



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Seminární práce

PROBLEMATIKA HOŘLAVOSTI ŽIVIČNÝCH POVRCHŮ (ASFALTŮ) NA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH TUNELŮ V ČR

VYPRACOVAL:

Jan Kasa

19.12. 2012

OBSAH

Úvod.....	3
1. Významné katastrofy v silničních tunelech	3
1.1 Tunel Mont Blanc.....	3
1.2 Tauernský tunel	4
1.3 Tunel St. Gotthard	4
1.4 Tunel Fréjus.....	4
1.5 Závěr.....	4
2. Požadavky na silniční tunely	5
3. Pozemní komunikace	5
3.1 Vozovka	5
3.1.1 Skladba vozovky	6
3.1.2 Asfaltová směs	6
3.1.3 Asfaltová pojiva	7
3.1.4 Obsah pojiva v asfaltové směsi	8
3.2 Tunel.....	9
3.2.1 Vozovka v tunelu	9
4. Hořlavost asfaltových směsí.....	10
4.1 Výsledky experimentu podle Noumowe (2003)	10
4.2 Experiment z University of Edinburgh	11
4.2.1 Výsledky experimentu.....	11
4.3 Experiment - Large Scale Fire Tests in the Runehamar tunnel.....	14
5. Použití asfaltových povrchů v tunelech	16
6. Závěr.....	17
Zdroje	18
Příloha 1 – Praktický příklad.....	19

ÚVOD

Dnešní moderní dopravní systém musí zajistit bezpečný a ekonomický provoz a zároveň uspokojit stále rostoucí potřebu přepravy zboží a osob. Díky těmto požadavkům dochází k rapidnímu nárůstu rozvoje dopravní sítě. Rozvoj silnic a dálnic vyžaduje redukci výškových rozdílů, čehož lze velmi efektivně dosáhnout stavbou tunelů. Problém je s dopravou v prostředí měst, kde je výstavba tunelů reakcí na nárůst objemu dopravy. Pro přesunutí dopravy pod zem jasně hovoří její lepší plynulost a zlepšení ovzduší na povrchu. V tomto dopravním systému se stává tunel kritickým místem, ve kterém se jako hlavní rizikový faktor jeví nehoda se zraněním či usmrcením osob, únik jedovatých látek, požár nebo výbuch.

Na volném prostranství se předpokládá samostatný únik osob, naproti tomu v případě tunelu jsou účastníci provozu odkázáni na únikové možnosti, které jim poskytne investor a provozovatel. V případě nehody s následným požárem nejsou ohroženi pouze účastníci v bezprostřední blízkosti, ale i lidé vzdálení několik stovek metrů od zdroje tepla díky vývinu kouře. Velký význam při zajištění bezpečnosti v tunelu má nejen jeho technické vybavení, ale také nosná konstrukce a především povrchové vrstvy. Většina zpevněných silnic na světě je pokryta asfaltem. Asfaltové vozovky se vyznačují rychlostí výstavby, vysokou únosností a dobrým poměrem cena/výkon. Ovšem jejich použití v tunelech je diskutabilní díky obsahu hořlavého pojiva. V posledních letech bylo provedeno velké množství experimentů týkajících se požáru v tunelu. Přesto existuje mnoho aspektů požární bezpečnosti v tunelech, které nebyly dostatečně zkoumány. Jedním z nich je použití asfaltového povrchu vzhledem k obavám z jeho hořlavosti. Při požárech v tunelu Mont Blanc a St.Gotthard došlo ke spálení velké části asfaltové vozovky. Není jasné, zda se povrch při těchto incidentech zapálil a přispíval významným způsobem k závažnosti těchto požárů.

1. VÝZNAMNÉ KATASTROFY V SILNIČNÍCH TUNELECH

Tyto katastrofy měly a stále mají velký dopad na přístup k požární bezpečnosti v tunelech. Evropským institucím se díky tomu podařilo harmonizovat požadavky na bezpečnost pro transevropské dálnice (součástí je i ČR) vydáním směrnice, která požaduje zajištění alespoň minimálního stupně bezpečnosti.

1.1 Tunel Mont Blanc

Tento tunel spojuje Francii s Itálií a vede pod nejvyšším masivem Alp viz [11]. Je tvořen jednou troubou s dvěma protisměrnými jízdními pruhy o délce 11,6 km. Šířka tunelu činí 8,60 m a každých 500 m je bezpečnostní odstavný výklenek. K požáru došlo 24.3. 1999 na nákladním voze převážející mouku a margarín. Příčina požáru nebyla vzhledem k poškození kamionu požárem stanovena. Nárůst tragických následků incidentu byl způsoben zvýšením výkonu ventilace z italské strany, které podpořilo rychlé vzplanutí kamionu a zakouření francouzské strany tunelu. Tato nehoda si vyžádala 39 obětí, které se udusily a pak následně uhořely.

Požár v uzavřeném prostoru, za intenzivní podpory ventilace, dosáhl až 1200 °C. Díky takto vysokým teplotám došlo ke shoření asfaltové vozovky a rozpadu betonové vyzdívky tunelu až na skálu. Ohnisko požáru bylo dostupné až za více než 48 hodin, a to i přes značné ochlazování.

1.2 Tauernský tunel

Jedná se o tunel na rakouské dálnici A10 v Radstadtských Taurách viz [11]. Je tvořen jednou troubou s dvěma protisměrnými jízdními pruhy o délce 6,4 km. Šířka tunelu činí 9,50 m a každých 106 m je hydrant. K požáru došlo 29.5. 1999 při hromadné havárii, kdy nejdříve najel nákladní automobil vezoucí kosmetické prostředky (vysoce hořlavý materiál) do řady vozů stojících na červenou. Za tímto vozem zastavily další osobní vozy, do nichž v plné rychlosti narazil další nákladní vůz. Požár vzniklý únikem paliva z proražených nadržů osobních vozů zachvátil kamion s kosmetickými prostředky. Tato nehoda si vyžádala 13 obětí, z toho devět zemřelo při nárazu a čtyři při následném požáru.

Díky vhodné manipulaci s větracím systémem a odvodem kouře nedošlo k rozsáhlejší katastrofě. Hasiči požár zlikvidovali během šesti hodin. Bylo zničeno vnitřní vybavení tunelu a 24 osobních a 16 nákladních automobilů.

1.3 Tunel St. Gotthard

Jedná se o tunel ležící na dálnici A2 ve Švýcarsku a se svojí délkou 16,7 km je druhým nejdelším silničním tunelem na světě viz [11]. Tunel se skládá z jedné trouby se dvěma protisměrnými pruhy a paralelního únikového tunelu pro pěší. Šířka tunelové trouby dosahuje 9,20 m a výška 6,90 m. Propojky mezi silničním a únikovým tunelem jsou každých 250 m. Do tunelu je zakázán vjezd vozidel s nebezpečným nákladem. K největšímu požáru došlo 24.10. 2001 po čelní srážce dvou nákladních vozů, jež převážely izolace a pneumatiky. Tento incident si vyžádal jedenáct obětí.

Díky teplotě u stropu tunelu, která dosahovala 2200 °C, byl tunel značně poškozen. Asfaltová vozovka v místě havárie byla doslova spálena.

1.4 Tunel Fréjus

Jedná se o tunel spojující Francii a Itálii viz [11] a slouží jako jedna z hlavních dopravních cest skrz Alpy. Tunel je tvořen jednou troubou s obousměrným provozem o šířce 9 m a výšce 4,3 m. Délka stavby činí 12,87 km. Maximální rychlost v tunelu je 70 km/h a vozidla mezi sebou musí dodržovat bezpečnou vzdálenost 150 m. Hydranty jsou instalovány každých 130 m. Požár vznikl 4. 6. 2005, když zhruba v polovině tunelu vzplál náklad pneumatik. Při požáru zemřeli dva lidé.

Tunel bylo po požáru nutné opravovat v délce deset kilometrů, teplota dosáhla 1650 °C.

1.5 Závěr

Nehody v silničních tunelech se stávají a není možné jim zabránit. Na příkladu požáru v tunelu Mont Blanc je dobře patrné, jak špatná koordinace postupů při krizové situaci může způsobit fatální následky. Naproti tomu incident v Gotthardském tunelu ukazuje, že při srovnatelné nehodovosti lze dodržováním bezpečnostních postupů a opatření snížit riziko na lidských obětech na minimum. Díky požáru v tunelu pod Mont Blancem se rozhodla evropská komise stanovit požadavky na bezpečnost v tunelech transevropské silniční sítě. Toto vedlo k přijetí Směrnice 2004/54/ES o jednotné bezpečnosti v tunelech.

Mezi hlavní závěry a opatření plynoucí z požáru v tunelu Mont Blanc patří:

- zabezpečovací systémy musí být řízeny z jednoho místa,
- silniční tunely je nutné budovat jako jednosměrné – jeden tunel pro každý směr odděleně,
- dlouhé silniční tunely musí mít dostatečný počet hydrantů.

2. POŽADAVKY NA SILNIČNÍ TUNELY

Požadavky lze obecně rozdělit do dvou základních kategorií. Stanovené Evropskou unií prostřednictvím směrnic, které je Česká republika jako členský stát vázána dodržovat. Druhým typem jsou naše národní požadavky, do kterých by měly být ty evropské implementovány. Jedná se zejména o zákony, vyhlášky, technické podmínky (TP, TKP, ZTKP) a především české národní normy.

Bezpečnosti v tunelech a tvorbě standardů v této oblasti je v České republice věnována značná pozornost. Technické podmínky zahrnují požadavky na vybavení tunelu technickými zařízeními, zabývají se provozem za normálních i mimořádných situací a režimy údržby, v neposlední řadě stanovují požadavky na dokumentaci. Norma ČSN 73 7507 stanovuje zásadní požadavky na uspořádání, konstrukci a vybavení tunelů. Tyto standardy jsou tak podrobné, že spolehlivě splňují požadavky dané směrnicí Evropské komise a Rady o jednotné bezpečnosti v tunelech transevropské dopravní sítě.

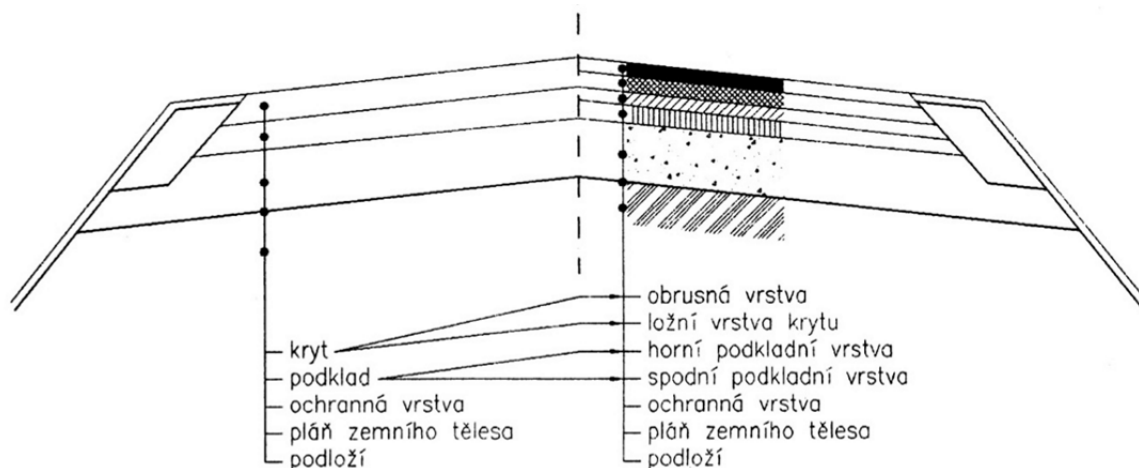
3. POZEMNÍ KOMUNIKACE

Pozemní komunikace je dle zákona [1] dopravní cesta určená k užití silničními a jinými vozidly a chodci, včetně pevných zařízení nutných pro zajištění tohoto užití a jeho bezpečnosti. Dále se dle výše zmíněného zákona pozemní komunikace dělí podle svého určení, dopravního významu a technického vybavení na čtyři kategorie: dálnice, silnice, místní komunikace a účelové komunikace. Součástí komunikací jsou i tunely.

Uvedené zatřídění pozemních komunikací vymezuje volbu prostorového uspořádání, tzn. odpovídající návrhovou kategorii komunikace. Touto kategorií pozemních komunikací se rozumí označení pro soubor technických rozlišujících znaků společných pro určité silniční komunikace téhož příčného uspořádání, stanovené návrhové rychlosti a režimu provozu.

3.1 Vozovka

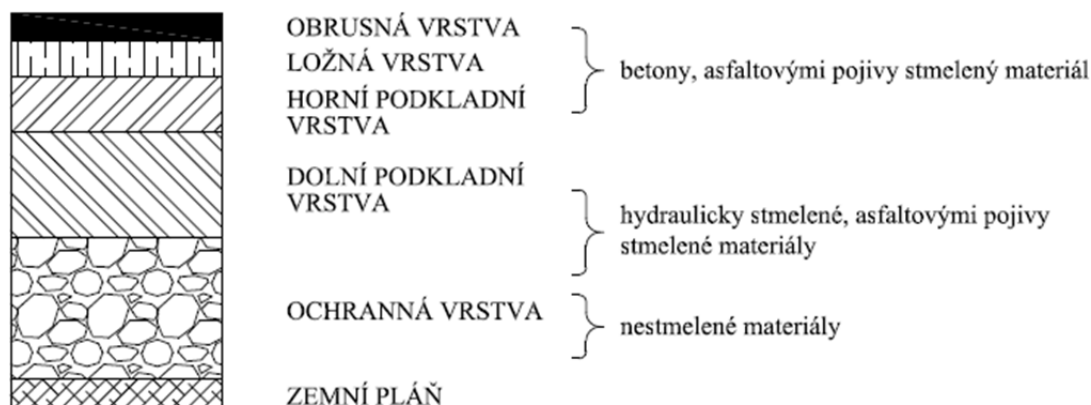
Vozovka je zpevněná část komunikace skládající se z jedné nebo více vrstev, která umožňuje svojí únosností a rovným povrchem bezpečné poježdění vozidel po dobu její životnosti.



Obrázek 3.1 Schéma konstrukce vozovky, viz [2].

3.1.1 Skladba vozovky

Vozovka se zpravidla skládá z pěti vrstev, jsou to (od povrchu směrem dolů): obrusná a ložná vrstva, horní a dolní podkladní vrstva a ochranná vrstva. Tyto vrstvy mohou tvořit různé materiály, jako je beton nebo asfaltovými pojivy stmelený materiál. Asfaltovými pojivy stmelený materiál lze také nazývat asfaltovou směsí, která se od sebe liší druhem a množstvím pojiva, obsahem jednotlivých složek ve směsi, způsobem zpracování a pokládky. Také se liší dle způsobu použití.



Obrázek 3.1.1 Skladba vozovky – materiál.

3.1.2 Asfaltová směs

Asfaltová směs je tvořena dvěma základními složkami – kamenivem a pojivem, dále mohou být přidány přísady a R-materiál. Jako pojiva jsou nejčastěji používány silniční asfalty, modifikované asfalty a tvrdý silniční asfalt. Součástí směsi může být i filer (vápenná moučka), což je mletý vápenec nebo dolomit, který může obsahovat cement nebo vápenný hydrát. Přísady se mohou v malých množstvích přidávat do směsi pro zlepšení mechanických vlastností, zpracovatelnosti nebo třeba pro změnu barvy směsi. Jedná se například o organická a anorganická vlákna, polymery atd. R-materiálem se rozumí využití stavebního odpadu získaného recyklací frézovaných živičných povrchů.

Rozdělení asfaltových směsí:

- Asfaltový beton AC,

- Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy BBTM,
- Velmi měkká asfaltová směs SA,
- Asfaltová směs hutněná za horka (HRA),
- Asfaltový koberec mastixový SMA,
- Litý asfalt MA,
- Asfaltový koberec drenážní PA.

3.1.3 Asfaltová pojiva

Pojivo je nedílnou součástí asfaltové směsi. Jeho úkol spočívá v obalení kameniva a tím dojde k jeho spojení a zároveň dosažení požadovaných vlastností. Asfalty se vyskytují ve dvou formách buď jako přírodní nebo ropné. V silničním stavitelství se do asfaltových směsí používají pouze ropné asfalty destilační, získané přímo po vakuové destilaci ropy.

Asfaltová pojiva se dělí na:

- a) silniční asfaltová pojiva
- b) polymerem modifikované asfalty
- c) tvrdý silniční asfalt
- d) ředěná a fluxovaná asfaltová pojiva

V případě modifikovaných asfaltů slouží jako modifikační přísady přírodní polymery (kaučuk, celulóza), plastomery, elastomery, duraplasy (epoxidové pryskyřice, polyuretany, polyestery) a kyselina polyfosforečná.

Dle norem ČSN EN 13106 musí být pojivem asfaltové směsi, specifikované empiricky nebo funkčním způsobem, silniční asfalt, modifikovaný asfalt nebo tvrdý silniční asfalt. Pojivo může obsahovat i přírodní asfalt.

empirická specifikace viz [2]: kombinace požadavků na složení směsi a jednotlivé materiály společně s požadavky vztahenými k funkčním charakteristikám

funkční specifikace viz [2]: kombinace požadavků založených na funkčních charakteristikách společně s omezenými požadavky na složení směsi a jednotlivé materiály s větší volností než u empirické specifikace

Evropské výrobní normy pokrývají široké spektrum silničních materiálů pro různé aplikace, aby vyhověly místním dopravním zatížením a klimatickým podmínkám. Rozmanitost technologií a aplikací vedla k praktičtějšímu rozdělení druhů asfaltů do třech oddělených tabulek. Druhy silničních asfaltů se označují podle jmenovitého rozmezí penetrace nebo viskozity viz [6].

Penetrace: jedná se o zkoušku dle ČSN EN 1426 založenou na měření hloubky průniku jehly o hmotnosti 100 g do zkoušeného vzorku při teplotě 25 °C po dobu 5 s. Průnik jehly se provádí celkem třikrát a výsledná penetrace se uvede jako aritmetický průměr všech tří měření v desetinách milimetru.

Tabulka 3.1.1 Specifikace pro silniční asfalty s penetrací od 20 x 0,1 mm do 220 x 0,1 mm, viz [6].

Vlastnost	Jednotka	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetrace při 25°C	0,1 mm	20 - 30	30 - 45	35 - 50	40 - 60	50 - 70	70 - 100	100 - 150	160 - 220
Bod měknutí	°C	55 - 63	52 - 60	50 - 58	48 - 56	46 - 54	43 - 51	39 - 47	35 - 43
Bod vzplanutí	°C	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220

Tabulka 3.1.2 Specifikace pro silniční asfalty s penetrací od 250 x 0,1 mm do 900 x 0,1 mm, [6].

Vlastnost	Jednotka	250/330	330/430	500/650	650/900
Penetrace při 15 °C	0,1 mm	70 - 130	90 - 170	140 - 260	180 - 360
Dynamická viskozita při 60 °C	Pa*s	≥ 18	≥ 12	≥ 7,0	≥ 4,5
Bod vzplanutí	°C	≥ 180	≥ 180	≥ 180	≥ 180

Tabulka 3.1.3 Specifikace pro silniční asfalty – Měkké asfalty: určené kinematikou viskozitou, [6].

Vlastnost	Jednotka	V1500	V3000	V6000	V12000
Kinematická viskozita při 60 °C	mm ² /s	1000 - 2000	2000 - 4000	4000 - 8000	8000 - 16000
Bod vzplanutí	°C	≥ 160	≥ 160	≥ 180	≥ 180

3.1.4 Obsah pojiva v asfaltové směsi

Jednotlivé asfaltové směsi se mezi sebou liší použitím, vlastnostmi a také obsahem pojiva.

Minimální obsah pojiva v návrhové směsi se musí zvolit dle kategorií uvedených v normách pro příslušnou směs.

Tabulka 3.1.4 Obsah pojiva.

Asfaltová směs	Minimální obsah pojiva B _{min} [%]	Norma
Asfaltový beton	3,0 - 8,0	ČSN EN 13108-1
Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy	5,0 - 6,4	ČSN EN 13108-2
Velmi měkká asfaltová směs - typ A	4,8 - 6,0	EN 13108-3
typ B	3,1 - 4,4	
typ C	4,5 - 5,0	
typ S	2,8 - 5,4	
Asfaltová směs hutněná za horka	4,6 - 11,0	EN 13108-4
Asfaltový koberec mastixový	5,0 - 7,6	ČSN EN 13108-5
Litý asfalt	6,0 - 9,5	ČSN EN 13108-6

Požadavky na obsah pojiva se musí korigovat násobením faktorem: $\alpha = \frac{2,650}{\rho_d}$; kde ρ_d je měrná (průměrná) suchá objemová hmotnost kameniva v Mg/m³.

Obsah pojiva zahrnuje pojivo v R-materiálu a přírodní asfalt, pokud je použit.

3.2 Tunel

Tunel pozemní komunikace je liniový podzemní objekt, kterým prochází pozemní komunikace (dálnice, silnice nebo místní komunikace), umožňující plynulou a bezpečnou jízdu vozidel podcházením horských masivů, vodních překážek, osídlených oblastí, kulturně-historicky či ekonomicky cenných území apod.; vyznačuje se uzavřeným příčným profilem. Tunel musí vyhovovat požadavkům požární bezpečnosti, bezpečnosti a ochrany zdraví osob (uživatelů a pracovníků provozovatele), plynulé a bezpečné jízdě vozidel a také podmínkám hospodárnosti a minimální náročnosti na pracovní údržbu tunelu v provozu, viz [3].

Podle délky se tunely dělí na:

- a) krátké – délky do 300 m;
- b) střední – délky 300 m až 1000 m;
- c) dlouhé – délky přes 1000 m.

Tunely střední a dlouhé s obousměrným provozem v jedné tunelové troubě se zpravidla nenavrhují, viz [3] čl. 7.1.3. Počet jízdnic pruhů v tunelu je závislý na úsecích komunikací před a za tunelem. Úrovňové křižovatky se v tunelech nenavrhují, viz [3] čl. 7.3.2. Činnosti provozované v tunelech střední a dlouhých spadají do kategorie se zvýšeným požárním nebezpečím, viz [3] čl. 13.1.3.

Konstrukce tunelu musí zajistit plynulý a bezpečný provoz, stabilitu vlastní i horninového prostředí v okolí tunelu, zamezit průsakům povrchové i podzemní vody do prostoru tunelu a spolehlivě přenést všechna zatížení, která na konstrukci působí nebo mohou v budoucnu působit.

3.2.1 Vozovka v tunelu

Součástí tunelu je i vozovka. Otázkou je, zda se považuje za konstrukci tunelu. Z výše uvedené definice vyplývá, že by mohla být – musí zajistit plynulý a bezpečný provoz, spolehlivě přenést všechna zatížení. Ovšem nabízí se i druhý pohled, kdy konstrukce tunelu přenáší pouze zatížení od horninového masivu. V tomto případě by vozovka součástí konstrukce nebyla. Pokud by se na vozovku nahlíželo jako na součást konstrukce tunelu, pak by musela být, viz [3] čl. 13.2.2 provedena z výrobků třídy A1a z nehořlavých konstrukčních částí druhu DP1. Na povrchové úpravy musí být použity výrobky s doplňkovou klasifikací s1 a d0. Tyto požadavky není asfaltová směs schopna splnit, proto lze předpokládat, že vozovka není součástí konstrukce tunelu. Pak se tyto požadavky na ní nevztahují.

Konstrukce vozovky se stanoví na základě požárně bezpečnostního řešení a technicko-ekonomického posouzení, přičemž u středních tunelů se doporučuje provádět konstrukci vozovek v tunelu s cementobetonovým krytem a u tunelů dlouhých je provedení konstrukce vozovek v tunelu s cementobetonovým krytem povinné, viz [3] čl. 10.3.3.

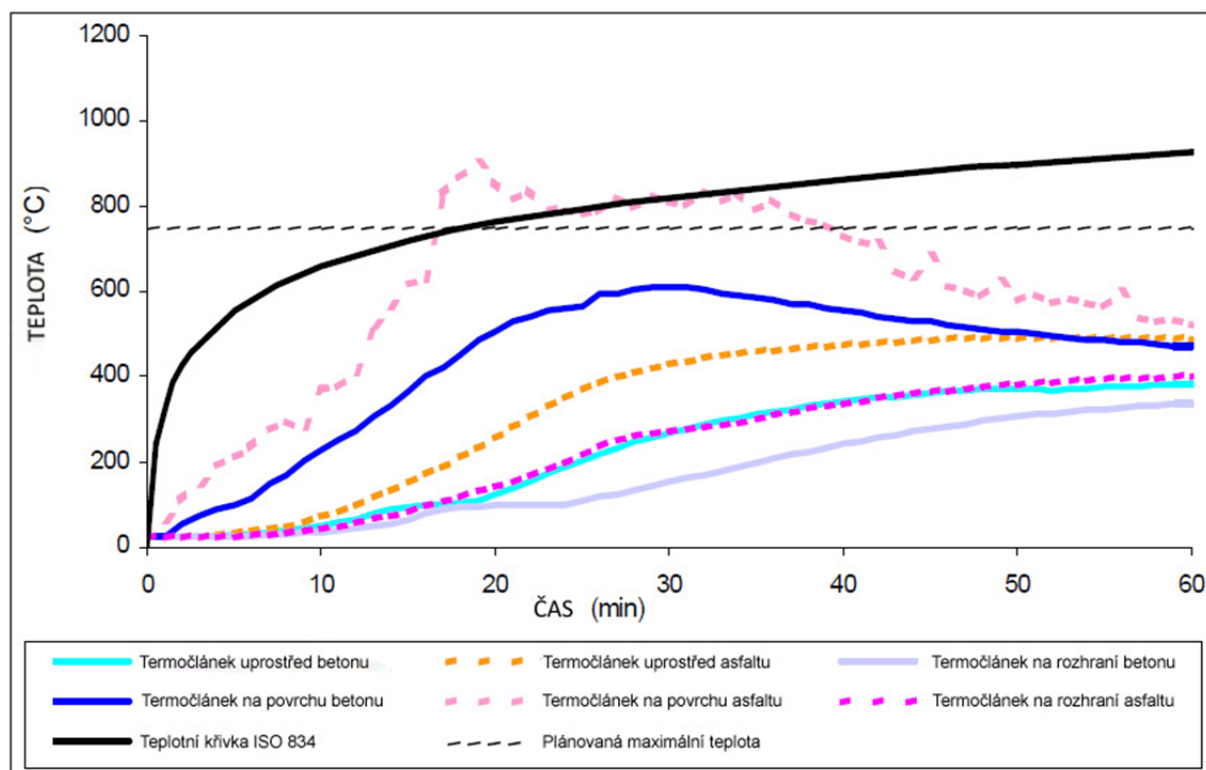
Dalším požadavkem, který znevýhodňuje použití asfaltů v tunelu, je nutnost navrhovat povrchy vozovky a stěn v tunelové troubě nelesklé a co nejvíce světlé. Naopak na příjezdových komunikacích do tunelového komplexu se jas snižuje tmavým a nelesklým povrchem vozovky, portálu a stěn terénního zářezu.

4. HOŘLAVOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Zprvu se může zdát, že na asfaltovém povrchu nemá co hořet. Asfaltová směs je kompozit složený z několika materiálů, jedním z nich je i asfalt, který může způsobit vznícení asfaltového povrchu. V posledních letech bylo uskutečněno velké množství požárních experimentů týkajících se požárů v tunelu, ale hořlavost asfaltové směsi nebyla odpovídajícím způsobem zkoumána. Bylo provedeno pouze experimentální studium chování asfaltů při hoření, které provedl A. Noumowe z Cergy-Pontoise University (FR, Paříž). Na univerzitě v Edingurhu (BRE Centre for Fire Safety Engineering, University of Edinburgh, UK) byl zahájen výzkum, jehož cílem je charakterizovat chování typických asfaltových vozovek při požáru v tunelu.

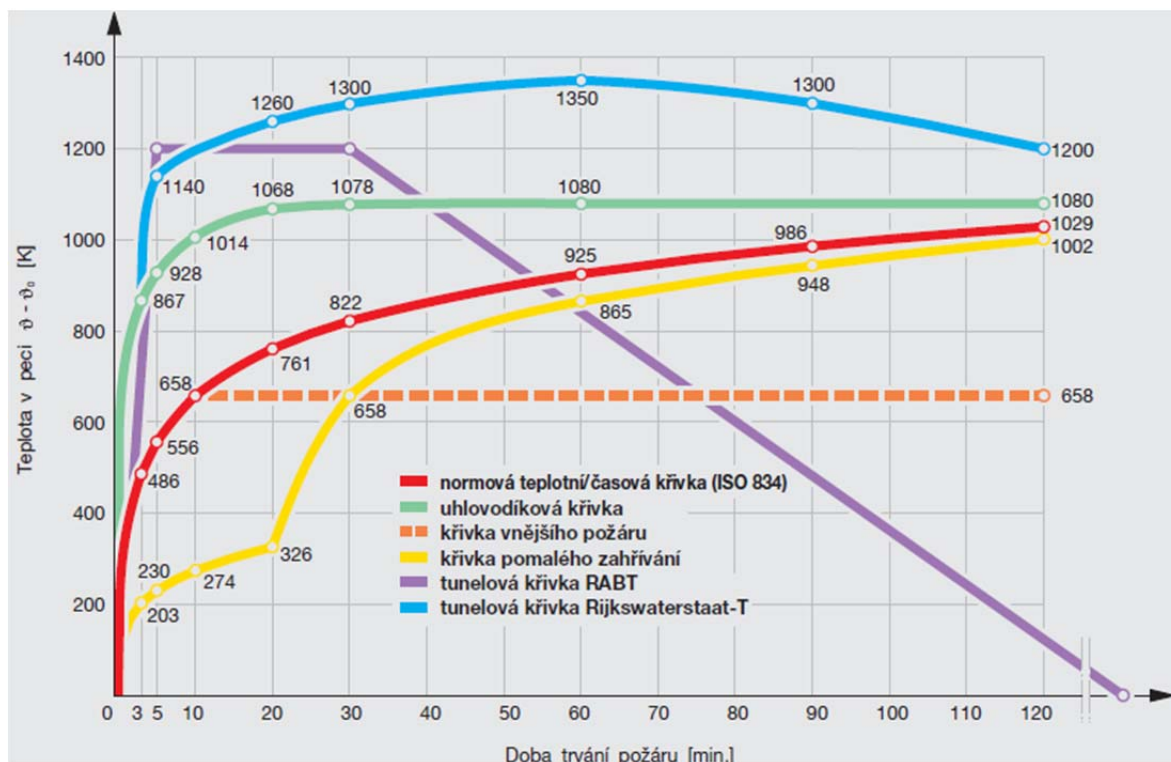
4.1 Výsledky experimentu podle Noumowe (2003)

Z této studie vyplývá, že vzorky typických asfaltových povrchů (zahřátých podle nominální normové teplotní křivky) vzplanuly mezi 480 ° a 530 °C. To zapříčinilo nárůst teploty v peci, kde byly prvky zkoušeny, o 150 °C. Dále byla pozorována degradace asfaltu při teplotách okolo 300 °C a vývoj toxických zplodin. Tento postup je vhodný pro určení třídy reakce na oheň, ale už se tolik nehodí pro stanovení hořlavosti nebo zápalných podmínek asfaltových směsí, viz [4].



Obrázek 4.1 Porovnání teplotních křivek pro beton a asfalt po jedné hodině hoření, viz [5].

Výsledky studie (zobrazené na grafu), které provedl A. Noumowe, jsou velmi ilustrativní. Z grafu je dobře patrný rozdíl mezi asfaltovým a betonovým povrchem. V experimentu byly vzorky vystaveny požáru dle normové teplotní křivky, avšak pro průběh požáru v tunelu se používá uhlovodíková křivka, tunelová křivka RABT nebo tunelová křivka Rijkswaterstaat-T (RWS).



Graf 4.1 Porovnání teplotních křivek, viz [8].

4.2 Experiment z University of Edinburgh

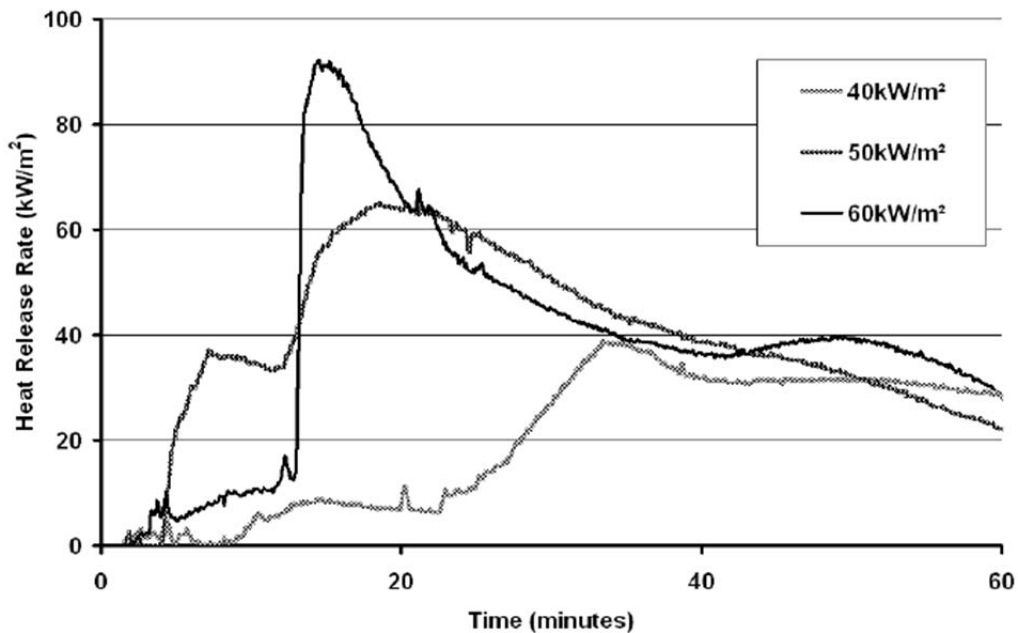
Tento výzkumný projekt s názvem The Contribution of Asphalt Road Surfaces to Fire Risk in Tunnel Fires, viz [4] charakterizuje chování typických asfaltových vozovek při požáru v tunelu. Budou posouzeny podmínky pro zapálení a vznik požáru napříč celou řadou asfaltů a dále bude změřeno množství uvolněného tepla. Na závěr takto získaná data budou začleněna do CFD modelů pro umožnění přesné simulace požárního scénáře v tunelu. Tato práce zatím nabízí pouze předběžné výsledky.

Určení zápalnosti a hořlavosti asfaltů bylo provedeno pomocí kuželového kalorimetru, který se používá pro zkoumání chování materiálů vystavených tepelnému toku až 75 kW/m^2 . Vzorky asfaltových směsí poskytla univerzita v Nottinghamu a jedná se o asfaltový koberec mastixový, který je v současné době nejrozšířenějším asfaltovým povrchem ve Velké Británii. Tyto vzorky obsahovaly 6,3 % pojiva s penetrací 40/60. Zbytek směsi se skládal z kameniva velikosti až 20 mm a některých celulosových vláken (0,3 % hmotnosti). Zhutněná vozovka obsahovala okolo 6 % vzduchu. Vzorky asfaltů o rozměrech $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}$ byly v kuželovém kalorimetru vystaveny tepelnému toku 30 až 60 kW/m^2 . Při zkoušce byla sledována i rychlost uvolňování tepla.

4.2.1 Výsledky experimentu

Čtyři vzorky byly vystaveny vnějšímu tepelnému toku 60, 50, 40 a 30 kW/m^2 . U všech testů byla doba několika minut, při kterých nebyly patrné žádné změny. Po této počáteční fázi se začaly na povrchu vyvíjet výpary, které se nevznítily (s výjimkou v případě testu s 50 kW/m^2 , viz níže). V případě testů s působením tepelného toku 60, 50 a 40 kW/m^2 došlo po několika minutách k vznícení vzorků – světelný plamen pokryl povrch vzorku. Tepelný tok 30 kW/m^2

nepostačoval k zapálení vzorku. Každý ze zapálených vzorků hořel hodinu, než došlo k jeho vyhoření. Během 50 min. vzorek vystavený tepelnému toku 30 kW/m^2 produkoval pouze výpary, ale nedošlo k jeho vzplanutí. Byly pozorovány pouze občasné záblesky plamene. Po 50 minutách byl tepelný tok zvýšen na 35 kW/m^2 , to k zapálení stále nestačilo. Po dalších pěti minutách byl tok zvýšen na 40 kW/m^2 a tím došlo k vzplanutí vzorku do dvou min.



Obrázek 4.1.1 Rychlost uvolňování tepla.

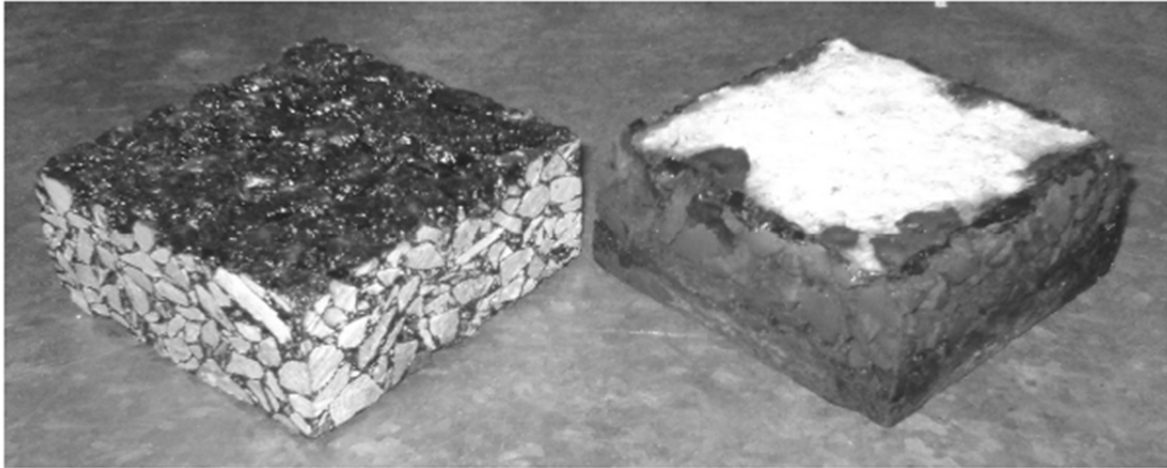
U vzorků, které se vznítily, je možné vypořadovat podobné chování, které lze rozdělit do dvou fází:

- I. Období s nízkým množstvím uvolněného tepla. V případě vzorku vystaveného toku 50 kW/m^2 dochází k významnému lokálnímu plamennému hoření. U testů s 60 a 40 kW/m^2 tokem byly pozorovány blikající plameny u středu vzorku, k vznícení nedošlo.
- II. Období velkého množství uvolněného tepla. Dochází k rychlému dosažení maximální míry uvolňování tepla a hoření na povrchu vzorků.

Tyto fáze jsou dobře patrné z obrázku 4.1.1.

Po zkoušce byly na vzorku jasně patrné následující úkazy viditelné na obrázku 4.1.2:

- a) viditelné póry uvnitř vzorku zejména v blízkosti horního povrchu,
- b) nahromadění asfaltového pojiva v blízkosti spodního povrchu,
- c) v průběhu zkoušky došlo k poškození strukturálních vlastností materiálu a také k uklonění vzorku po stranách, po testu je vzorek měkký a lze poměrně snadno rozbít.



Obrázek 4.1.2 Vzorky asfaltů před a po testu.

Z těchto předběžných testů je patrné, že rozhodující tepelný tok pro zapálení asfaltů je menší než 40 kW/m^2 . Tepelné toky takovýchto hodnot jsou běžně dosahovány při experimentech v tunelech. Během požární zkoušky v tunelu Runehamar v Norsku (2003) byly tepelné toky zaznamenávány na různých místech v blízkosti požárních zdrojů (simulace přívěs těžkého nákladního vozidla). V prvních třech testech (první s dřevěnými a plastovými paletami, druhý plný dřevěných palet a matrací a třetí naložen nábytkem) byl tento kritický tok několikanásobně překročen na vozovce v místech po směru proudění kouře v případě prvního testu i 5 m proti proudění spalin. Z tohoto srovnání vyplývá, že může dojít k vznícení vozovky v blízkosti zdroje požáru a nemělo by se vyloučit i vzplanutí proti směru proudění.

Jak bylo uvedeno výše, chování asfaltových povrchů při požáru vykazuje dvě odlišné fáze. První s nižším množstvím uvolňovaného tepla, kdy dochází pouze k povrchovým poškozením. Druhá fáze následuje při zahřátí materiálu natolik, že dochází k tání a odpařování pojiva. Roztavený asfalt má tendenci klesat do spodní části vzorku (což je v souladu s pozorováním po testu), jakmile se začne vypařovat nebo tékat, vznikají páry, které se na povrchu vznítí.

Při testu s tepelným tokem 50 kW/m^2 došlo k odlišnému chování při hoření oproti ostatním vzorkům. Páry se vznítily hned na začátku zkoušky, ačkoli plameny zůstaly u středu vzorku. Tato anomálie nastala v důsledku nerovnoměrného rozmíchání asfaltové směsi. V tomto případě se předpokládá větší vrstva asfaltu na horním povrchu vzorku, která se prohřála na zápalnou teplotu. Teplu z tohoto plamene také zapříčinilo dřívější nástup fáze II., což bude ověřeno v budoucích testech. Jak bylo uvedeno výše, je množství uvolněného tepla téměř 100 kW/m^2 vyvoláno tepelným tokem v řádu 60 kW/m^2 . Proto je třeba očekávat, že vyšší tepelný tok vytvoří větší množství uvolněného tepla. I když je plocha hořícího asfaltu omezena bezprostřední blízkostí zdroje požáru (návěs těžkého kamionu), může být větší než 50 m^2 , takže množství uvolněného tepla z asfaltu může být 5 MW nebo vyšší, což je ekvivalent jednoho nebo dvou hořících aut. V závažných případech může asfalt před vozidlem, vedle něj i proti proudu větrání potenciálně přispívat k množství uvolněného tepla více jak 20 MW – jako přímý důsledek hoření asfaltu.

Závěry experimentu:

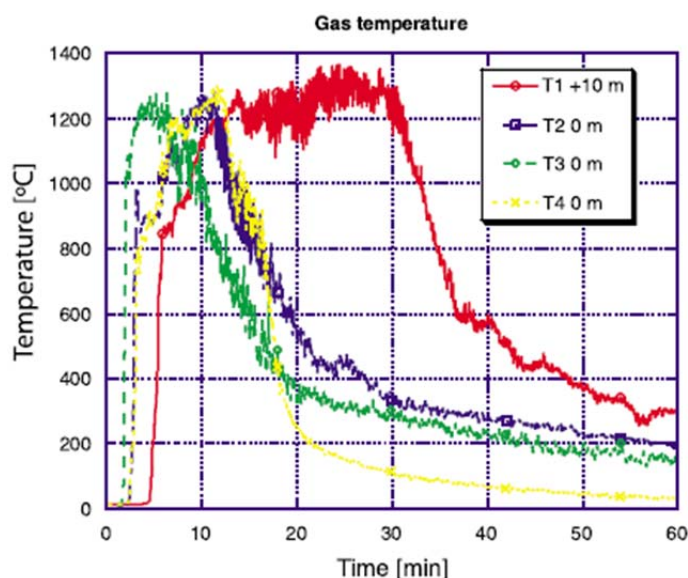
- Typické asfaltové směsi při požáru v tunelu mají potenciál k uvolnění stejného množství tepla jako zdroje s palivem běžně se v tunelu vyskytující (automobily).

- Zápallné charakteristiky asfaltů jsou značně ovlivněny vlastnostmi asfaltové směsi blízko povrchu. Také správná úroveň saturace pojiva blízko povrchu má potenciál významně snížit zápalnost asfaltu.

Samozřejmě se jedná pouze o předběžné výsledky zkoušek na malých vzorcích. Nicméně porovnání naznačuje význam řešení asfaltu při definování požárního zatížení v tunelu.

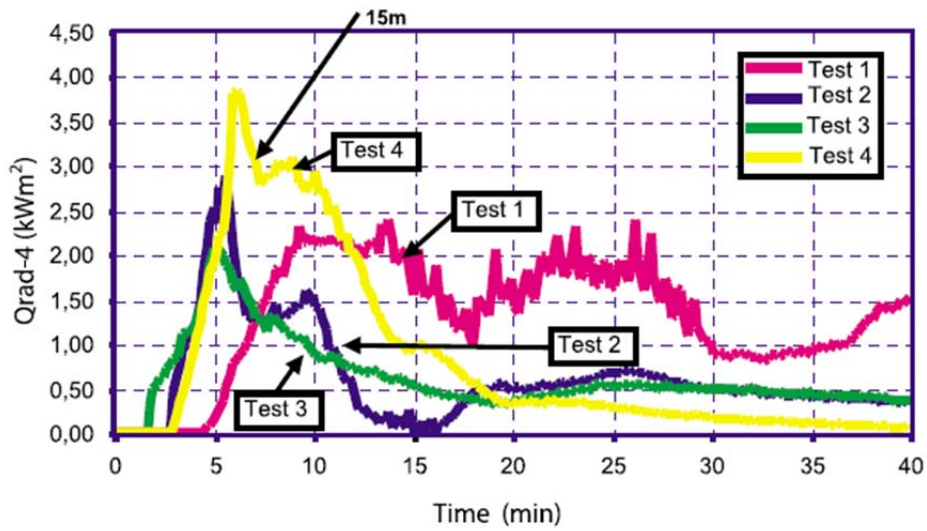
4.3 Experiment - Large Scale Fire Tests in the Runehamar tunnel

V září roku 2003 se uskutečnil požární experiment v tunelu Runehamar v Norsku, viz [7]. Při tomto experimentu byly v tunelu provedeny čtyři testy simulující požár nákladního vozu s běžným nákladem skládající se ze dřeva a plastů. V prvním testu tvořilo náklad 36 dřevěných palet a šest platových, u druhého testu se náklad sestával z dvaceti dřevěných palet a dvaceti PUR matrací. Třetí test obsahoval jako náklad čalouněný nábytek o hmotnosti 8,5 tuny. V posledním testu byly použity čtyři dřevěné palety s celkem 40 krabicemi s polystyrenovými kelímky.

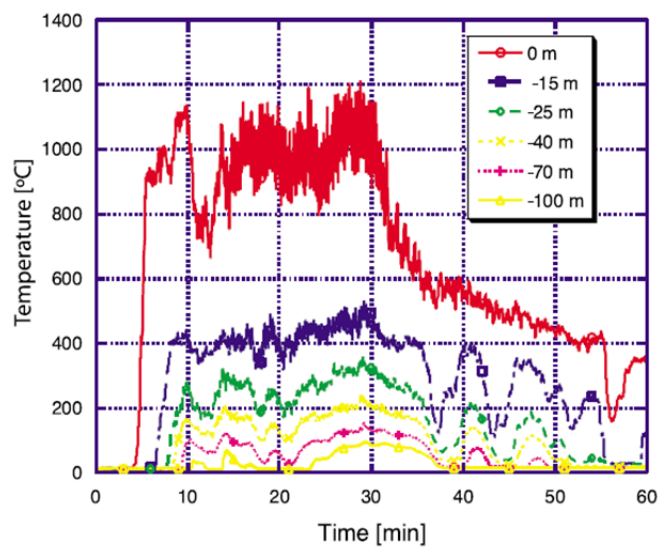


Obrázek 4.3.1 Teplota plynu v blízkosti požáru.

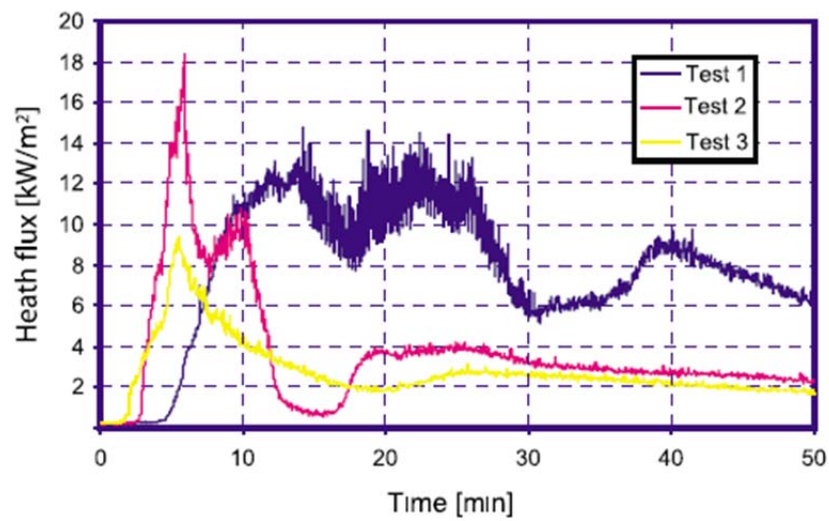
Během testu bylo prováděno velké množství měření, která se týkala teploty v různých místech tunely a stanovení množství tepelného toku od požáru. Během testů bylo dosaženo maximální rychlosti uvolňování tepla (HRR) 200 MW v prvním testu, 150 MW v druhém testu a 75 MW v případě testu číslo 4. S množstvím tepelného toku je spojena vzdálenost, na kterou se hasiči mohou přiblížit k ohni. Kritická úroveň tepelného toku (ztížená práce, pociťování bolesti do pěti minut) pro hasiče byla stanovena při použití ochranných obleků na 5 kW/m². Tato úroveň není 20 m od požáru překročena, jak ukazuje obrázek 4.3.2, proto jsou hasiči schopni požár z této vzdálenosti hasit.



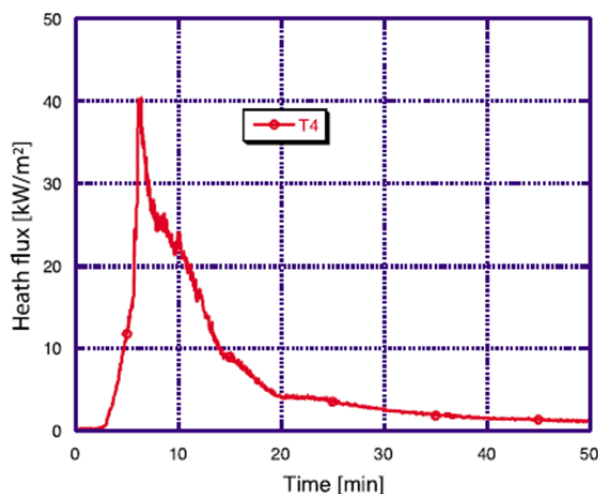
Obrázek 4.3.2 Tepelný tok 20 m od požáru proti směru proudění.



Obrázek 4.3.3 Teplota plynu proti směru proudění požáru.



Obrázek 4.3.4 Tepelný tok 10 m od požáru proti směru proudění.



Obrázek 4.3.5 Tepelný tok 5 m od požáru proti směru proudění.

5. POUŽITÍ ASFALTOVÝCH POVRCHŮ V TUNELECH

Použití asfaltových povrchů na pozemních komunikacích v tunelech sebou nese řadu úskalí. Zaprvé brání použití asfaltů požadavky na viditelnost, protože je nutné snížit kontrast mezi přejezdem z volného prostranství do komplexu tunelu. Proto se navrhuje povrch vozovky a stěn v tunelové troubě nelesklý a co nejvíce světlý. Dále mohou být použity vozovky s asfaltovým krytem podle normy [3] pouze v tunelech do délky 1000 m.

Překážka v použití asfaltů spočívá také v jejich hořlavosti a obavy z jejího příspěvku k požáru v tunelu. Z experimentu uvedeného v bodě 4.2.1 vyplývá, že lze asfaltový povrch zapálit a stačí k tomu tepelný tok 40 kW/m^2 . Ve studii, kterou provedl A. Noumowe, byla zjištěna teplota vznícení typického asfaltového povrchu (asfaltový koberec mastixový) 480 až 530 °C. V tunelu je díky jeho uzavřenému profilu v případě požáru dosaženo teplot převyšujících 1000 °C, jak předpokládají teplotní křivky používané jako požární scénáře, viz graf 4.1. Pro samotné účastníky mimořádné situace (požár) nebývá tolik nebezpečný samotný požár jako zplodiny hoření. Při požárních testech, viz 4.1 byl zjištěn vývoj toxických zplodin při hoření asfaltových vzorků.

Dalším problémem může být měknutí asfaltové směsi při požáru a tím pádem znemožnění účinného zásahu hasičským záchranným sborem. Jak je patrné z obrázku 4.3.4, ve vzdálenosti deset metrů od hořícího vozidla, těžký nákladní automobil, nedosahuje tepelný tok ani poloviční hodnoty nutné pro zapálení asfaltového povrchu. Samozřejmě k měknutí docházet může. Ovšem předpokládat, že by se zasahující složky do této oblasti dostaly a došlo k jejich zaboření do asfaltového povrchu, je nepravděpodobné. Díky vysoké teplotě i proti směru proudění požáru není možné do této plochy vstoupit. Na obrázku 4.3.3 je zobrazena teplota v různých vzdálenostech, pro vzdálenost patnáct metrů teplota plynů přesahuje zhruba do 35 minuty požáru 400 °C. Teplota plynů neodpovídá teplotě povrchu vozovky, která má jistou setrvačnost. Ale lze předpokládat, že dojde k ochlazení povrchu vozovky zasahujícími složkami a tím pádem nedojde k zaboření. Asfaltový povrch může být teplotou narušen do takové míry, že při chůzi po něm dojde k boření. Tento jev by mohl nastat pouze pro obrusnou vrstvu, jak dokazuje praktický příklad, viz příloha 1, která má tloušťku obvykle nepřesahující 50 mm.

Tyto předpoklady se týkají těžkého nákladního vozidla s hořlavým nákladem. Během testů uskutečněných v tunelu Runehamar bylo dosaženo maximální rychlosti uvolňování tepla

200 MW, což odpovídá požáru 40 osobních automobilů (HRR jednoho automobilu 5 MW). Havárie takového rozsahu je v tunelech České republiky vysoce nepravděpodobná či téměř vyloučená. Mohlo by dojít k havárii více než jednoho těžkého nákladního vozu s hořlavým materiálem nebo k havárii cisterny s hořlavými plyny nebo kapalinami. V tomto případě by celkový výkon požáru byl vyšší než u testu v tunelu Runehamar. Díky velkému množství tepelného toku by hasiči nebyli schopni dosáhnout proudem vody z bezpečné vzdálenosti, i přes použití ochranných obleků, na ohnisko požáru a museli by nechat požár vyhořet.

Možnost zdoání požáru bude vždy záviset na délce a výškovém profilu tunelu, poloze požáru v rámci tunelu, způsobu větrání a hořících předmětech. V případě podélného větrání je možné provádět hasební zásah pouze ze strany proti směru proudění spalin, u příčného větrání lze postupovat z obou stran a zásah bude účinnější.

6. ZÁVĚR

Tunel je svojí konstrukcí a uzavřeným profilem specifická stavba. Z hlediska bezpečnosti v něm dochází k menšímu počtu incidentů než na otevřených komunikacích. Ovšem následky nehody mají daleko větší dopad jak na účastníky provozu, tak na vybavení a konstrukci tunelu. Důležitým faktorem je, aby konstrukce a povrchy buď k požáru vůbec nepřispívaly, nebo byl jejich příspěvek minimální.

Po řadě katastrof, které se odehrály v dlouhých silničních tunelech (Mont Blanc, Tauernský tunel, tunel Fréjus), vznikly obavy z použití asfaltových povrchů a některé země (Rakousko) jejich použití zakázaly. V České republice je možno dle národních norem použít asfaltový povrch pouze pro tunely s délkou nepřesahující 1000 metrů. České tunely s těmi evropskými nemají mnoho společného, co se délky týká. Většina českých silničních tunelů je tvořena jednosměrnými oddělenými troubami. Naproti tomu tunely, ve kterých došlo ke katastrofám, měli troubu s obousměrným provozem. Nejdelším silničním tunelem v České republice je se svojí délkou 2058 m, viz [10] tunel Panenská, který bude překonán tunelovým komplexem Blanka s délkou 6,382 m, viz [9].

Nevýhodou asfaltových směsí pro silniční stavby je jejich hořlavost. Při požáru v tunelu mají potenciál uvolnit stejné množství tepla jako vozidla, která se v tunelu běžně vyskytují. Hořící asfalty vyvíjejí toxické zplodiny, které znesnadňují evakuaci osob a zásah jednotek integrovaného záchranného systému. Dále je pro omezení následků požáru zásadní, kolik vozidel a s jakým nákladem bude hořet. Potenciální hrozbou je hromadná havárie s požárem, při níž bude přítomno více těžkých nákladních vozů s hořlavým materiálem. V tomto případě není možné, díky vysokým teplotám a velkému množství tepelného toku, požár uhasit a musí dojít k jeho vyhoření.

V budoucnu se v České republice bude realizovat více tunelů přesahující délku jeden kilometr. V těchto tunelech představují asfaltové povrchy výrazné zvýšení požárního zatížení a větší rozsah škod v případě požáru. U kratších tunelů může docházet k většímu ochlazení požáru a tím i nižším teplotám, díky čemuž mohou hasiči hasit přímo ohnisko požáru. Proto je použití asfaltových povrchů v takových případech možné a není takovou hrozbou jako v případě tunelů delších než jeden kilometr.

Zdroje

- [1] Zákon č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích
- [2] ČSN EN 13108-1 *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Praha: ČNI, březen 2008.
- [3] ČSN EN 73 7507 *Projektování tunelů pozemních komunikací*. Praha: ČNI, leden 2006.
- [4] CARVEL Ricky. O. & TORERO Jose. L.: The contribution of asphalt road surfaces to fire risk in tunnel fires: Preliminary findings, *In: Edinburgh Research Archive* [online]. The University of Edinburgh, 2006 [vid. 2012_10_24]. Dostupné z:
<http://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/1842/895/1/Carvel%20Torero%20Hong%20Kong%202006b.pdf>
- [5] IMPROVING FIRE SAFETY IN TUNNELS: The concrete pavement solution [online] [vid. 2012_10_23]. Dostupné z:
http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/en/firesafety.pdf
- [6] ČSN EN 12591 *Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty*. Praha: ÚNMZ, září 2009.
- [7] Summary of Large Scale Fire Tests in the RONEHAMAR Tunnel in Norway [online] [vid. 2012_11_15]. Dostupné z:
http://www.vegvesen.no/_attachment/61890/binary/15101
- [8] Promat: Požární ochrana pro využití ve speciálních oblastech [online] [vid. 2012_11_16]. Dostupné z:
http://www.promat.sk/katalog/promat_katalog3_kap_15_spec.pdf
- [9] SATRA, spol s.r.o.: Tunelový komplex blanka [online] [vid. 2012_12_4]. Dostupné z:
<http://www.tunelblanka.cz/informace-o-projektu.php?action=1>
- [10] Česká tunelářská asociace: tunel Panenská [online] [vid. 2012_12_4]. Dostupné z:
http://www.ita-aites.cz/cz/podzemni_stavby/podzemni_stavby_v_provozu/tunel-panenska.html
- [11] PŘIBIL Pavel, JANOTA Aleš, SPALEK Juraj. *Analýza a řízení rizik v dopravě Tunely na pozemních komunikacích a železnici*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-2140-0
- [12] ČSN EN 1992-1-2 – Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížené konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: ČNI, srpen 2004
- [13] *Katalog stavebních materiálů Horniny* [online]. Topinfo s.r.o. [vid. 2012_12_13]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_katalog.html#horniny
- [14] *Emissivity Coefficients of some common Materials* [online]. Techstreet. [vid. 2012_12_13]. Dostupné z:
http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html

Příloha 1 – Praktický příklad

Při požárním testu v silničním tunelu Runehamar byla stanovena hodnota kritického toku, která vymezuje vzdálenost pro zásah hasičů v ochranných oblecích. Kritický tepelný tok 5 kW/m^2 představuje hodnotu, při které je práce hasičů velmi namáhavá a při vystavení tomuto toku pociťují bolest do pěti minut. V příkladu je vypočteno rozložení teploty ve dvou vrchních vrstvách vozovky při vystavení tomuto toku.

Skladba vozovky byla převzata z TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací. Dle dopravního významu je zvolena pozemní komunikace kategorie dálnice. Pro účely výpočtu uvedena skladba pouze prvních třech vrstev.



Obrázek 1 Skladba vozovky.

Pro simulaci požáru v tunelu je použita uhlovodíková křivka podle [12] čl. 3.2.3. Asfaltové směsi se skládají ze dvou základních složek – kameniva a pojiva. Obsah pojiva ve směsi se pohybuje okolo 5 %, proto má kamenivo z hlediska vlastností největší význam. Z toho důvodu jsou ve výpočtu uvažovány fyzikální vlastnosti kameniva, pojivo a případné přísady jsou kvůli malému vlivu na celkové vlastnosti směsi zanedbány. Jako kamenivo do asfaltových směsí se používá od droby přes vápenec, žulu až po čedič.

Přestup tepla do konstrukce vozovky je řešen pomocí metody sítí (explicitní schéma) s okrajovou podmínkou 2. druhu (Neumannova – předepsaná hodnota tepelného toku). Teplota v asfaltovém povrchu řešena jako 1D úloha.

Výpočet teploty:

$$\theta_n^{t+1} = \theta_n^t + \alpha \cdot \Delta t \cdot (\theta_{n-1}^t - 2 \cdot \theta_n^t + \theta_{n+1}^t) \quad (1.1)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1.2)$$

kde

Δt – časový krok [s]

λ – součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c – měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ρ – objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Teplota plynů (uhlovodíková křivka):

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20 \quad [^\circ\text{C}] \quad (1.3)$$

kde

t – čas [min]

Tepelný tok:

$$q = \alpha_c \cdot (\theta_{okol} - \theta_{povrch}) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \phi \cdot (\theta_{okol}^4 - \theta_{povrch}^4) = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.4)$$

kde

α_c – součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

θ_{okol} – teplota okolních plynů [K]

θ_{povrch} – teplota povrchu konstrukce [K]

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]

ε – emisivita povrchu

ϕ – polohový faktor

Teplota v asfaltové vrstvě:

$$\theta_1^t = \frac{q \cdot \Delta x}{\lambda} + \theta_2^{t-1} \quad [\text{K}] \quad (1.5)$$

kde

Δx – poměrná část tloušťky vrstvy [m]

Výpočet teploty dle (1.5) vyplývá z rovnice (1.4) pro $\Delta t_{max} \leq \frac{\Delta x^2}{2\alpha}$.

Materiálové vlastnosti:

vápenec: $\lambda = 1,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [13]

$c = 920 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [13]

$\rho = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [13]

$\varepsilon = 0,9$ [14]

Vlastnosti/podmínky:

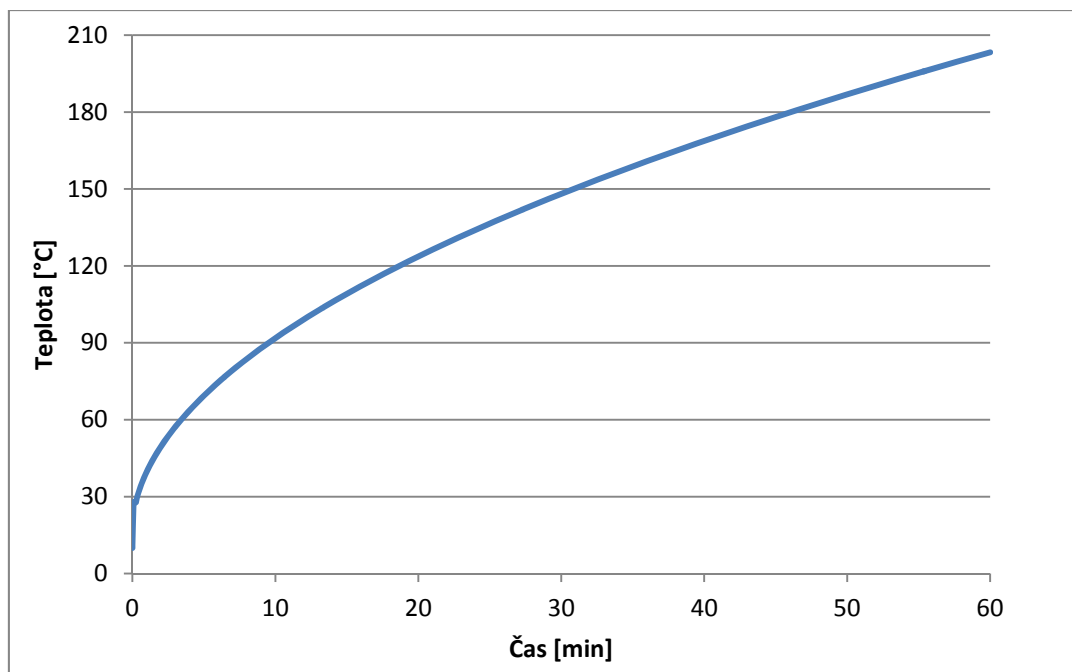
$\phi = 1,0$

$q = 5000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

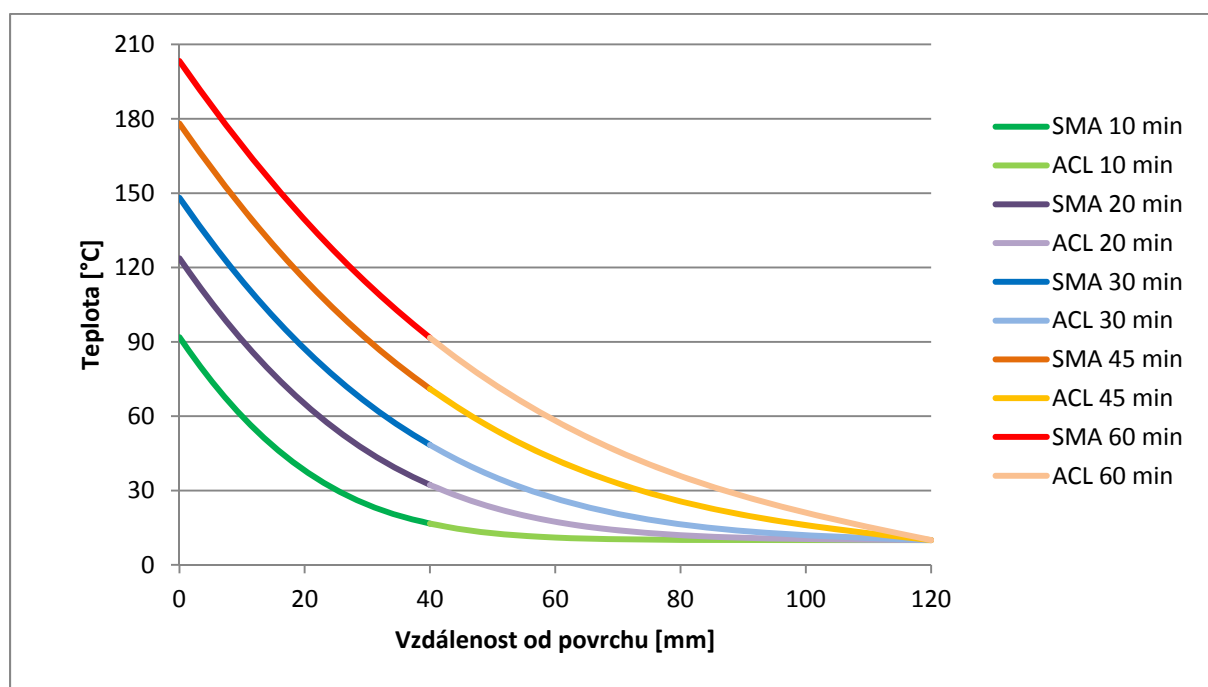
$\theta_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

$\Delta x = 0,005 \text{ m}$

$\Delta t_{max} = 20 \text{ s}$



Graf 1.1 Průběh teploty na povrchu vozovky.



Graf 1.2 Průběh teploty po tloušťce vrstev.

Asfaltový povrch ani po hodinovém vystavení kritickému tepelnému toku nedosáhl teploty 300 °C, při které byly (dle Noumowe) pozorovány jeho degradace. Při požáru těžkého nákladního automobilu nebude asfalt vystaven kritickému toku po dobu delší než třicet minut. Z grafu 1.2 je patrné, že teplota povrchu dosahuje téměř 150 °C. Vrchní vrstva skladby tvořená asfaltovým kobercem mastixovým (SMA) je prohřátá nad bod měknutí (viz tabulka 3.1.1), ale k boření hasičů s největší pravděpodobností docházet nebude. U druhé vrstvy tvořené asfaltovým betonem pro ložné vrstvy (ACL) nedojde ani k měknutí pojiva.