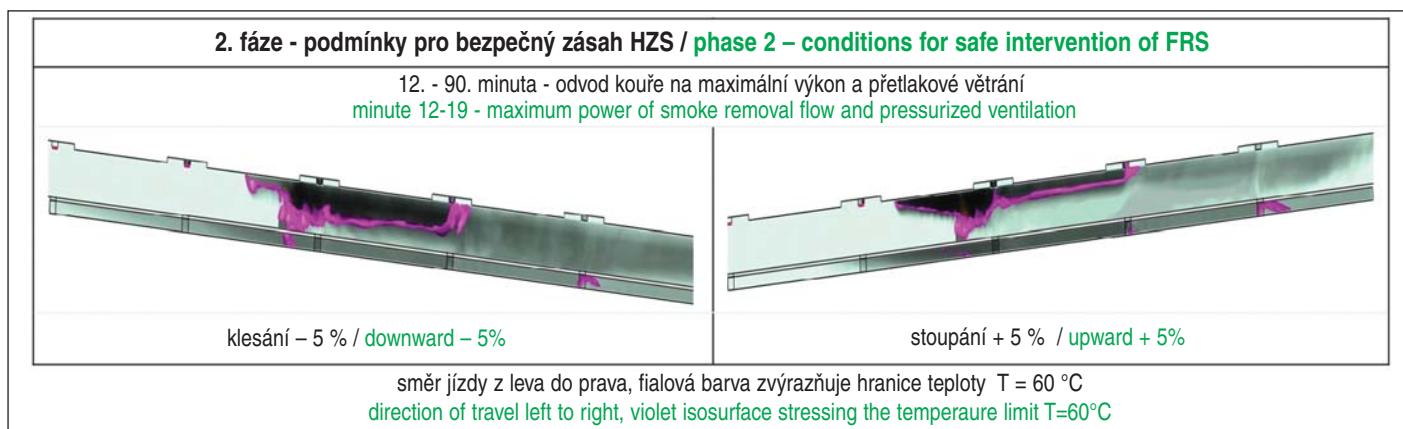
In the case of a failure of some of fans, dampers or the whole ventilation plant or in the case of a fire exceeding the design parameters, there is a possibility of automatic starting of all jet fans available in the straight direction at the maximum performance level.

There are 88 jet fans in total installed for the purpose of controlling the longitudinal airflow in the Blanka complex of tunnels, 25 of which are equipped with a frequency converter allowing fluent regulation of rotation and 63 are equipped with soft starters controlling the fans only by starting or stopping them.

### 3.2 Smoke removal system

During Phase 1 of the fire ventilation (hereinafter referred to as Phase 1) smoke in mined tunnel sections is extracted through two extraction outlets in the tunnel vault: one before the fire and one behind it. This situation as seen by a driver standing approximately 40m before the fire is shown in Figure 3. The presented examples of the distribution of smoke, temperature and airflow velocity within a tunnel cross-section are based on real fire parameters. A damper in the location of the outlet into





Obr. 4 Vliv vztlaku požáru na tvar kouřové vlečky v klesajícím a stoupajícím tunelu při návrhovém požáru 30 MW

Fig. 4 Influence of the fire-induced buoyancy on the shape of the smoke trail in a descending tunnel and an ascending tunnel during a 30MW design fire

## 4. ZKOUŠKY BĚHEM REALIZACE A ZPROVOZNĚNÍ

### 4.1 Zkoušky požární odolnosti jednotlivých zařízení před instalací

Jednotlivá zařízení systému odvodu kouře byla před instalací prověřena ve zkušebnách, kde byla dokladována u ventilátorů požární odolnost a u klapek hlavně těsnost při odvodu horkých spalin (obr. 5).

### 4.2 Komplexní zkoušky

#### 4.2.1 Zkoušky jednotlivých prvků systému požárního větrání

Jednotlivá zařízení byla postupně zprovoznována v místním ovládní a poté ovládním z řídicího systému. Dále byla prověřována reakce detektorů požáru (detektory kouře, kamery, liniový teplotní hlásič) a byla kalibrována měření rychlosti podélného proudění v tunelu a ve strojovnách.



Obr. 5 Zkouška požární odolnosti chodu hlavního ventilátoru pro strojovny odvodu kouře při odvodu spalin o teplotě 400 °C po dobu 90 minut

Fig. 5 Testing of fire resistance, the performance of the main fan for smoke extraction ventilation plants where 400°C products of combustion are being removed for 90 minutes

the extraction duct under the roadway controlling the extraction through one outlet can be seen at the bottom right of the picture (Fig. 3).

In the case of a 30MW design fire and the smoke generation rate of 80m<sup>3</sup>/s in the tenth minute from the origination of the fire (corresponding to a lorry fire), the smoke trail starts to fill the entire tunnel profile during several minutes and smoke starts to threaten the vehicles which are blocked by the fire in the direction of travel. At this moment (on the command of the commander of the intervention at the latest) the operator activates Phase 2 of the fire ventilation.

The objective of Phase 2 of fire ventilation is to prevent spreading of smoke in the direction of vehicles standing before the fire (upstream) and in this way also to allow for the access of rescue units to the fire location. The required airflow velocity is increased to 2.2–3.6m/s and the flow rate of air extracted by the ventilation plant is increased to the maximum.

The ventilation plants are removing smoke at the maximum rate. In mined tunnel sections the damper before the fire (on the side of the blocked vehicles) is being closed and other two (in double-lane tunnel sections) up to three dampers (in triple-lane tunnel sections) in the direction of travel are being opened.

In cut-and-cover tunnel sections, the extraction of smoke is solved by a bulk extraction system, where smoke is extracted only at one point instead of through several outlets.

In cut-and-cover tunnel sections ending by an exit portal, smoke is evacuated solely longitudinally.

Independently of the smoke removal system (through several dampers, by a bulk system or solely longitudinally), regulation to low velocity is always required in Phase 1 and the regulation to the critical velocity  $u_{crit}$  is required to ensure spreading of smoke only in one direction.

The following five ventilation plants in total are designed for the extraction of smoke in the case of a fire: Troja, Letná, Prašný Most Bridge, Špejchar and Střešovice. They contain a total of 30 axial fans allowing the fluent regulation of the rotation speed.

### 3.3 Designing smoke extraction system dimensions

The so-called critical airflow rate, which is the rate required in Phase 2 of the fire ventilation for spreading of smoke solely in one direction - the direction of travel, was the parameter crucial for designing the transverse smoke evacuation system.

The critical velocity [m/s] multiplied by the cross-sectional area [m<sup>2</sup>], gives the required airflow rate [m<sup>3</sup>/s] required for the determination of the ventilation plant throughput during a fire.

The comparison of spreading of the smoke trail during a fire in a descending tunnel and an ascending tunnel is presented in

Cílem kalibrace čidel měření rychlosti podélného proudění v tunelu bylo zjištění střední rychlosti  $u_{stř}$ , potřebné pro zjištění průtoku tunelem. Průtok tunelem zůstává stejný a je dán součinem plochy a rychlosti:  $Q[m^3/s]=A[m^2] \times u_{stř} [m/s]$ , kde A je plocha světlého příčného profilu tunelu, který se po délce trasy výrazně mění.

V souvislosti s příčným odvodem kouře byl měřen in-situ průtok a dopravní tlak u odsávacích ventilátorů a průtoky v požárních kanálech. Na základě takto získaných výsledků proběhla kalibrace ventilátorů strojeven na požadovaný stav podle projektu tam, kde byla zjištěna odchylka od požadovaného stavu tak, že došlo k přetočení lopatek oběžných kol o  $5^\circ$  ve prospěch potřeby nárůstu dopravního tlaku. Na základě těchto výsledků byla také stanovena opravná závislost střední rychlosti proudění u čidel umístěných ve vzduchotechnických kanálech (obr. 6).

V této etapě proběhlo i prověření návrhových parametrů výkonu odvodu a tahu proudových ventilátorů.

#### 4.2.2 Zkoušky automatiky řízení

Po prověření jednotlivých prvků následovala etapa prověření automatiky řízení jednotlivých souborů, kdy proběhla optimalizace automatických algoritmů:

- sekvence otvírání klapky odvodu kouře;
- spouštění ventilátorů ve strojovnách;
- nastavení parametrů regulátoru podélného proudění;
- algoritmus detekce pohybuujícího se zdroje kouře.

Součástí zkoušek bylo i ověření chodu při poruchách a výpadcích určitých zařízení, která jsou součástí systému požárního větrání.

V rámci komplexních zkoušek bylo provedeno několik kouřových zkoušek potřebných k aktivaci kouřových detektorů a k vizualizaci proudění při odsávání vyústkou v klenbě tunelu (obr. 7).



Obr. 6 Měření tlaku na hlavních ventilátorech pro ověření dosažení projektovaných hodnot výkonu odvodu  
Fig. 6 Measurements of pressure on main fans to verify that design values of the smoke removal are reached

Figure 4. The objective of the fire ventilation is to force smoke by means of jet fans in the direction of travel and ensure the side of the fire protected by positive pressure for the fire intervention. Smoke is removed through three outlets downstream of the fire. The difference lies in the required airflow velocity. In a descending tunnel, the velocity of the longitudinal airflow required for keeping the smoke moving in the direction of travel amounts to 3.6m/s, whilst in an ascending tunnel, the velocity of 2.2m/s is sufficient for achieving the same condition. It can be seen in the ascending tunnel picture how the removal of smoke at a smaller rate of the airflow along the tunnel is much more effective (Fig. 4).

The minimum smoke removal flow rate per one outlet is  $80m^3/s$ . In the case of removing smoke from a double-lane tunnel section through 3 outlets the rate amounts to  $240m^3/s$  and in the case of a triple-lane tunnel section through 4 outlets it amounts to  $320m^3/s$  in total. In cut-and-cover tunnel sections with the bulk removal system the same minimum amount is evacuated by a ventilation plant at one point.

## 4. TESTS DURING REALISATION AND PUTTING INTO SERVICE

### 4.1 Tests of fire resistance of individual pieces of equipment prior to the installation

Individual pieces of the smoke removal system equipment were checked prior to the installation in laboratories where the fire resistance and, first of all, the tightness during the passage of hot products of combustion were documented for fans and dumpers, respectively (see Fig. 5).

### 4.2 Comprehensive testing

#### 4.2.1 Testing of individual elements of the fire ventilation system

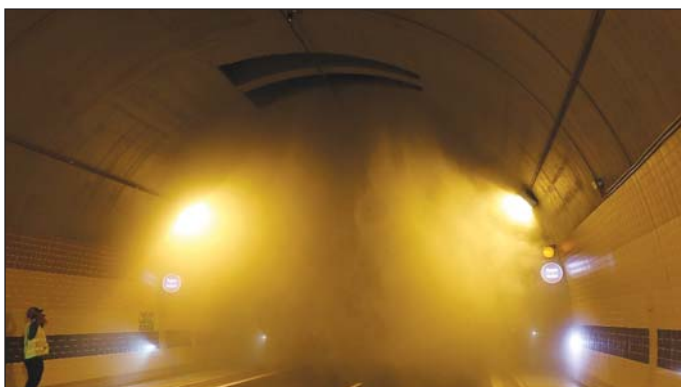
Individual pieces of equipment were put into service in the manual controlling system and subsequently in the management control system. In addition, the response of fire detectors (smoke detectors, cameras, the linear heat detector) was examined and the measurements of the velocity of longitudinal airflow in the tunnel and ventilation plant rooms were calibrated.

The objective of the calibration of the sensors measuring the velocity of longitudinal airflow in the tunnel was to determine the mean velocity  $u_{mean}$  required for the determination of the rate of the airflow through the tunnel. The rate of the airflow through the tunnel remains unchanged; it is given by the product of the area and velocity:  $Q[m^3/s]=A[m^2] \times u_{mean} [m/s]$ , where A is the net cross-sectional area of the tunnel, which significantly varies along the tunnel alignment.

The flow rate and the transport pressure at the smoke extraction fans and the flow rates in the fire ventilation ducts were measured in-situ. The fans in ventilation plants were regulated to the state required by the design on the basis of the results obtained in the above-mentioned way in the cases where a deviation from the required condition where the angular displacement of the vanes of fan propellers changed by  $5^\circ$  in favour on the need for an increase in the transport pressure was identified. The corrective dependence of the mean velocity of airflow at the sensors installed in ventilation ducts was also determined on the basis of these results (see Fig. 6).

The design parameters of the extraction output and the draft of the axial fans were also checked in this phase.





Obr. 7 Ověřování sacího účinku výústky v klenbě tunelu pomocí „studeného kouře“

Fig. 7 Verification of the suction effect of an outlet in the tunnel vault using “cold smoke”

Při zkoušce byl použitý tzv. studený kouř, tj. kouř o okolní teplotě (dýmavnice). U „studeného kouře“ se ukazuje sací schopnost odvodu od úrovně vozovky na rozdíl od „teplého kouře“, který stoupá přirozeně.

Při zkouškách algoritmu detekce kouře pohybujícího se zdroje se ukázalo, že v TKB hrají velkou roli měnící se příčné profily tunelu včetně ramp, které způsobují prodlevu detekce u určitých detektorů. Proto byla detekce vyjmuta z automatické reakce a požár je vyhlášen až po potvrzení dispečerem. Algoritmus tak umožňuje dispečerovi sledovat šíření kouře tunelem během jízdy a po případném zastavení, až vyhodnotí zdroj jako stacionární, nabídne řídicí systém dispečerovi příslušný detekční úsek k potvrzení. Dispečer má pro ověření k dispozici kamerový systém, který mu při pozastavení na monitoru ukáže situaci v tunelu v místě zdroje kouře (obr. 8).

#### 4.2.3 Zkoušky vazeb mezi systémy

Po prověření jednotlivých souborů byly prověřeny návaznosti mezi soubory. Po vyhlášení požáru byla ověřována správná reakce celého systému. Během zkoušek byly prověřeny všechny varianty detekce požáru včetně pohyblivého zdroje kouře.

#### 4.2.4 Koordinační cvičení IZS

Poté, co bylo prověřeno technologické vybavení, proběhlo cvičení, při kterém byly prověřovány postupy zásahu a komunikace mezi jednotlivými složkami IZS. Během projektové přípravy byl optimalizován postup zásahu. Bezpečný přístup k požáru v zasaženém tunelu zajišťuje 2. fáze požárního větrání, kdy je přetlakově chráněn úsek tunelu od požáru proti směru jízdy (obr. 9). Pokud není tento stav již v době příjezdu HZS, velitel zásahu zavelí obsluhu tunelu, která 2. fázi požárního větrání aktivuje. Na obrázku 9 jsou uvedeny tři ukázky směru zásahu (žlutá čára) ve třech vybraných případech. Zakouřená část tunelu je zobrazena červeně, přetlakově chráněná část modře a nezasažený tunel zeleně.



Obr. 8 Zkoušky algoritmu detekce kouře s pohybujícím se zdrojem kouře

Fig. 8 Testing of the algorithm for the detection of smoke with the moving source of smoke

#### 4.2.2 Testing of the control automation

The stage of the control of individual units during which the following automatic algorithms were optimised followed after checking individual elements:

- the sequence of opening smoke extraction dampers;
- starting the fans in ventilation plants;
- setting the parameters of the longitudinal airflow controller;
- the algorithm for the detection of the moving source of smoke.

The verification of the function during failures and outages of certain facilities which are components of the fire ventilation system was also part of testing.

Several smoke tests were carried out within the framework of the comprehensive testing. They were required for the activation of smoke detectors and the visualisation of airflow when smoke is extracted through an outlet in the tunnel vault (see Fig. 7).

The so-called “cold smoke”, i.e. smoke at the ambient temperature (a smoke bomb) was used in the test. The “cold smoke” shows the suction capability of the extraction from the roadway level, in contrast with the “hot smoke”, which rises naturally.

It turned out during the tests of the algorithm for the detection of smoke from a moving source that the varying tunnel cross-sections including ramps causing a delay of the detection at certain detectors play a significant role in the Blanka complex of tunnels. For that reason detection was taken out of the automatic response and a fire alarm is triggered only after confirmation by the operator. In this way the algorithm allows the operator to monitor the process of spreading the smoke along the tunnel while driving and after contingent stopping, when the control system assesses the source to be stationary; it offers the respective section to the operator for confirmation. The operator has the camera system available for the verification, which, after stopping, shows him the situation in the tunnel in the location of the smoke source (see Fig. 8).

#### 4.2.3 Testing of links between systems

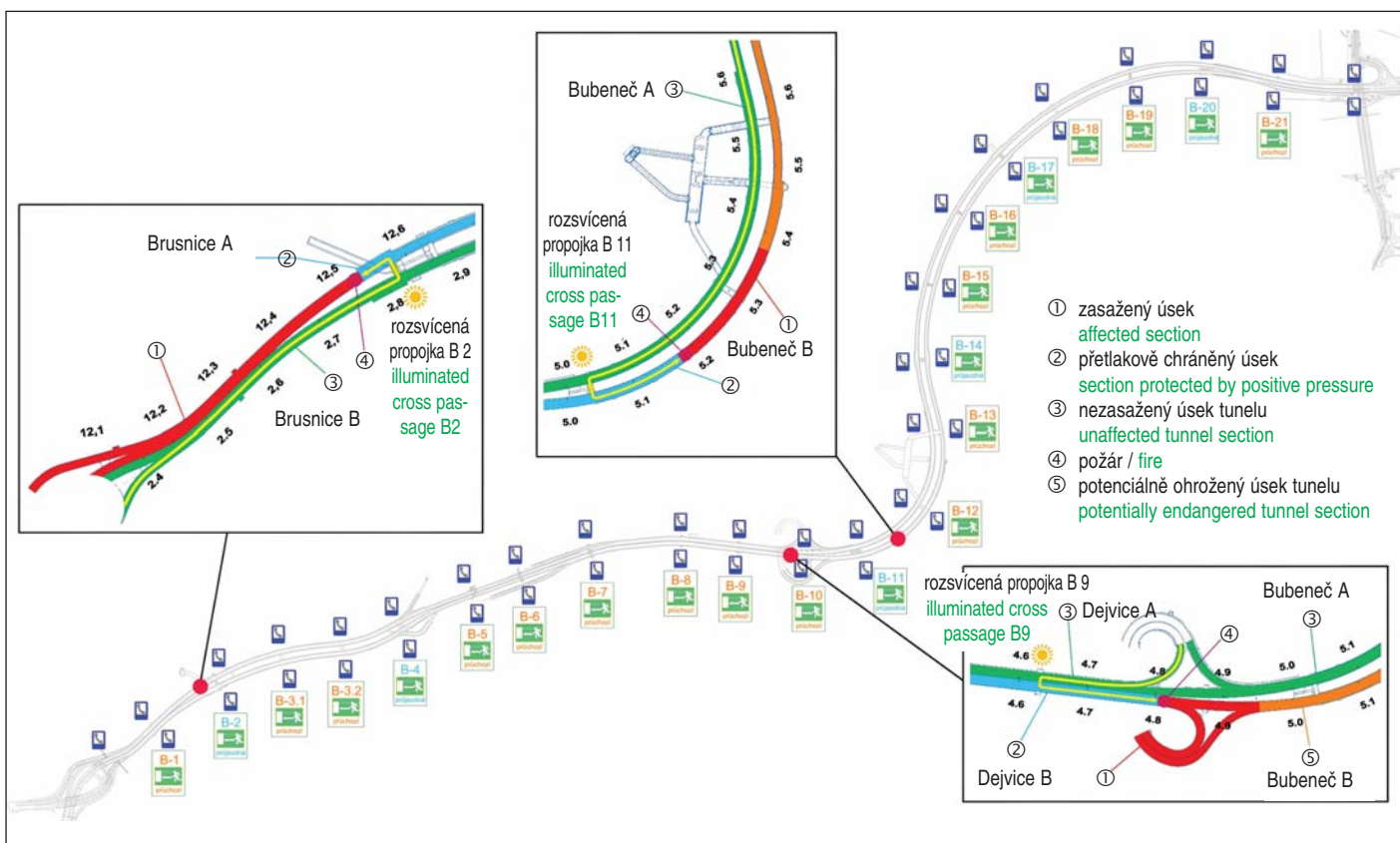
Links between the systems were checked after checking individual systems. The correct response of the whole system was subjected to checking after triggering the fire alarm. All fire detection variants were checked during the tests, including the variant with the moving source of smoke.

#### 4.2.4 Coordination exercise of the Integrated Rescue Service System

When the checking of the technological equipment had been finished, an exercise during which the procedures of the intervention and communication between individual components of the Integrated Rescue System (the IRS) took place. The intervention procedure was optimised during the design stage. The safe access to the fire in the affected tunnel is ensured by Phase 2 of the fire ventilation, where the positive pressure protection is applied to the tunnel section from the fire onward, against the direction of travel (see Fig. 9). The commander of the intervention commands the tunnel operator, who activates Phase 2 of the fire ventilation, unless this condition exists already at the moment of the IZS arrival. Three examples of the intervention direction (the yellow arrow) in three selected cases are presented in Figure 9. The smoke logged part of the tunnel is displayed in red, the part protected with a positive pressure in blue and the unaffected tunnel in green.

The intervention itself is carried out in the Blanka complex of tunnels via the unaffected tunnel tube in the direction of travel to the cross passage which is closest to the fire in the tunnel part protected by the positive pressure during the course of





Obr. 9 Schéma TKB s vyznačenými 22 propojkami mezi tunely a třemi ukázkami přístupu k požáru

Fig. 9 The Blanka complex of tunnels chart with 22 cross passages between the tunnel tubes; three examples of the access to a fire

Vlastní zásah se v TKB provádí přes nezasažený tunel ve směru jízdy k propojce, která je nejbližší k požáru na části tunelu přetlakově chráněné vůči požáru během 2. fáze požárního větrání. Tato propojka je pro lepší orientaci zasahujících jednotek v nezasaženém tunelu světelně označena.

## 5. ZÁVĚR

Zprovoznění tunelu a kolaudace TKB včetně požárního větrání proběhlo úspěšně a tunel byl otevřen pro zkušební provoz v září 2015. Po roce zkušební provozu, během kterého probíhá optimalizace součinnosti souborů, proběhne vyhodnocení a uvedení do plného provozu.

Během zkušební provozu byly upraveny hodnoty reakce detektorů kouře. Vyšší prašnost ve městě a týdenní mytí kartáči často iniciovaly reakci na mimořádnou událost a tunel se uzavíral. Dále se ukázal velmi častý výskyt at' již skutečné, nebo falešné detekce stojícího vozidla.

Ing. JIŘÍ ZÁPAŘKA

Recenzovali / Reviewed: prof. Ing. Pavel Příbyl, CSc.,  
Ing. Václav Volner

Phase 2 of the fire ventilation. This cross passage is marked with lighting for the purpose of improving the orientation of the intervening units in the unaffected tunnel.

## 5. CONCLUSION

The commissioning and final inspection of the Blanka complex of tunnels, including the fire ventilation system, were successfully completed and the tunnels were opened for the trial operation in September 2015. After one-year trial operation during which the collaboration of the systems will be optimised, the operation will be assessed and the tunnels will be opened to full traffic.

The values of the reaction of the smoke detectors were adjusted during the trial operation. The higher rate of airborne dust in the city and weekly washing of the tunnel with brushes frequently initiated a response to an extraordinary event and the tunnel was closed. In addition, the occurrence of both the real or false detection of a stationary vehicle turned out to be very frequent.

Ing. JIŘÍ ZÁPAŘKA

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Požární větrání tunelového komplexu Blanka k zajištění bezpečného zásahu IZS. *Tunel*, 2014, 23. roč., č. 3
- [2] ČSN 73 7507: Projektování tunelů pozemních komunikací; kapitola 13.6. Požární větrání. Praha: 1/2014
- [3] ČSN 73 7507: Projektování tunelů pozemních komunikací; kapitola 13.6. Požární větrání. Praha: 1/2014
- [4] CETU Ventilation, Centre Detudes des Tunnels, 2003
- [5] PIARC Committee on Road Tunnels (C5), Fire and Smoke Control in Road Tunnels; 2005; 05.05.B; World Road Association
- [6] PIARC Technical Committee 3.3 Road tunnel operation; Operational strategies for emergency operation; 2011; 2011R02; World Road Association
- [7] SCHULDT, W. W. Tunnel safety and ventilation. Early fire detection in Swiss road tunnels with more than 1500 FireGuards sensors. Gratz, 2014.