

PŘEHLED POŽÁRNÍCH ZKOUŠEK V TUNELU RUNEHAMAR V NORSKU PROVÁDĚNÝCH V ROCE 2003

SUMMARY OF FIRE TESTS CONDUCTED IN RUNEHAMAR TUNNEL, NORWAY 2003

LIBOR FLEISCHER

ABSTRAKT

Nasimulovat reálný požár v tunelové stavbě není jednoduchá záležitost. Je to dáno zejména velikostí vlastních zkoušených konstrukcí. Existují samozřejmě certifikovaná zkušební laboratorní zařízení, která umí ověřit vlastnosti požárních konstrukcí nebo zmenšených modelů, ale rozměry zkušebních pecí jsou limitované. Jak se ukazuje i při zkouškách konstrukcí pro pozemní stavitelství, velkorozměrové vzorky se chovají odlišně od vzorků menších. U standardních nadzemních objektů se počítá, že po uplynutí určené doby požární odolnosti dojde ke kolapsu stavebních konstrukcí, který končí zpravidla zřícením stavby nebo její části. Může takový stav nastat i v podzemní stavbě? Samozřejmě pokud se tunelová stavba nachází v pevné a soudržné hornině, hrozí maximálně opadání požárem poškozeného ostění nebo části horniny. U mělce uložených podzemních staveb ovšem může vlivem porušení únosnosti ostění dojít k rozsáhlým závalům nebo zaplavení podzemních prostor. Projekt Runehamar byl prvním rozsáhlým projektem, který se pokusil najít odpověď na otázku, co se skutečně děje v tunelu, pokud v něm dojde k požáru kamionu s běžným nákladem, jako je dřevo nebo plast. Výsledky experimentu mohou být pro někoho překvapivé, pro někoho poučné. Naměřené a zaznamenané hodnoty jsou odrazem reálných dějů, které se odehrály v rámci čtyř zkoušek s různými náklady.

ABSTRACT

Simulating a fire in a tunnel structure is no simple matter. It is given first of all by the dimensions of the structures to be subjected to testing. Of course, certified testing laboratory facilities capable of verifying properties of fire structures or scaled-down models exist, but the dimensions of testing furnaces are limited. As it turns out even in the tests of structures for the structural engineering industry, large-size specimens behave differently from smaller ones. In the cases of standard surface buildings, it is taken into account that after the prescribed duration of fire resistance elapses, the structures will collapse, ending usually by the fall of the structure or its part. Can such a state take place even in an underground structure? Of course, if the tunnel structure is located in firm coherent ground, the maximum threat is that the tunnel lining or rock affected by the fire flakes off. However, in the cases of near-surface underground structures, extensive collapses or inundation of underground spaces can take place as the result of the bearing failure of the tunnel lining. The Runehamar project was the first extensive project which tried to find the answer to the question what actually goes on in a tunnel if a truck carrying a common load, such as timber or plastic ignites. The results of the experiment can be surprising for somebody or illuminating for somebody else. The measured and recorded values are the reflection of the real processes which took place within the framework of four tests using different cargos.

ÚVOD

Uběhlo již pár let, co byly prováděny rozsáhlé požární zkoušky ve starém tunelu Runehamar v Norsku. Jednalo se o jedny z nejrozsáhlejších zkoušek zaměřených na zkoumání reálných požárů nákladních vozidel. Impulzem k těmto zkouškám byly vážné požáry v tunelech v 90. letech, zejména požáry v Eurotunelu, tunelu Mont Blanc, Tauernském tunelu a Svatogothardském tunelu. U těchto požárů došlo kromě zničení samotných vozidel a technologického vybavení tunelů také k destruktivnímu poškození samotného tunelového ostění. Důsledkem bylo v některých případech zastavení provozu tunelů na dlouhé měsíce. Došlo zde i ke ztrátám na životech.

Dalším důvodem těchto testů bylo zjištění, že mezi dopady reálných požárů a výsledky zkoušek prováděných v malém rozsahu jsou stále velké rozdíly. V rámci švédského a evropského výzkumného programu bezpečnosti v tunelech byly v září roku 2003 provedeny komplexní rozsáhlé zkoušky. Konkrétně byly posuzovány požáry návěsů v rozsahu, který přibližně odpovídal výše uvedeným vážným požárům. Zkoušky byly prováděny Švédským národním zkušebním a výzkumným ústavem ve spolupráci s partnery projektu UPTUN: Výzkumem staveb a konstrukcí, střediskem požárního výzkumu TNO z Nizozemí a Norskou laboratoří pro výzkum požáru (SINTEF/NBL). Do projektu UPTUN bylo zapojeno 41 partnerů ze 17 evropských zemí. I když zkoušky proběhly již před

INTRODUCTION

Several years have already passed since extensive fire tests were conducted in the old Runehamar tunnel in Norway. They were ones of the most extensive tests focused on the examination of real truck fires. The impulse towards those tests was given by serious fires in tunnels during the 1990s, first of all fires in the Eurotunnel, the Mont Blanc tunnel, the Tauern tunnel and the St Gotthard tunnel. Apart from the damage to vehicles themselves and tunnel equipment, the tunnel lining itself suffered destructive damage in the cases of those fires. As a result, the operation of the tunnels was in some cases stopped for long months. Even lives were lost.

Another reason for the tests lied in the fact that there still are great differences between the consequences of real fires and the results of small scale tests. Extensive comprehensive tests were carried out in September 2003 within the framework of a Swedish and European research programme focused on safety in tunnels. Concretely, semitrailer fires were assessed within a range approximately corresponding to the above-mentioned serious fires. The tests were carried out by the Swedish National Test and Research institute in collaboration with the UPTUN project partners: the TNO Building and Construction Research, Centre for Fire Research in the Netherlands and the Norwegian Fire Research Laboratory (SINTEF/NBL). There were 41 partners from 17 countries involved in the UPTUN project. Even though the tests were conducted some time ago, their results are a good source of knowledge even today.

Tab. 1 Komodity použité jako palivo ve čtyřech zkouškách
Table 1 Commodities used as fuels in four tests

zkouška č.	popis požárního zatížení	celková hmotnost (kg)	teoretická tepelná energie (GJ)	hmotnostní podíl plastu (%)
test No.	fire load description	total weight (kg)	theoretical thermal energy (GJ)	weight percentage of the plastic (%)
1	360 dřevěných palet o rozměrech 1200x800x150 mm, 20 dřevěných palet o rozměrech 1200x1000x150 mm, 74 PE palet o rozměrech 1200x 800x150 mm	10 911	240	18
1	360 wooden pallets with the dimensions of 1200x800x150mm, 20 wooden pallets with the dimensions of 1200x1000x150mm, 74 PE pallets with the dimensions of 1200x 800x150mm	10911	240	18
2	216 dřevěných palet a 240 PUR rohoží o rozměrech 1200x800x150mm	6853	129	18
2	216 wooden pallets and 240 PUR mats with the dimensions of 1200x800x150mm	6853	129	18
3	nábytek a příslušenství (zabalená dvířka skříní, čalouněné loketní opěrky, čalouněné pohovky, vycpaná zvířata, plastové květiny, květináče, dřevěný domeček pro panenky, plastové hračky, 10 velkých gumových pneumatik)	8500	152	18 (bez pneumatik)
3	furniture and accessories (packed doors of cabinets, upholstered armrests, upholstered sofas, stuffed animals, plastic flowers, flower pots, a wooden dollhouse, plastic toys, 10 big rubber tyres)	8500	152	18 (without tyres)
4	600 krabic z vlnité lepenky s náplní plastových pohárků (18 000 pohárků) z nevytlačovaného polystyrenu	3120	67	19
4	600 corrugated cardboard boxes filled with not extruded polystyrene plastic tumblers (1800 tumblers)	3120	67	19

časem, jejich výsledky jsou dobrou studnicí poznatků i v dnešní době.

Tento článek přináší nejzákladnější informace o prováděném výzkumu.

CÍLE PROJEKTU

Z politického a společenskoeconomického pohledu jsou tunely v celoevropské dopravní síti velmi důležité. Pro volný a konkurenceschopný evropský trh má dobře řešená dopravní situace prvořadý význam. Pro uživatele – dopravce, soukromé osoby je nezbytně důležité, aby byly tunely bezpečné a současně ekonomicky přínosné. Přerušování jakékoliv dopravní sítě má vždy společenskoeconomický dopad. Díky celoevropským politickým změnám a ekonomickému růstu dochází ke zvyšování mobility obyvatel a evropské dopravní sítě se rozšiřují a modernizují. Je potřeba zajistit důvěru v bezpečnou dopravu v silničních a železničních tunelech. Z technického hlediska se projekt Runehamar zaměřil na získání detailních poznatků o průběhu požárů nákladů na návěsích a sledoval účinky tepla na ostění tunelu v blízkosti požáru. Tyto zkoušky poskytly vědecky podložené výsledky a významné informace, které mohou využít schvalující orgány, projektanti tunelů a hasičské záchranné sbory.

Detailnější informace o celém projektu lze nalézt v publikaci [1] nebo na internetových stránkách [2] uvedených v použité literatuře.

PŘÍPRAVA

Před vlastními požárními zkouškami byly v laboratořích provedeny předběžné zkoušky sestávající ze zkoušek volného hoření pod velkou digestoří (průmyslovým kalorimetrem). Cílem těchto zkoušek bylo získat předběžné poznatky o rozvoji požárů. Uspořádání vzorku u předběžných zkoušek je na obr. 1. Celkem

This paper brings the basic information about the completed research.

PROJECT OBJECTIVES

From the political and socioeconomic point of view, tunnels on the European transport network are very important. Freedom in transport has got paramount importance for the free and competitive European market. For users – carriers as well as private persons, it is of essential importance that tunnels are safe and, at the same time, economically beneficial. Interruption of any transport network has always a socioeconomic impact. Thanks to European political changes and economic growth, the mobility of the population grows and European transport networks are expanded and modernised. It is necessary to



Obr. 1 Volné odhořívání dřevěných palet pod průmyslovým kalorimetrem
Fig. 1 Free process of burning wooden pallets under an industrial calorimeter



Obr. 2 Zavěšení zkušebního panelu v průběhu zkoušky
Fig. 2 Hanging a test board during the course of the test

byly provedeny tři zkoušky s využitím dvou palet daného druhu nákladu. Výška palet byla 1,5 metru, což odpovídá zhruba polovině výšky nákladu požárního zatížení při zkoušce ve skutečném měřítku. Pro zkoušky pod průmyslovým kalorimetrem byly použity následující druhy nákladu:

1. dřevěné a plastové palety (82/18 %);
2. dřevěné palety a PUR (polyuretanové) rohože (82/18 %);
3. kartonové krabice s PS (polystyrénovými) pohárky (81/19 %).

S ohledem k očekávanému vysokému tepelnému namáhání bylo nutné tunel izolovat materiály, které odolávají vysokým teplotám. Bylo rozhodnuto použít panely PROMATECT®-T místo například nástřiku. Před zkouškami v tunelu Runehamar nebyly známé účinky zvýšeného požárního zatížení na množství uvolněného tepla a teplotní křivku požáru teplota/čas. Proto bylo doporučeno provést požární zkoušku uvažované konstrukce podle nizozemské teplotní křivky požáru RWS. Kvůli prudkému nárůstu teploty v prvních pěti minutách, který způsobí ostění tunelu tepelný šok, a dosahované maximální teplotě 1350 °C, je tato teplotní křivka požáru RWS stále považována za nejnepríznivější typ uhlovodíkového požáru.

Požadavky na panely PROMATECT®-T lze popsat následovně:

- systém měl být schopen odolat čtyřem požárům s maximálními teplotami až do 1400 °C;
- kritérium teploty na povrchu horniny, v níž je tunel vyražen, bylo stanoveno na 250 °C.

Z hlediska minimalizace škod byla tato teplota vnímána jako pro horninu bezpečná. Systém nesměl projevit žádné poruchy celistvosti. To se týkalo panelů PROMATECT®-T a podpěrného rámu včetně upevňovacích součástí. Montáž systému byla jednoduchá, čímž se omezil potřebný čas montáže celého systému. V nepravděpodobném případě poškození panelů (mechanický náraz) systém umožňoval rychlou výměnu poškozených panelů. Promat také požadoval možnost vyjmutí panelů, které byly vystaveny účinkům požáru, z tunelu za účelem jejich prozkoumání ve Výzkumném a technologickém středisku společnosti Promat (PRTC).

Aby bylo možné provést více než jednu zkoušku, byly desky sestaveny ze dvou tenkých desek (20 a 25 mm), navzájem spojených vrstvou lepidla. Toto řešení sice není běžné a praktické, ale v tomto případě bylo zvoleno proto, aby byla zaručena integrita panelu po dobu více než jedné extrémní požární zkoušky.

PŘEDBĚŽNÉ ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO SYSTÉMU

V laboratoři GERCO se provedly tři požární zkoušky, aby se posoudila celistvost desek po třech požárních zkouškách a celistvost zvolených upevňovacích součástí pro montáž konstrukce. Jak

ensure trust in safe traffic in road and railway tunnels. From the technical point of view, the Runehamar project was focused on obtaining detailed knowledge about the course of cargo fires on semitrailers and followed the effects of heat on tunnel linings in the vicinity of a fire. These tests provided scientifically founded results and important information, which can be used by approving authorities, tunnel designers and fire rescue services.

More detailed information about the whole project can be found in reference [1] or on web pages [2] contained in References.

PREPARATION

Preliminary tests comprising the testing of free burning under a large extractor hood (an industrial calorimeter) were conducted in laboratories prior to the fire tests themselves. The objective of those tests was to obtain preliminary knowledge regarding the development of fires. The arrangement of the specimens used for the preliminary tests is presented in Fig. 1. The total of three tests was carried out, using two pallets of each particular cargo type. The pallets were 1.5m high. This height roughly corresponds to a half of the height of the cargo during the course of a full-scale test. The following types of cargo were used for testing under an industrial calorimeter:

1. wooden and plastic pallets (82/18 %);
2. wooden pallets and PUR (polyurethane) mats (82/18 %);
3. cardboard boxes with PS (polystyrene) tumblers (81/19 %).

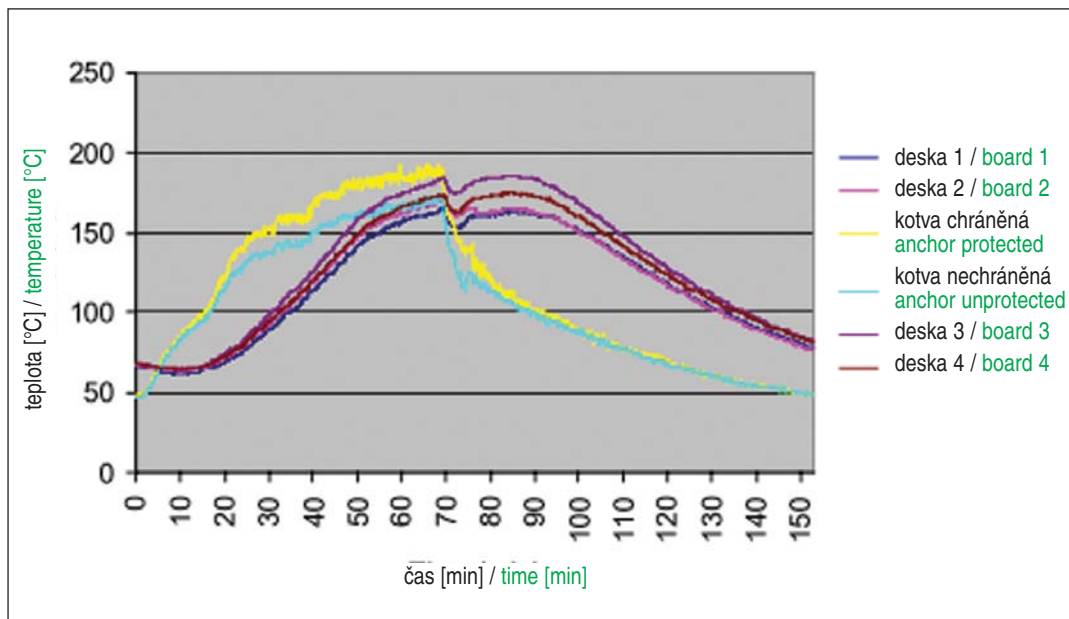
With respect to the expected high thermal stress it was necessary to insulate the tunnel with materials resisting high temperatures. The decision was made that PROMATECT®-T boards were to be used instead of a spray-applied layer. Before the tests in the Runehamar tunnel, the effects of increased fire loading on the amount of the released heat and the time/temperature fire curve had not been known. It was for that reason recommended that the fire test of the structure under consideration be carried out according to the Netherlands standard - the RWS fire curve. With respect to the steep increase in temperature during the initial five minutes, which causes a thermal shock to the tunnel lining, and to the maximum temperature of 1350°C reached, the RWS fire curve is still considered to be the most favourable type of a hydrocarbon fire.

Requirements for PROMATECT®-T boards can be described as follows:

- the system should be able to resist four fires with the temperatures up to 1400°C;
- the criterion for the temperature on the surface of the ground which the tunnel is driven through was set at 250°C.



Obr. 3 Ohřívání desky PROMATECT®-T a jejich upevnění
Fig. 3 Heated PROMATECT®-T boards and their fixation



Obr. 4 Teploty během zkoušky 3 na neexponované straně
Fig. 4 Temperatures during the course of the Test No. 3 on the unexposed side

je vidět na obr. 2 a 3, desky byly zavěšeny na kotevních šroubech M6. Tento způsob se u obkladů ve standardních tunelech neprovádí, ale tady byl zvolen z důvodů možné rychlé opravy. Zkoumán byl také vliv izolace na ocelových upevňovacích šroubech. Dva ze čtyř šroubů byly ponechány bez izolace a byl měřen nárůst teploty na neexponované straně kotevních šroubů. Jak je vidět na obr. 4, rozdíl teplot byl zanedbatelný. Na nechráněných šroubech 193 °C, na izolovaných 174 °C.

Během těchto zkoušek byla zaznamenána maximální teplota v peci 1350 °C, což odpovídá maximální teplotě křivky požáru RWS. Po třech provedených zkouškách teplota na neexponované straně desek nepřekročila hodnotu 200 °C, kterou bylo třeba srovnávat s maximální dovolenou teplotou na povrchu okolní horniny 250 °C.

Výsledkem předběžných zkoušek bylo konstatování, že během tří po sobě jdoucích požárních zkouškách nebyly u desek PROMATECT®-T a podpěrného rámu zaznamenány žádné poruchy celistvosti. Na neexponované straně byla naměřena maximální teplota desek 186 °C a neprojevil se žádný významný vliv tepelného mostu v místě kotevních šroubů. Díky těmto závěrům byl systém nabídnut konsorciu tunelu Runehamar pro použití v programu požárních zkoušek ve skutečném měřítku.

PRŮBĚH VLASTNÍCH ZKOUŠEK

Místo požáru bylo ve vzdálenosti 560 m od západního vjezdu, směr proudění vzduchu uvnitř tunelu byl

From the aspect of the minimisation of damage, this temperature was considered as safe for rock. The system was not allowed to manifest any damage to integrity. This applied to PROMATECT®-T boards and the supporting frame including fixing materials. The assembly of the system was simple, which meant a reduction in the time required for the installation of the whole system. In the unlikely case of a damage caused to the boards (a mechanical impact), the system allowed for the quick replacement of the damaged boards. The company of Promat in addition required a possibility of removing the boards which were exposed to the effects of the fire from the tunnel for the purpose of examining them at the Promat Research & Technology Centre (PRTC).

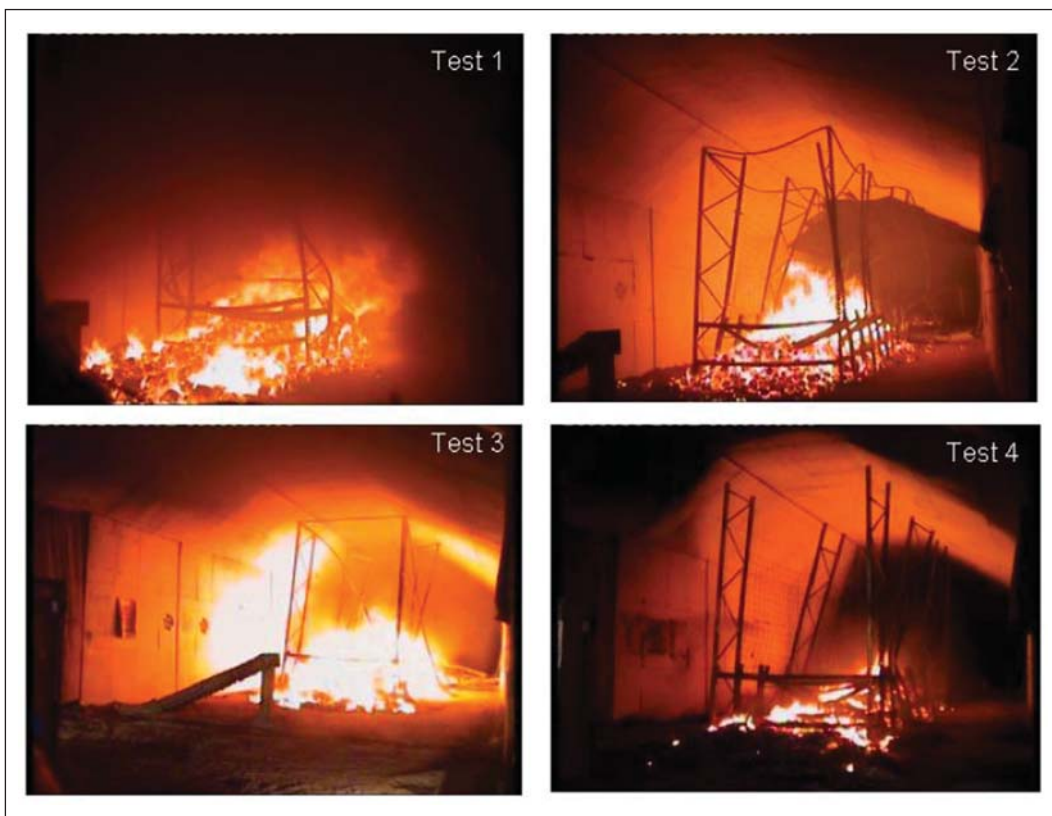
The boards were assembled from two thinner boards (20 and 25mm) connected to one another by a layer of an adhesive. Of course, this solution is not common and practical, but it was chosen in this case so that the integrity of the board for more than one extreme fire test was maintained.

PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE PROPOSED SYSTEM

Three fire tests were carried out in the GERCO laboratory with the aim of assessing the integrity of the boards after three fire tests and the



Obr. 5 Průběh požárů po 5 minutách
Fig. 5 Development of fires recorded at 5-minute intervals



Obr. 6 Průběh požárů po 30 minutách
Fig. 6 Development of fires recorded at 30-minute intervals

z východu na západ. Průřez tunelu v místě požáru je znázorněn na obr. 8. V rámci programu byly provedeny čtyři zkoušky s požárem v nákladovém prostoru uvnitř návěsu. Ve třech zkouškách byly použity směsi různých vybraných celulózových a plastových materiálů. V jedné zkoušce byl použit reálný druh nákladu, který obsahoval nábytek a bytové příslušenství. Ve třech zkouškách byl hmotnostní poměr přibližně 80 % celulózy a 20 % plastu. Náklady byly překryty standardní polyesterovou plachtou. Druhy nákladu jsou uvedeny v tabulce 1.

MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Průběh požárů

Na obr. 5 a 6 jsou zobrazeny požáry při jednotlivých zkouškách, a to po 5, respektive 30 minutách. Při první a druhé zkoušce (Test 1, Test 2) zůstal náklad a fotoaparát ve stejné poloze. Při třetí zkoušce (Test 3), byl náklad a fotoaparát posunut proti směru proudění o 5 m. Při čtvrté zkoušce (Test 4) byl náklad posunut o dalších 5 m proti směru proudění. Obr. 6 a 7 poměrně jasně ukazují, že všechny požáry po 30 minutách stále hořely a při první a třetí zkoušce požár ještě významně vzplanul.

Teploty spalin

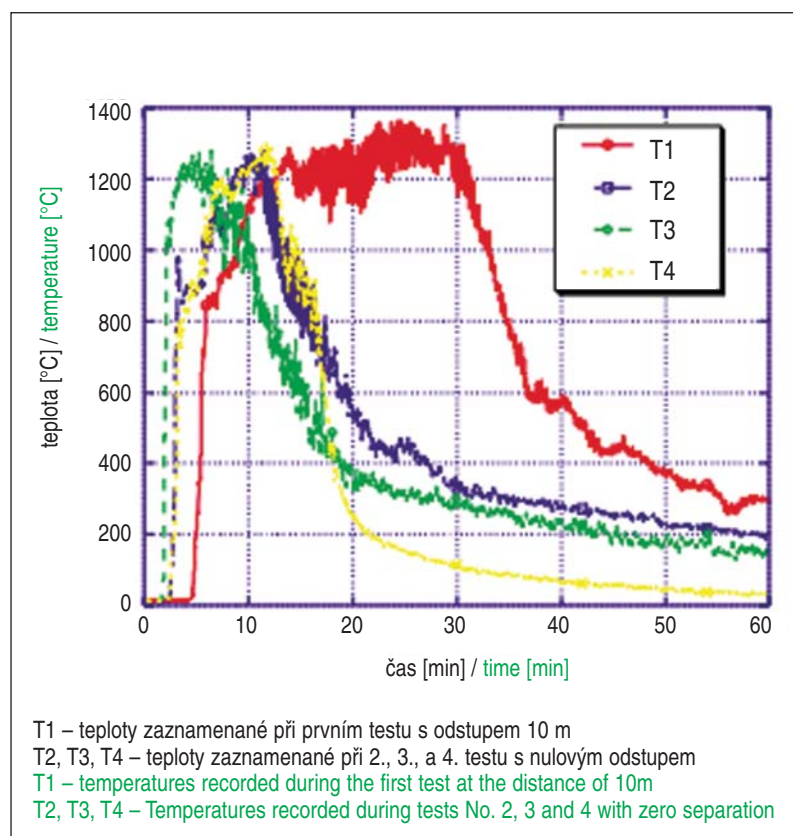
Čtyři druhy nákladů použité při zkouškách byly zvoleny tak, aby umožnily simulovat průběh požáru a aby při nich byla různá maximální velikost uvolněného tepla. První zkouška měla nejvyšší celkový energetický obsah a vykazovala nejvyšší maximální hodnoty uvolňování tepla (obr. 7). Velké množství hořlavého materiálu také zajistilo delší dobu uvolňování vysokoteplotních spalin, maximální dosažená teplota byla 1365 °C.

Teplota spalin je v blízkosti stropu při první zkoušce (odstup 10 m) porovnána se čtyřmi různými teplotními křivkami požáru (viz obr. 2 v článku Ing. Fleischera na str. 6). Je dobře vidět, že nárůst teplot u prvního požáru

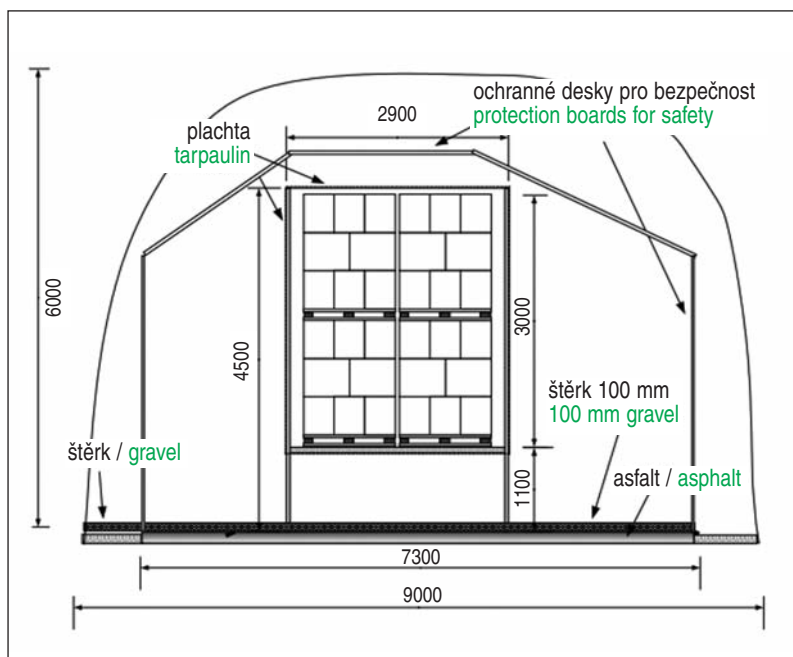
integrity of the components used for the fixation during the installation. As obvious from Figures 2 and 3, the boards were hung with M6 anchoring bolts. This system is not applied to cladding in standard tunnels, but it was chosen in this case so that a quick repair was possible. In addition, the effect of the insulation on the steel fixation bolts was examined. Two of the four bolts were left without insulation and the rise of temperature on the non-exposed side of the anchoring bolts was examined. As shown in Fig. 4, the difference in temperatures was negligible. The temperatures measured on unprotected as well as insulated bolts amounted to 193°C and 174°C, respectively.

The maximum temperature recorded during these tests amounted to 1350°C. This value corresponds to the maximum temperature for the RWS fire curve.

After the completion of the three tests, the temperature on the non-exposed side of the boards did not exceed 200°C. This value had to be compared with the maximum temperature of 250°C permitted for the surface of the surrounding rock.



Obr. 7 Naměřené teploty spalin v blízkosti požáru během všech 4 testů
Fig. 7 Temperatures of products of combustion near the fire measured during all 4 tests



Obr. 8 Schéma protipožárního obkladu ostění deskami PROMATECT®-T v místě zkušebního tělesa

Fig. 8 Chart of PROMATECT®-T protection boards for safety in the location of the test specimen

je velmi prudký a přibližně tři minuty od vzplanutí teplota téměř přesně odpovídá uhlovodíkové křivce. Dále teplota narůstá a sleduje takřka přesně křivku RWS. Přitom křivka RWS byla navržena na modelování požáru cisterny s benzinem nebo motorovou naftou, trvajících 120 minut a uvažovaným uvolňováním tepla 300 MW. Při zkouškách v Runehamaru nebyla hodnota 120 minut dosažena, ale požáry přesto s velkou přesností v počátku kopírovaly křivku RWS. Při čtvrté zkoušce bylo použito pouze 3210 kg kartonových krabic a polystyrenových pohárků, ze všech zkoušek měl tento náklad teoreticky nejmenší tepelnou energii. Avšak zaznamenané teploty odpovídaly první zkoušce, i když jen kratší dobu.

Tepelná izolace a odpadávání skály

Jak je vidět na obr. 8, tunel byl izolován deskami PROMATECT®-T. Izolace byla provedena z bezpečnostních důvodů, aby se zabránilo padání kusů skály tunelového ostění. Izolovaná délka stropu byla 75 m, stěny byly izolovány v délce 25 m – kolem centra požáru. Za izolovanými stěnami ve směru proudění byla skála chráněna keramickými rohožemi, zejména k omezení průniku horkých zplodin nad stropní izolaci. Tyto horké zplodiny by jinak mohly narušit jak skalní strop, tak ocelovou konstrukci, na které byly zavěšeny izolační desky. Také proti směru proudění byly

Tab. 2 Špičkové hodnoty rychlosti vývinu tepla
Table 2 Peak values of heat release rates

zkouška č.	doba od vzplanutí k dosažení nejvyšší hodnoty uvolňování tepla (min)	lineární rychlost šíření požáru (R=koeficient lineární regrese) (MWmin ⁻¹)	špičkové hodnoty rychlosti vývinu tepla (MW)	odhad na základě laboratorních zkoušek (MW)
test No.	time from flaring to reaching the highest heat release value (min)	linear velocity of spreading the fire (R=coefficient of linear regression) (MWmin ⁻¹)	peak values of heat release rate (MW)	estimation based on laboratory tests (MW)
1	18,5	20,5 (0,997)	203	186–217
2	14,3	29,0 (0,991)	158	167–195
3	10,4	17,0 (0,998)	124,9	–
4	7,7	17,7 (0,996)	70,5	79–95

The preliminary testing led to the statement that no failure of integrity of PROMATECT®-T boards and the supporting frame were recorded during three successive fire tests. The maximum temperature of the boards measured on the non-exposed side amounted to 186°C and no significant influence of a thermal bridge manifested itself in the location of the anchoring bolts. Owing to these conclusions, the system was offered to the Runehamar consortium for the use in the programme of full-scale fire tests.

THE COURSE OF THE TESTS THEMSELVES

The fire location was at the distance of 560m from the western entrance; the direction of the air flow inside the tunnel was from the east to the west. The tunnel cross-section in the location of the fire is presented in Fig. 8. Four tests were conducted in the framework of the programme, with the fire inside the cargo space. Mixtures of various selected cellulosic and plastic materials were used in three tests. In one test, a realistic cargo type was used. It consisted of furniture and household accessories. In three tests the cellulose to plastics weight percentage was approximately 80% to 20%. The cargos were covered with a standard polyester canvas. The cargo types are presented in Table 1.

MEASUREMENTS AND ASSESSMENT

Development of fires

Figures 5 and 6 display the fires in individual tests, taking the snaps at 5-minute respectively 30-minute intervals. During the first test and second test (Test No. 2; Test No. 2) the cargo and the camera remained in the same positions. In the third test (Test No. 3) the cargo and the camera were shifted against the airflow direction (upstream) by 5m. In the fourth test (Test No. 4) the cargo was shifted upstream by additional 5m. Figures 6 and 7 relatively clearly show that all fires continued to burn after 30 minutes and, during the first and third tests, the fire repeatedly significantly flared up.

Temperatures of products of combustion

The four types of the cargos used in the tests were chosen with the intention that they allow the simulation of the fire development and that the maximum magnitude of the heat released during them varied. The first test had the maximum energy content and exhibited the highest maximum heat releasing values (see Fig. 7). The big amount of the combustible material in addition secured a longer time of releasing high-temperature products of combustion; the maximum temperature reached 1365°C.

The temperature of products of combustion close to the tunnel roof measured during the first test (at the distance of 10m) is compared with four different fire temperature curves (see Fig. 2 in the paper Fire



Obr. 9 Padající kusy skály; a) za izolovanou oblastí ve směru proti proudění, b) za izolovanou oblastí ve směru proudění
Fig. 9 Falling pieces of rock; a) beyond the insulated area (upstream from the fire), b) beyond the insulated area (downstream from the fire)

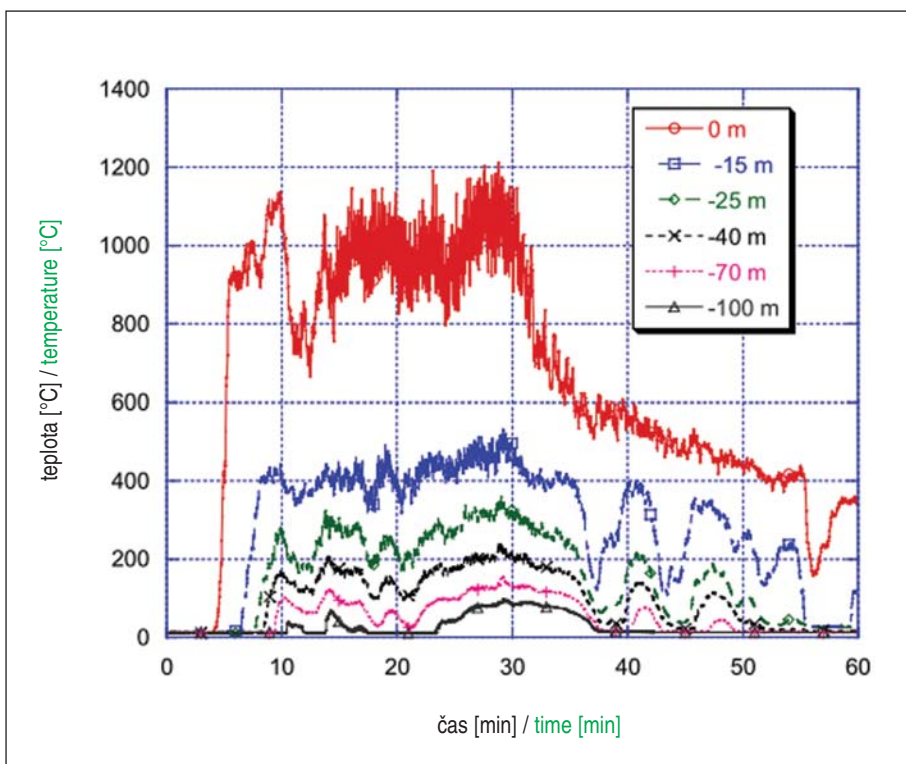
stěny izolovány keramickými rohožemi do vzdálenosti 9 m, i když ne v celé výšce až k vozovce. To proto, aby se spaliny, vracející se proti směru proudění, udržely pod stropní izolací. Během první zkoušky a po ní se jasně ukázalo, jak taková přídatná izolace byla zapotřebí, protože v obou směrech – po směru proudění, i proti – za hranicí izolace na vozovku padaly velké kusy skály (obr. 9). Za izolací na straně po směru proudění byl tunel poškozen prakticky po celé délce až k západnímu vjezdu.

Padání kusů skály za izolovanou oblastí na straně proti směru proudění bylo způsobeno stáčením zplodin, a to i přes protichůdný vliv větrání. Toto vracení bylo způsobeno tím, že s rostoucí intenzitou požáru se snižovala rychlost, takže nad požářištěm docházelo k nárůstu tlakového spádu. Výsledky je možné vidět na obr. 10, kde jsou znázorněny teploty během požáru při první zkoušce. Je vidět, že ve vzdálenosti 40 m od požáru proti směru proudění se teplota dlouhou dobu drží vysoko nad hodnotou 100 °C a až do

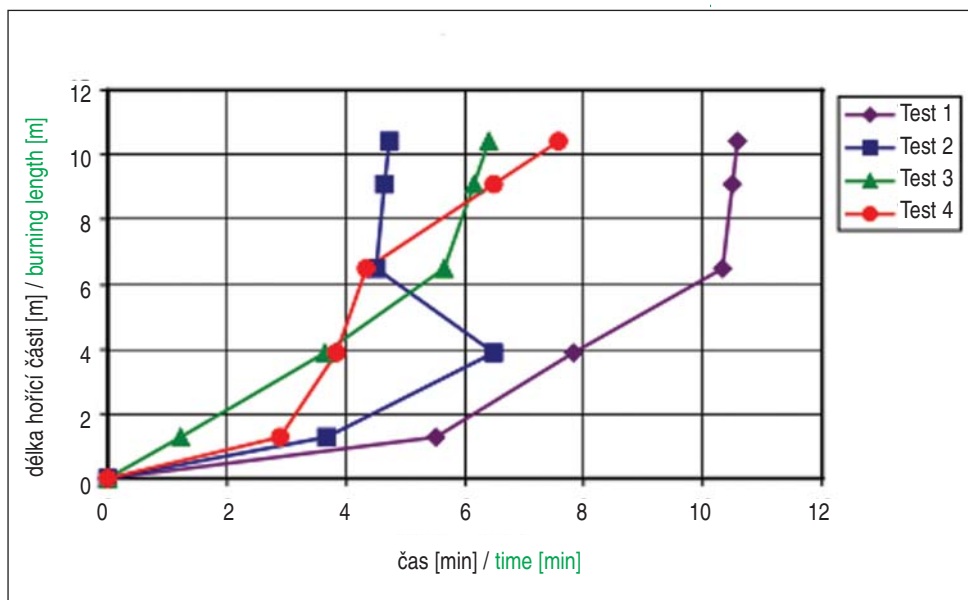
Protection of Tunnel Linings). It is well visible that the increase in temperatures in the case of the first fire is very steep and the temperature measured approximately three minutes after flaring of the fire nearly exactly corresponds to the hydrocarbon curve. Further on the temperature grows and follows nearly exactly the RWS curve. However, the RWS curve was designed for modelling a fire involving a tank containing petrol or diesel oil, lasting for 120 minutes, with the assumed heat release of 300MW. The 120-minute value was not reached during the tests in the Runehamar tunnel; nevertheless, in the beginning the fires copied the RWS curve with great accuracy. In the fourth test, only 3210kg of cardboard boxes and polystyrene tumblers were used; of all tests the thermal energy of this cargo was theoretically the lowest. But the temperatures recorded corresponded to the first test, even though for a shorter time.

Thermal insulation and flaking off of rock

As shown in Fig. 8, the tunnel was insulated with PROMATECT®-T boards. The insulation was carried out for safety reasons, to prevent falling of pieces of the rock lining the tunnel. The length of the ceiling provided with the insulation was 75m; walls were insulated along the length of 25m – around the fire centre. Beyond the insulated walls, upstream from the fire, the rock was protected with ceramic mats, mainly for restricting the passage of hot products of combustion over the insulation of the ceiling. The hot products of combustion could otherwise damage both the rock roof and the steel structure carrying the insulation boards. Also upstream from the fire, the walls were insulated with ceramic mats up to the distance of 9m, even though not covering the whole height down to the roadway. It was so with respect to the products of combustion returning against the direction of the flow to be kept under the roof insulation. During the course of the first test and after the test it clearly turned out that such the additional insulation was necessary because of the fact that big pieces of rock (see Fig. 9) were falling in both directions – upstream and downstream – beyond the insulation borders. The tunnel suffered damage beyond the insulation on the side in the direction of airflow virtually throughout the length, up to the western entrance.



Obr. 10 Teplota na straně proti směru proudění v různých vzdálenostech od požáru
Fig. 10 Temperature on the upstream side at various distances from the fire



Obr. 11 Délka hořící části nákladu v závislosti na čase
Fig. 11 The length of the burning portion of the cargo in dependence on time

vzdálenosti 100 m od požáru proti směru proudění je teplota stále blízká 100 °C.

Teplota uvnitř nákladu a šíření požáru

Všechny zkoušky vykazují mezi 10. až 15. minutou teploty uvnitř nákladu v rozmezí 900 °C až 1000 °C, maximální hodnota při první zkoušce je 1200 °C. Při první zkoušce se první termoelektrický článek v blízkosti požáru ohřál zhruba 3 minuty po vzplanutí. Pouhých 7 minut na to byl celý náklad v plamenech. Při druhé zkoušce je doba mezi ohřevem prvního a posledního termoelektrického článku ještě kratší, 4 minuty. Při všech zkouškách byl celý náklad v plamenech v rozmezí od 8 do 10 minut po zapálení. Na obr. 11 je znázorněna „délka hořící části nákladu“ v závislosti na čase, vztažená k teplotě 600 °C. První a třetí zkouška vykazují téměř monotónní nárůst „délky hořící části“ v čase odpovídajícím konstantní rychlosti šíření požáru zhruba 18 mm/s pro „délku hořící části“ v rozmezí 1,3 až 6,5 metru. Jinak je tomu u druhé a čtvrté zkoušky. Čtvrtá zkouška naznačuje ještě rychlejší šíření požáru v této délce. Kvůli padajícím částem nákladu během zkoušek je

Falling of pieces of rock beyond the insulated area on the side upstream from the fire (against the direction of airflow) was caused by turning of products of combustion back, even despite the contradictory effect of the ventilation. This turning back was caused by the fact that the flow velocity was reducing with the growing fire intensity, therefore the pressure gradient was growing above the seat of the fire. The results can be seen in figure 10, presenting the temperatures during the fire in the first test. It can be seen that the temperature value at the distance of 40m upstream from the fire is kept for a long time high above 100°C and is still near to 100°C up to the distance of 100m upstream from the fire.

Temperature inside cargo and spreading of fire

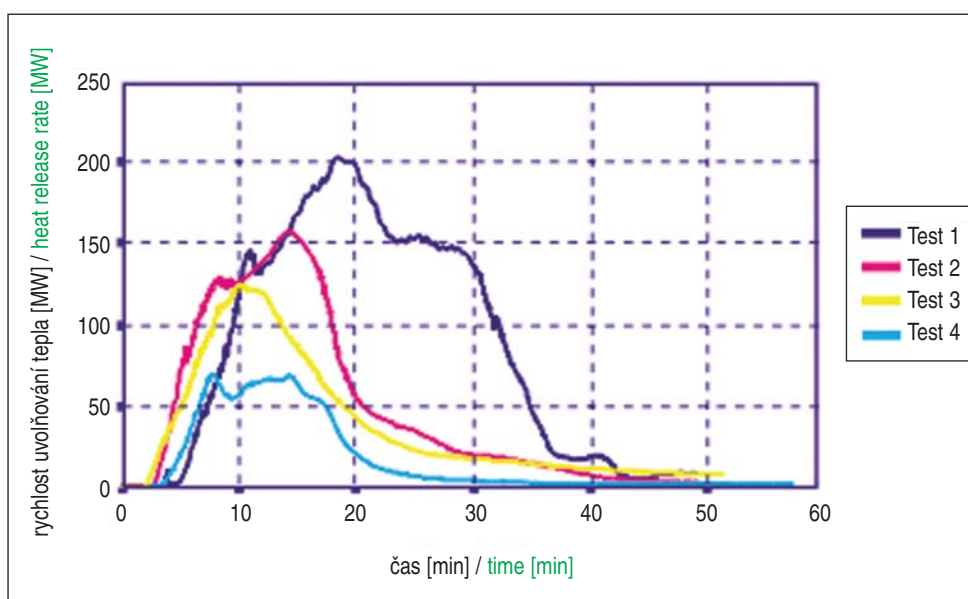
Between the 10th to 15th minute, all tests exhibit temperatures within the range of 900°C – 1000°C; the maximum value in the first test is 1200°C. During the first test the first thermoelectric couple in the vicinity of the fire heated up approximately 3 minutes after the fire burst. A mere 7 minutes later the whole cargo was in flames. In the second test, the interval between the first and last thermocouple heating up is even shorter, 4 minutes. In all tests the whole cargo was in flames within the range of 8 to 10 minutes after ignition. Fig. 11 presents the “length of the burning portion of the cargo” in dependence on time, related to the temperature of 600°C. The first test and third test exhibit nearly monotonous growth of the “length of the burning portion” with time, which corresponds to a constant velocity of spreading the fire of approximately 18mm/s for the “length of the burning portion” between 1.3 to 6.5m. This is different as far as the second test and fourth test are concerned. The fourth test suggests even faster spreading of fire along this length. Unfortunately, more detailed analysing is difficult because of the parts of the cargo falling down (see Fig 11). This fact could even be the reason for the unrealistic behaviour during the test No. 3, where it looks as if the “length of the burning portion” of 6.5m took place sooner than the “length of the burning portion” of 4.5m.

Heat development rate

The following apparatuses were used for determining the heat release values:

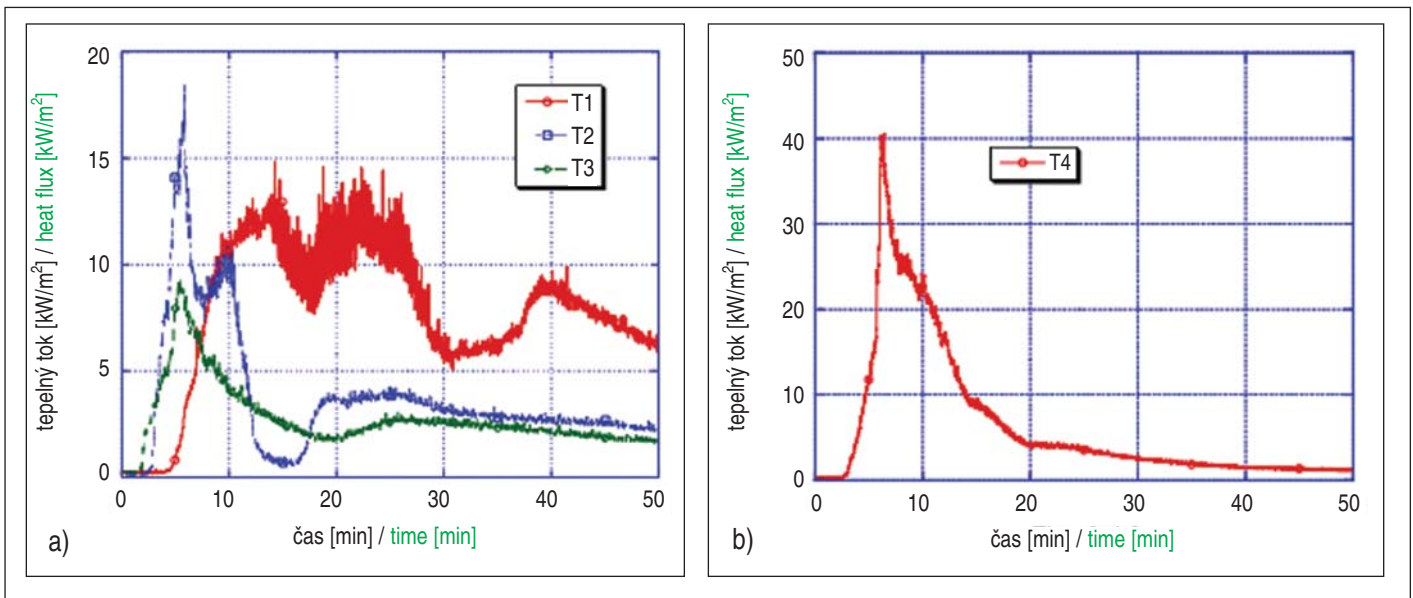
- 5 bidirectional differential pressure sensors;
- 12 thermoelectric couples;
- 3 oxygen (O₂) analysers;
- 2 carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) analysers.

The measurements are not presented in this paper. All more detailed information is contained in reference [1] which was published after the tests and from which this paper draws. Pulsation of the fire was recorded during the course of the initial two fire tests (Test No. 1 and Test No. 2) at the time when the heat release rate exceeded 130MW. Owing to this fact the measurement station recorded the state of air flow pulsation, where the measurement results proved that the maximum velocity pulsated in the range



Obr. 12 Rychlost vývinu tepla čtyř velkorozměrových požárních zkoušek s požárním zatížením těžkých nákladních automobilů

Fig. 12 Heat buildup rate for four large-scale fire tests with fire loads on heavy trucks



Obr. 13 Sálání tepla sestavy návěsu na straně proti směru proudění; a) hustota toku tepla ve vzdálenosti 10 metrů od sestavy návěsu proti směru proudění, b) hustota toku tepla ve vzdálenosti 5 metrů od sestavy návěsu proti směru proudění

Fig. 13 Heat radiation of the semitrailer set on the upstream side of the fire; a) the heat flow density at the distance of 10m from the semitrailer set upstream from the fire, b) the heat flow density at the distance of 5m from the semitrailer set upstream from the fire

však podrobnější analýza obr. 11 obtížná. To by také mohl být důvod nerealistického chování při zkoušce 3, kdy to vypadá, jako by „délka hořící části“ 6,5 m nastala dříve než „délka hořící části“ 4,5 m.

Rychlost vývinu tepla

Ke stanovení hodnot uvolněného tepla bylo použito několik různých přístrojů:

- 5 obousměrných snímačů tlakového rozdílu;
- 12 termoelektrických článků;
- 3 kyslíkové (O₂) analyzátoři;
- 2 analyzátoři oxidu uhličitého (CO₂) a oxidu uhelnatého (CO).

Měření nejsou v tomto článku uvedena. Veškeré podrobnější informace jsou v publikaci [1], která byla po zkouškách vydána a ze které tento článek čerpá. Během prvních dvou požárních zkoušek (zkoušky 1 a 2) bylo zaznamenáno pulzování požáru v době, kdy rychlost uvolňovaného tepla překračovala 130 MW. Díky tomu byl v měřicí stanici zaznamenán stav pulzování proudění vzduchu, kdy výsledky měření prokázaly, že maximální rychlost pulzovala v rozmezí 3 až 4 ms⁻¹ směrem k minimální rychlosti v rozmezí 1 až 1,5 ms⁻¹. Perioda maximální rychlosti byla v této době zhruba 45 sekund. Křivky hodnot uvolňování tepla jsou znázorněné na obr. 12 a představují již skutečné hodnoty (průměr v době pulzování pro první a druhou zkoušku) po provedení korekce doby přenosu.

Když se hodnota uvolněného tepla požáru dostala nad 5 MW, u všech zkoušek se rychlost nárůstu požáru jevila lineární až do 100 MW, s výjimkou čtvrté zkoušky, kdy je hodnota uvolněného tepla rovna 70 MW. K aproximaci hodnot uvolněného tepla v rozmezí 5–100 MW (pro první až třetí zkoušku) a 5–70 MW (pro čtvrtou zkoušku) byla proto použita lineární regrese. Korelační koeficient uvedený v tabulce 2 v závorkách je ve všech případech velmi vysoký (>0,99), což ukazuje na prakticky lineární chování rychlosti uvolňování tepla v daném rozmezí. Tabulka 2 ukazuje, že nejrychlejší nárůst požáru (29 MWmin⁻¹) vykazují dřevěné palety a rohože (druhá zkouška), následují dřevěné palety a plastové palety v první zkoušce (21 MWmin⁻¹). Rychlosti nárůstu požáru při třetí a čtvrté zkoušce byly velice podobné (17–18 MWmin⁻¹).

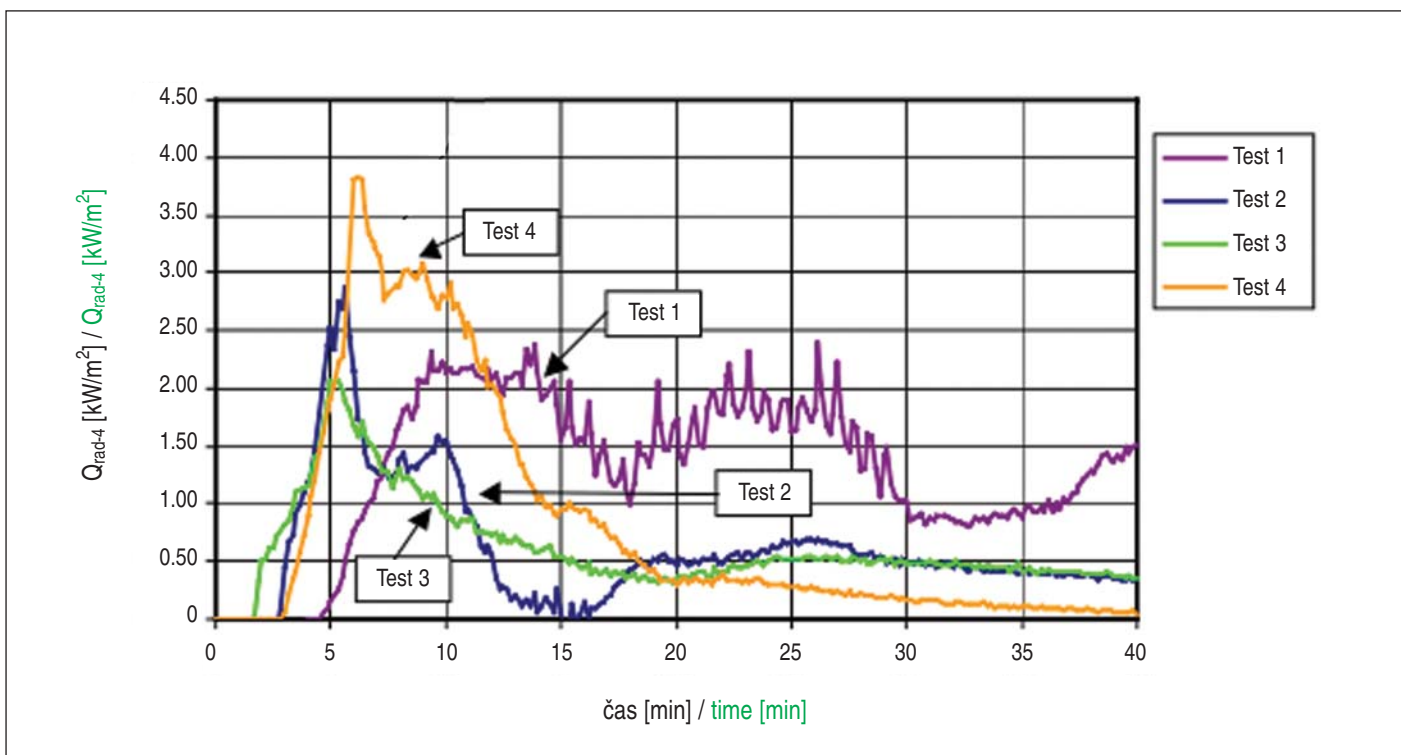
of 3 to 4ms⁻¹ towards the minimum velocity in the range of 1 to 1.5ms⁻¹. At this time the maximum velocity period was approximately 45 seconds. The heat release curves are displayed in Fig. 12; they already represent actual values (the average at the time of pulsation for the Test No. 1 and Test No. 2) after the correction of the transfer time.

When the fire heat release value got over 5MW, the fire buildup rate appeared linear up to 100MW in all of the tests, with the exception of the fourth test, where the heat release value is equal to 70MW. For that reason linear regression was applied to the approximation of the released heat values in the range of 5–100MW (for the first through to third test) and 5–70MW (for the fourth test). The correlation coefficient presented in Table 2 in brackets is in all of the cases very high (>0.99), which indicates the virtually linear behaviour of the heat release rate in the given range. Table 2 shows that the fastest fire buildup rate (29MWmin⁻¹) is exhibited by wooden pallets and mats (the second test), followed by wooden pallets and plastic pallets in the first test (21MWmin⁻¹). The fire buildup rates in the third and fourth test were very similar (17–18MWmin⁻¹).

Intensity of heat transferred through radiation in the vicinity of the fire

High temperatures induce strong radiation of heat, which is crucial for spreading a fire to other vehicles in a tunnel. Another important question associated with the radiation of heat is how close fire fighters can get to the fire before further progressing is prevented by strong radiation. Tests conducted by fire fighters in protective clothing determined the upper limit of the exposition to be approximately 5kWm⁻². When this limit is exceeded, the work of fire fighters is difficult and they begin to feel pain after approximately 5 minutes.

The results of measurements conducted during the course of the extensive tests are presented in Fig. 13. They show that this upper limit was exceeded in all tests at the distance of 10m from the semitrailer set. Fire fighters have to be able not only to resist radiated heat, but also to work in the heat. The radiation at the distance of 20 metres from the fire upstream from the fire is an important criterion for assessing whether fire fighters can reach the fire with the water jet or not. The values of the density of heat flow rate measured at this distance are presented in Fig. 14.



Obr. 14 Hustota toku tepla 20 metrů od požáru proti směru proudění (test 4: 15 m od požáru)
 Fig. 14 The heat flow density 20m from the fire (test 4: 15m behind the fire)

Intenzita tepla sáláním v blízkosti požáru

Vysoké teploty vyvolávají silné sálání tepla, které je zásadní pro šíření požáru na ostatní vozidla v tunelu. Další důležitou otázkou související se sáláním tepla je, jak blízko se hasiči dostanou k požáru, než jim v dalším postupu zabrání silná radiace. Zkoušky, které provedli hasiči v ochranném obleku, stanovily horní mez expozice zhruba 5 kWm^{-2} . Při překročení této meze je práce hasičů obtížná a začínají cítit bolest již po zhruba 5 minutách.

Výsledky měření provedených během rozsáhlých zkoušek jsou znázorněny na obr. 13. Ukazují, že tato horní mez byla při všech zkouškách překročena ve vzdálenosti 10 m od sestavy. Hasiči nejen že musí být schopni odolat sálání tepla, ale musí také být schopni v horku pracovat. Sálání ve vzdálenosti 20 metrů od požáru proti směru proudění je důležitým kritériem pro to, zda hasiči dosáhnou na požár vodním proudem, či nikoliv. Naměřené hustoty toku tepla v této vzdálenosti jsou znázorněny na obr. 14.

Je vidět, že všechny hodnoty tepelného toku jsou pod kritickou mezí 5 kWm^{-2} . Hasiči proto budou schopni přiblížit se k hořícímu nákladu na vzdálenost 20 metrů a s požárem bojovat.

Ve vzdálenosti 20 metrů od požáru proti směru proudění, v oblasti, kde již skála nebyla chráněna před účinky požáru, bylo při teplotách 80 až $100 \text{ }^\circ\text{C}$ zaznamenáno odpadávání horniny. Velké kusy skály padaly do oblasti, kde by hasičský sbor zřejmě zasahoval. Tato skutečnost by mohla ohrožovat hasiče a narušovat jejich schopnost bojovat s požárem.

Intenzita sálání v blízkosti požáru a riziko šíření požáru

Během 15 minut první zkoušky byly u podlahy zaznamenány nejvyšší hodnoty 250 kWm^{-2} . Při téže zkoušce bylo možno u stěn pozorovat průměrné hodnoty zhruba 120 kWm^{-2} a nejvyšší hodnoty 200 kWm^{-2} . Ve vzdálenosti 5 metrů za požárem byl tepelný tok stále ještě 50 kWm^{-2} . Kritická mez pro šíření požáru byla ve vzdálenosti 5 m za požárem překročena při všech zkouškách. Riziko rozšíření požáru na vozidlo v této poloze proto existuje při všech zkouškách, ale po různě dlouhou dobu. Při první zkoušce toto riziko trvá 55 minut. Při dalších, méně náročných zkouškách, je toto riziko kratší, zhruba 7 až 10 minut.

It can be seen that all heat flow rate values are under the critical limit of 5 kWm^{-2} . Fire fighters will therefore be able to get closer to the burning cargo up to the distance of 20m to fight the fire.

At the distance of 20 metres upstream from the fire, in the area where rock was no more protected against the effects of fire, falling off of rock was recorded at temperatures of 80 to 100°C . Big pieces of rock fell to the area where the fire rescue brigade would evidently fight the fire. This fact could threaten the fire fighters and impair their ability to fight the fire.

Intensity of heat transferred through radiation in the vicinity of the fire and the risk of spreading the fire

During 15 minutes of the first test, the highest values recorded at the floor level amounted to 250 kWm^{-2} . During the course of the same test it was possible at the walls to observe average values approximately of 120 kWm^{-2} and the highest values of 200 kWm^{-2} . At the distance of 5 metres behind the fire, the heat flow still reached 50 kWm^{-2} . The critical limit for spreading of the fire at the distance of 5m behind the fire was exceeded in all tests. The risk of spreading the fire to a vehicle located in this position therefore exists in all tests, but it is so for various lengths of time. In the first test, this risk lasts for 55 minutes. In the other tests, which are less demanding, this risk duration is shorter, approximately 7 to 10 minutes.

RESULTS AND BEHAVIOUR OF INSULATION CLADDING

Because of the irregular geometry of the Runehamar tunnel cross-section, the PROMATECT®-T insulation boards were hung on a steel frame; there is no direct contact between the boards and the rock (see Fig. 15). The objective of the tests was to assess the behaviour of this type of fire insulation under various fire conditions without the presence of concrete structures (concrete, in general, contributes to resistance to high temperatures because of the fact that it has a cooling effect), without the insulation of joints and when the boards are exposed to the effects of several successive fires.

Temperatures measured during the first test in the tunnel (the red curve; the scale is on the left side of the graph) and on the unexposed side of the boards (the scale on the left side of the graph) are displayed in Fig. 16.

VÝSLEDKY A CHOVÁNÍ IZOLAČNÍHO OBKLADU

Kvůli nepravidelnému tvaru tunelu Runehamar byly izolační desky PROMATECT®-T zavěšeny na kovovém rámu; mezi deskami a skálou není žádný přímý kontakt (obr. 15). Cílem těchto zkoušek bylo posoudit chování tohoto druhu protipožární izolace v různých podmínkách požáru bez přítomnosti betonových konstrukcí (beton obecně přispívá k žárovzdornosti, protože má chladicí účinek), bez izolace spoju a při vystavení desek účinkům několika po sobě jdoucích požárů.

Na obr. 16 jsou znázorněny teploty naměřené během první zkoušky v tunelu (červená křivka, stupnice na pravé straně grafu) a na neexponované straně desek (stupnice na levé straně grafu).

Díky technologii minerálního inženýrství mají desky PROMATECT®-T „minerální indikátory teploty“, které mohou poskytovat informace o průběhu teploty v kterémkoliv místě desky. Na základě prostupu tepla je možné stanovit maximum 1150 °C v hloubce 3 mm pod exponovaným povrchem, dále dosažení 900 °C v hloubce 7 mm a teplotu 200 °C v hloubce 20 mm pod exponovaným povrchem desky. Je důležité zdůraznit, že desky byly při této zkoušce vystaveny teplotám až 1365 °C.

Analýza metodou rentgenové difrakce z horké strany k chladnější prokazuje, že na exponované straně se při teplotách 1150 °C až 1350 °C vytvořila 3 až 4 mm silná vrstva keramického izolantu. Během tohoto procesu nedošlo k žádným strukturálním vadám. Analýzy prokazují dokonalou stabilitu struktury desek, která si uchovávala nezbytné vlastnosti z hlediska požární ochrany.

Zkoušky jasně prokázaly že:

- Výrobek je schopen odolat vysoké intenzitě radiace a vysokým teplotám, které jsou dosahovány při požáru v tunelu (maximálně 223 MW, 1365 °C).
- Umělá minerální struktura (Mineral Engineered Matrix) je zcela novým přístupem v konstrukci materiálů požární ochrany a zlepšuje chlazení a tepelnou izolaci konstrukce a částí tunelu.
- V případě použití desek vypočtené tloušťky lze na straně chráněné tunelové konstrukce po dlouhou dobu snadno udržovat teplotu pod 200 °C.
- Po několika po sobě jdoucích požárech byla celistvost desek prokazatelně zachována i v mikroskopickém měřítku.
- V případě potřeby je montáž a výměna desek v té části tunelu, která byla vystavena požáru, snadná, což snižuje náklady a umožňuje rychlé opravy a opětovné uvedení tunelu do provozu.

ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Byly provedeny čtyři rozsáhlé požární zkoušky simulující požár nákladu na návěsu v tunelu. Náklad byl simulován různými kombinacemi celulózy a plastu (v hmotnostním poměru zhruba 80/20). To odpovídá běžným druhům nákladu, které jsou každodenně převáženy po silnicích a také často projíždějí tunely. Druh a množství použitých hořlavých materiálů se v jednotlivých zkouškách lišil, ale všechny čtyři náklady vykazovaly velmi prudký nárůst teploty po počáteční prodlevě. Výsledky také ukázaly, že konstrukce tunelu a izolace musí odolat velmi vysokým teplotám. Standardní teplotní křivka požáru, která nejlépe reprezentuje výsledky zkoušek, je křivka RWS.

Při všech zkouškách došlo k prudkému rozšíření požáru, během 5 až 10 minut byl celý náklad v plamenech. První pokus odhadnout šíření požáru byl částečně úspěšný u první a třetí zkoušky. Při první zkoušce nastalo velké riziko rozšíření požáru na další vozidla ve vzdálenosti 5 m za hořícím nákladem (tj. ve směru proudění) a trvalo po dobu 55 minut. Toto riziko nastalo i při dalších zkouškách, trvalo však kratší dobu, 7 až 10 minut.

Owing to the mineral engineering technology, PROMATECT®-T boards have “mineral indicators of temperature” capable of providing information about the development of temperature at any point of the board. It is possible on the basis of heat passage to determine that the maximum of 1150°C is reached at the depth of 3mm under the exposed surface, 900°C at the depth of 7mm and 200°C at the depth of 20mm under the exposed surface of the board. It is important to emphasise that the boards were exposed to temperatures up to 1365°C during the course of this test.

An X-ray diffraction analysis from the hot side toward the cooler side proves that a 3 to 4mm thick ceramic insulator developed on the exposed side at temperatures ranging from 1150°C to 1350°C. No structural defects originated during this process. The analyses prove the perfect stability of the structure of the boards, which maintained properties necessary in terms of fire protection.

The tests clearly proved that:

- The product is able to resist the high intensity of radiation and high temperatures reached during a fire in a tunnel (maximum 223MW, 1365°C).
- The Mineral Engineered Matrix means an absolutely new approach to the structure of fire protection materials; it improves cooling and thermal insulation of the structure and parts of the tunnel.
- In the cases of using calculated thickness boards, it is possible to easily maintain the temperature on the side of the protected tunnel structure under 200°C for a long time.
- After several successive fires, the integrity of the boards was provably maintained even on the microscopic scale.
- In the case of a need, the assembly and replacement of the boards in the portion of the tunnel exposed to the fire is easy, which fact reduces the costs and allows for quick repairs and bringing the tunnel back into service.

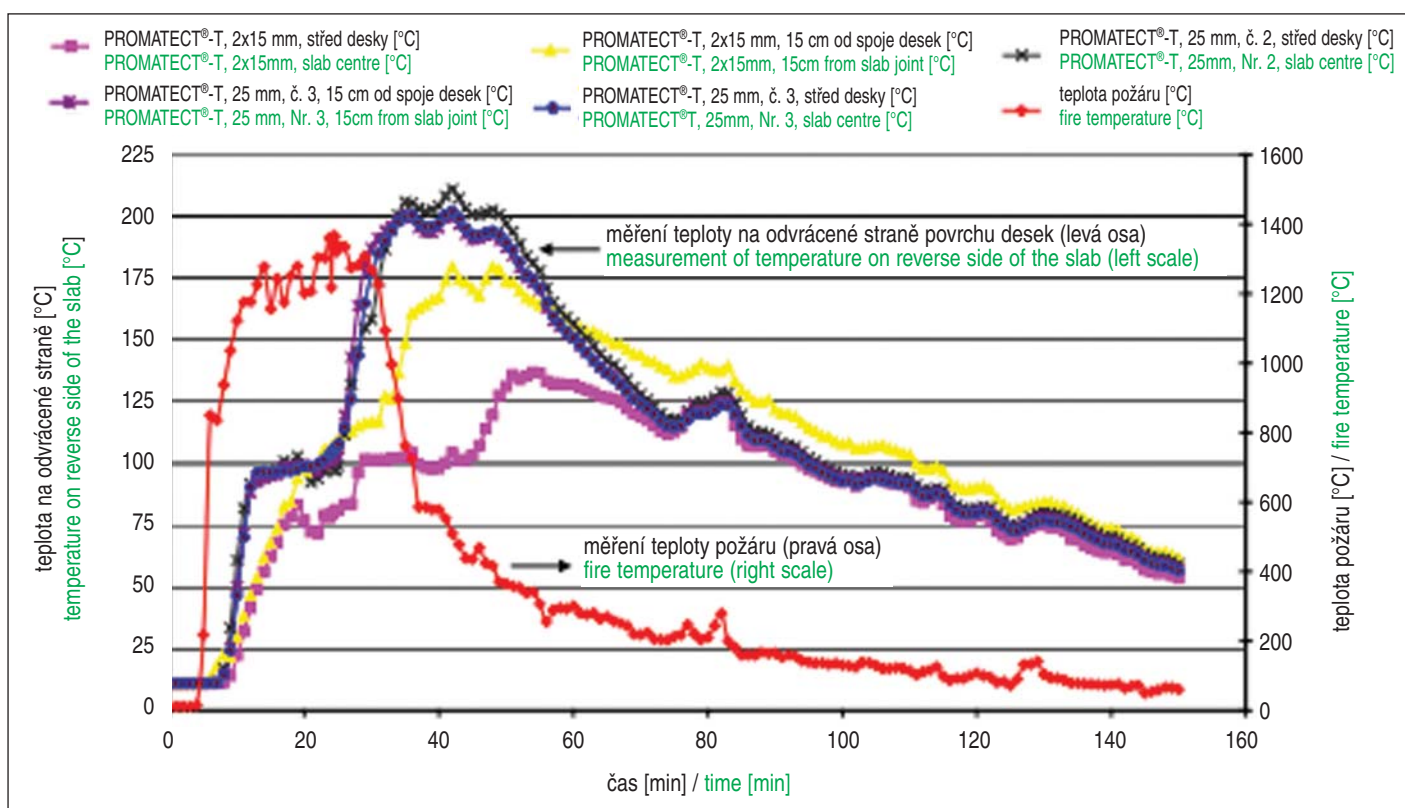
CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Four extensive fire tests simulating a fire of cargo on a semitrailer in a tunnel were carried out. The cargo was simulated by various combinations of cellulose and plastic (in the weight ratio approximately 80:20). It corresponds to the common sorts of cargo which are every day transported on roads and often pass through tunnels. The kinds and amounts of flammable materials used in individual tests varied, but all four cargos exhibited very steep heat buildup after an initial delay. The results in addition showed that a tunnel structure and insulation have to resist very high temperatures and that the RWS curve is the standard temperature curve best representing the results of the tests.

In all tests the fire spread very rapidly, the whole cargo was in flames in 5 to 10 minutes. The first attempt to estimate the spreading of the fire was partially successful in the first and third test. In the first



Obr. 15 Navržený systém požární ochrany pro zkoušky v tunelu Runehamar
Fig. 15 Fire protection system designed for testing in the Runehamar tunnel



Obr. 16 Průběh teplot naměřených v tunelu a na povrchu desek během přísnější první zkoušky

Fig. 16 Development of temperatures measured in the tunnel and on the surface of the boards during the more stringent first test

Byl učiněn také první pokus stanovit vzájemný vztah mezi tepelným tokem přijímaným stěnou a intenzitou požáru. Při všech zkouškách tepelné namáhání stěn překračovalo teplotní křivku ISO pro stavební konstrukce namáhané požárem v místnosti po dobu 15 až 30 minut. Zdá se, že přesnější aproximaci tepelného namáhání stěny během této doby nabízejí jiné teplotní křivky, např. uhlovodíková křivka. Je zapotřebí uvést, že veškerá měření probíhala ve výšce jeden metr nad úrovní vozovky. V současné době jsou stěny tunelů často ponechány bez izolace. Výsledky zkoušek jasně prokazují potřebu protipožárních izolačních obkladů stěn.

Tento rozsáhlý experiment přispěl ke zpřísnění požadavků na požární odolnost ostění tunelů. V ČR lze nalézt v Nařízení vlády o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací delší než 500 metrů č. 264/2009 Sb., v příloze č. 1 – Minimální bezpečnostní požadavky na tunely pozemních komunikací delší než 500 metrů v článku č. 7. – Požární odolnost stavebních konstrukcí, tuto definici: „Nosné stavební konstrukce všech tunelů musí zajistit dostatečnou úroveň požární odolnosti tam, kde místní porušení stavby může mít katastrofické následky, například u tunelů procházejících pod vodou nebo u tunelů, které mohou způsobit zhroucení důležitých souvisejících staveb. Stavební konstrukce a požární uzávěry musí u těchto tunelů vykazovat požární odolnost odpovídající 7. stupni požární bezpečnosti.“

Ing. LIBOR FLEISCHER, fleischer@promatpraha.cz,
Promat s.r.o.

Recenzovali / Reviewed: Ing. Petr Bebčák, Ph.D.,
Ing. Otto Dvořák, Ph.D.

test, a big risk developed that the fire would expand to other vehicles at the distance of 5m behind the burning cargo (downstream from the fire) and lasted for 55 minutes. This risk developed even in the other tests, but it lasted for a shorter time, 7 to 10 minutes. In addition, an attempt was made to determine the mutual relationship between the heat flow received by the wall and the fire intensity. During the course of all tests the heat stress exceeded the ISO temperature curve for civil engineering structures exposed to stressing by a fire in a room for 15 to 30 minutes. It seems that more accurate approximation of the heat stress during this period is offered by other temperature curves, for example the hydrocarbon curve. We should note that all measurements were carried out 1m above the roadway level. Currently tunnel walls are frequently left without insulation. The results of the test clearly indicate that fire insulation cladding of walls is necessary.

This extensive experiment contributed to tightening the requirements for fire resistance of tunnels. In Czech republic can be found the following definition in the Decree No. 264/2009 Coll. of the Government of the Czech Republic on requirements for road tunnels longer than 500 metres, Annex No. 1 paragraph No. 7 - Fire resistance of civil engineering structures: „Load-bearing civil engineering structures of all tunnels shall secure sufficient level of fire resistance wherever a local damage to the structure can have catastrophic consequences, for example in the cases of submerged tunnels or tunnels which can cause collapsing of important associated structures. Civil engineering structures and fire shutters shall exhibit fire resistance corresponding to Degree No. 7 of fire safety.“

Ing. LIBOR FLEISCHER, fleischer@promatpraha.cz,
Promat s.r.o.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] UPTUN, TKO, Promat International – Summary of Large Scale Fire Tests in the Runehamar Tunnel in Norway, conducted in association with the UPTUN Research Program
- [2] <https://www.sp.se/en/index/research/Runehamar/Sidor/default.aspx>