

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ**

Vít Gaydoš

**NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU PRO VENTILACI V SILNIČNÍCH
TUNELECH**

(Bakalářská práce)

Praha, 2014



K620..... Ústav dopravní telematiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Vít Gaydoš

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – ITS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Návrh řídicího systému pro ventilaci v silničních tunelech**

Název tématu (anglicky): Design of a Control System for Ventilation in Road Tunnels

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Seznamte se s problematikou silničních tunelových systémů. Vypracujte analýzu ventilačních systémů v tunelech.
- Analyzujte veličiny potřebné k řízení ventilace v silničních tunelech.
- Navrhněte systém řízení ventilace tunelového systému, definujte příslušné požadavky, vstupní veličiny i způsoby jejich měření.
- Navrhněte část operátorského pracoviště týkající se ventilace.
- Implementujte svůj návrh na prostředí řídicích systémů. Vytvořený návrh náležitě zdokumentujte.
- Analyzujte spolehlivost funkce navržené aplikace.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího BP

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Barták, J. a kol.: Tunel Mrázovka. Praha: Satra, 2004. ISBN 80-239-3472-4.

Příbyl, P.: Inteligentní dopravní systémy a dopravní telematika. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 184 s. ISBN 80-01-03122-5.

Příbyl, P., Janota, A., Spalek, J.: Analýza a řízení rizik v dopravě. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura,

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Bc. Vladimír Faltus, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce:

17. října 2013

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

30. listopadu 2014

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Vít Gaydoš
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....26. srpna 2014

Prohlášení

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU PRO VENTILACI V SILNIČNÍCH TUNELECH

Bakalářská práce

listopad 2014

Vít Gaydoš

Úplná bibliografická identifikace

Gaydoš, Vít. *Návrh řídicího systému pro ventilaci v silničních tunelech*. Praha: České vysoké učení technické Fakulta dopravní, listopad 2014.

Anotace (abstrakt)

Práce se zabývá systémem ventilace silničních tunelů. Je zaměřena na výpočty koncentrací emisí oxidu uhelnatého a opacity, jejich ředění, zabývá se také výpočtem rychlosti proudění vzduchu v tunelu. Hodnoty emisí a rychlosti proudění vzduchu v tunelu jsou počítány matematickým modelem. Regresí z nich je určena závislost rychlosti proudění vzduchu v tunelu na vstupních dopravních datech. Tato závislost byla implementována pomocí vhodného algoritmu do programu RSLogix. Dále byla vytvořena analýza spolehlivosti tohoto řešení.

Přínosem práce je uvedený vztah aplikovatelný na jakýkoliv silniční tunel mezi vstupními hodnotami dopravního proudu a výslednou rychlostí proudění vzduchu. Výsledná hodnota lze použít pro ovládání celého ventilačního systému.

Klíčová slova

Dopravně-telematický systém, emise oxidu uhelnatého a opacity, ventilace, intenzita a rychlost dopravního proudu, rychlost proudění vzduchu.

Obsah

Seznam použitých veličin a jednotek	5
Seznam použitých zkratk	8
Slovník pojmů	10
Poděkování	11
Úvod	12
1 Silniční tunel.....	13
1.1 Historie	13
1.2 Nejdelší tunely světa a České republiky.....	14
1.3 Model chování řidiče v tunelu.....	15
2 Dopravně-telematický systém v silničních tunelech	16
2.1 Hierarchie řízení dopravy	16
2.1.1 Úroveň uzlu.....	16
2.1.2 Úroveň oblasti	16
2.1.3 Úroveň útvaru.....	17
2.2 Pojem telematický systém	18
2.3 Silniční tunel jako součást telematického systému	19
2.3.1 Kategorizace tunelových technologických subsystémů.....	19
2.3.1.1 Dopravní systém.....	19
2.3.1.2 Bezpečnostní vybavení	20
2.3.1.3 Osvětlení	20
2.3.1.4 Větrání	20
2.3.1.5 Spojovací a dorozumívací zařízení.....	21
2.3.1.6 Elektrická napájecí soustava	21
2.3.1.7 Řídicí systém.....	21
2.3.1.8 Pomocná technologická zařízení	21
2.3.2 Architektura tunelu	21
3 Ventilace tunelů.....	23
3.1 Druhy ventilace	23
3.1.1 Přirozené větrání	23
3.1.1.1 Obousměrný provoz	24
3.1.1.2 Jednosměrný provoz	24
3.1.1.3 Spojení přirozené a umělé ventilace	24
3.1.2 Podélné větrání.....	24
3.1.3 Polopříčné větrání	26
3.1.4 Příčné větrání	28
3.2 Parametry větráku APW	29
3.3 Výpočet potřebného množství vzduchu k zředění škodlivin.....	30
3.3.1 Normální režim a režim při údržbě tunelu	30
3.3.1.1 Zatížení ovzduší v tunelu emisemi CO od osobního automobilu	31
3.3.1.2 Zatížení ovzduší v tunelu emisemi CO od nákladního automobilu	32
3.3.1.3 Ředění oxidu uhelnatého.....	32

3.3.1.4	Opacita – zplodiny z dieselových motorů.....	33
3.3.1.5	Opacita od osobního automobilu.....	33
3.3.1.6	Opacita od nákladního automobilu.....	34
3.3.1.7	Ředění opacity.....	34
3.3.2	<i>Mimořádný režim při požáru v tunelu.....</i>	36
3.4	Výpočet rychlosti vzduchu v tunelu.....	37
3.4.1	<i>Síly ovlivňující pohyb vzdušiny v tunelu:</i>	37
3.4.1.1	Pístový efekt vozidel:	37
3.4.1.2	Síla větru působící na portál tunelu	37
3.4.1.3	Komínový efekt	38
3.4.1.4	Odpor tunelové trouby	38
3.4.1.5	Další potřebné vztahy:	38
3.5	Moderní metody v navrhování ventilačního systému	39
3.5.1	<i>Odhadování množství škodlivin z dopravních dat.....</i>	39
3.5.1.1	Hybridní model pro odhadování škodlivin	40
3.5.2	<i>Modelování jízdy vozidel v tunelu.....</i>	41
4	Návrh ventilace tunelu.....	43
4.1	Charakteristika tunelu.....	44
4.1.1	<i>Parametry tunelu využité pro výpočet.....</i>	45
4.2	Výpočet zředění CO a opacity.....	45
4.2.1	<i>Minimální intenzita.....</i>	45
4.2.1.1	Zředění CO.....	46
4.2.1.2	Zředění opacity.....	46
4.2.1.3	Výsledná rychlost vzduchu	47
4.2.2	<i>Maximální intenzita dopravy ze současných sběrů dat</i>	47
4.2.2.1	Zředění CO.....	47
4.2.2.2	Zředění opacity.....	48
4.2.2.3	Výsledná rychlost vzduchu	48
4.2.3	<i>Maximální možná intenzita dopravy</i>	48
4.2.3.1	Zředění CO.....	48
4.2.3.2	Zředění opacity.....	49
4.2.3.3	Výsledná rychlost vzduchu	49
4.2.4	<i>Kongesce.....</i>	50
4.2.4.1	Zředění CO.....	50
4.2.4.2	Zředění opacity.....	51
4.2.4.3	Výsledná rychlost vzduchu	51
4.3	Výpočet rychlosti vzduchu v závislosti na působících silách	51
4.3.1	<i>Minimální intenzita.....</i>	53
4.3.2	<i>Maximální intenzita dopravy ze současných sběrů dat</i>	53
4.3.3	<i>Maximální možná intenzita dopravy</i>	53
4.3.4	<i>Kongesce.....</i>	54
4.4	Návrh operátorského pracoviště	54
5	Implementace návrhu v prostředí Rockwell Automation.....	56
5.1	Popis dat	56
5.1.1	<i>Vstupní data.....</i>	56

5.1.2	<i>Data uložená v programu</i>	57
5.1.3	<i>Výstupní data</i>	57
5.2	<i>Funkce</i>	57
6	Analýza spolehlivosti navrženého programu	60
6.1	Reakce programu na vstupní hodnotu rychlosti	60
6.1.1	<i>Naměřená rychlost vozidel je záporná</i>	60
6.1.2	<i>Naměřená rychlost vozidel je vyšší než 110 km/h</i>	60
6.1.3	<i>Nízká hodnota naměřené rychlosti</i>	61
6.2	Reakce programu na vstupní hodnotu intenzity dopravy	61
6.2.1	<i>Naměřená intenzita dopravy je příliš nízká</i>	61
6.2.2	<i>Naměřená intenzita dopravy je pro danou rychlost příliš vysoká</i>	61
6.3	Nejsou k dispozici žádné vstupní hodnoty	61
	Závěr	63
	Seznam použitých zdrojů	65
	Seznam obrázků	67
	Seznam příloh	68

Seznam použitých veličin a jednotek

$\%NV$	podíl nákladních vozidel [%]
$\%OV$	podíl osobních vozidel [%]
$\%HOD$	podíl vozidel špičkové hodinové intenzity vzhledem k denní intenzitě [%]
ξ_a	součinitel tlakové ztráty na výstupu z tunelu [-]
ξ_e	součinitel tlakové ztráty na vstupu do tunelu [-]
ξ_T	vřazené odpory [-]
λ	součinitel tření tunelové trouby [-]
ρ	hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
a_{nv}	podíl nákladních vozidel dohromady [%]
$a_{nv,10}$	podíl nákladních vozidel s hmotností 10 tun [%]
$a_{nv,20}$	podíl nákladních vozidel s hmotností 20 tun [%]
$a_{nv,30}$	podíl nákladních vozidel s hmotností 30 tun [%]
a_{ov}	podíl osobních vozidel [%]
$a_{ov,D}$	podíl osobních vozidel s dieselovým motorem [%]
CO_{+15}	množství škodlivin CO za 15 minut [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
CO_{akt}	aktuální množství škodlivin CO [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
$c_{lim,co}$	limitní koncentrace škodlivin oxidu uhelnatého daná normami [ppm]
$(c_w * F)_{nv}$	aerodynamický součinitel vynásobený čelní plochou NV [m^2]
$(c_w * F)_{ov}$	aerodynamický součinitel vynásobený čelní plochou OV [m^2]
D	hydraulický průměr tunelu [m]
E	úroveň světelného paprsku po průchodu [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
E_0	vstupní úroveň paprsku [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
$e_{0,co,B}$	základní emise CO pro OV_B [$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{voz}^{-1}$]
$e_{0,co,D}$	základní emise CO pro OV_D [$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{voz}^{-1}$]
$e_{0,co,n}$	základní emise CO pro jedno NV [$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{voz}^{-1}$]
$e_{0,OP,D}$	základní hodnota opacity pro jedno OV [$\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{voz}^{-1}$]
$e_{0,OP,n}$	základní hodnota opacity pro jedno NV [$\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{voz}^{-1}$]
E_{co}	množství emisí v tunelu [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
$e_{nv,co}$	CO – emise průměrného nákladního vozidla [$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{voz}^{-1}$]

$e_{nv,Z}$	opacita NV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
$e_{ov,B}$	CO – emise průměrného OV s benzínovým motorem [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
$e_{ov,co}$	CO – emise průměrného OV s benzínovým a diesellovým motorem [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
$e_{ov,D}$	CO – emise průměrného OV s diesellovým motorem [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
$e_{ov,Z,B}$	opacita OV s benzínovým motorem [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
$e_{ov,Z,D}$	opacita OV s diesellovým motorem [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
E_Z	celková hodnota opacity [$m^2 \cdot s^{-1}$]
f_H	faktor nadmořské výšky (roste s výškou) [-]
f_M	hmotnostní faktor [-]
F_T	příčný průřez tunelu [m^2]
f_z	časový faktor (klesá s časem) [-]
K	koeficient opacity [$l \cdot m^{-1}$]
$k_{lim,Z}$	limitní koncentrace škodlivin oxidu uhelnatého daná normami [m^{-1}]
l	délka měřené trasy [m]
$L_{nv,10}$	délka nákladního vozidla s hmotností 10 tun [-]
$L_{nv,20}$	délka nákladního vozidla s hmotností 20 tun [m]
$L_{nv,30}$	délka nákladního vozidla s hmotností 30 tun [m]
L_{ov}	délka osobního vozidla [m]
L_T	délka tunelu [m]
MM	nadmořská výška [m n. m.]
M_{nv}	počet NV v tunelu v jednom směru [-]
M_{ov}	počet OV v tunelu v jednom směru [-]
N	celkový počet vozidel [$voz \cdot h^{-1}$]
$P_{vítr}$	tlak větru na portál tunelu [Pa]
$q_{ar,nv}$	dodatečný příspěvek opacity pro OV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
$q_{ar,ov}$	dodatečný příspěvek opacity pro OV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
q_{den}	intenzita dopravního proudu za den [$voz \cdot den^{-1}$]
Q_{FL}	maximum potřebného množství čerstvého vzduchu pro zředění CO, opacity [$m^3 \cdot s^{-1}$]
$Q_{FL,co}$	potřebné množství čerstvého vzduchu pro zředění CO [$m^3 \cdot s^{-1}$]
$Q_{FL,Z}$	potřebné množství čerstvého vzduchu pro zředění opacity [$m^3 \cdot s^{-1}$]

q_{hod}	intenzita vozidel [voz.h ⁻¹]
Q_{kom}	komínový efekt [N]
q_{nv}	intenzita NV [voz.h ⁻¹]
q_{ov}	intenzita OV [voz.h ⁻¹]
Q_{tun}	odpor tunelové trouby [N]
$Q_{vítr}$	síla větru působící na portál [N]
Q_{voz}	pístový efekt [N]
R	rok dimenzování systému ventilace [-]
S	podélný sklon vozovky [%]
U	obvod příčného řezu tunelu [m]
v	rychlost vozidel v tunelu [km.h ⁻¹]
v_{nv}	rychlost nákladních vozidel [km.h ⁻¹]
v_{ov}	rychlost osobních vozidel [km.h ⁻¹]
v_t	rychlost vzduchu v tunelu [m.s ⁻¹]
$v_{t,min,co}$	minimální rychlost vzduchu v tunelu pro zředění oxidu uhelnatého [m.s ⁻¹]
$v_{t,min,z}$	minimální rychlost vzduchu v tunelu pro zředění opacity [m.s ⁻¹]

Seznam použitých zkratek

AIMSUN - software pro modelování dopravy

APW - axiální přetlakové ventilátory

CCTV - Closed Circuit Television

CO - oxid uhelnatý

CS - programovatelné automaty a moduly vzdálených vstupů a výstupů v tunelu

CT - hlavní řídicí stanice v tunelu a lokální dispečink tunelu

GA - dispečink řízení technologie tunelů (oblast)

GG - dispečink řízení dopravy – úroveň útvary

GGE - systém řízení dopravy – úroveň útvary

GT - dispečink řízení dopravy tunelů (oblast)

HC - aldehydy

HMI - Human-Machine-Interface, propojení mezi člověkem a řízenou technologií

IT - technická zařízení tunelu (světelné signalizační zařízení, ventilátory, ...)

NDIC - Národní dopravní informační centrum

NO_x - oxidy dusíku

OPTUN - Optimalizace provozu silničních tunelů

PIARC - Permanent International Association of Road Congresses

PLC - Programable Logic Control

ppm - Part Per Milion = 1 cm³ zplodin v m³

OV - osobní vozidlo

NV - nákladní vozidlo

RDS-TMC - Radio Data Systém–Traffic Message Channel

SOS - Save Our Souls

SSA - systém řízení technologie – úroveň uzlu

SST - systém řízení dopravy – úroveň uzlu

STA - systém řízení technologie – úroveň oblasti

STS - systém řízení dopravy – úroveň oblasti

TA - nejvyšší stupeň vybavenosti tunelu podle TP 98

Slovník pojmů

Aktory	zařízení k vizuálnímu přenosu informací k řidiči, například světelné signalizační zařízení
Bodový injektor.....	ventilátor, který v daném bodě urychluje vzdušinu v tunelu
Černá díra.....	projevuje se při vjezdu do špatně osvětleného tunelu, převážně při jasném slunečním svitu
Emise	škodliviny, které vznikají při nedokonalém spalování paliv u motorových motorů
Homomorfní model.....	takový model, ze kterého lze zpět vytvořit originál
Hybridní model dopravy	pro řízení dopravy využívá i historická data
Klapky.....	součást ventilačního systému většinou umístěná u stropu tunelové trouby sající škodliviny či kouř z tunelové trouby
Komínový efekt.....	síla působící na vzduch v tunelu způsobena přírodními podmínkami
Kongesce.....	dopravní zácpa, nastává, pokud je provoz silnější než kapacita komunikace
Longitudiální.....	větrání, které proudí vzduch rovnoběžně s osou tunelu
Model.....	popsaná část ucelené reality, reprezentace objektu z určitého úhlu pohledu
Opacita.....	zakouřenost, emise z diesellových motorů, které snižují viditelnost
Pístový efekt.....	síla působící na vzduch v tunelu způsobena projíždějícími vozidly
Pomalé vozidlo.....	obecný název pro nákladní vozidla, autobusy (vozidla s nižšími hodnotami maximální rychlosti, akcelerace, decelerace)
Portál tunelu	vjezdová a výjezdová část tunelu
Světelné signalizační zařízení	zařízení přenášející vizuálně informaci řidiči
Transverzální.....	větrání, které proudí vzduch kolmo na osu tunelu
Tunelová trouba	hlavní část tunelu, kterou projíždějí vozidla
Vyústky	součást ventilačního systému většinou umístěná u stropu tunelové trouby vhánějící čerstvý vzduch do tunelové trouby

Poděkování

Rád bych tímto krátkým odstavcem poděkoval všem, kteří se na tvorbě této bakalářské práce podíleli, ať už přímo anebo nepřímo.

Nejprve patří velké poděkování vedoucímu této práce a zároveň vedoucímu projektu, který jsem absolvoval, panu Ing. Bc. Vladimíru Faltusovi, Ph.D.

Dále bych rád poděkoval za podporu přítelkyni, rodičům a také babičce, bez kterých bych se ke psaní této práce vůbec nedostal.

Úvod

Vlivem celkového společenského vývoje i v oblasti mobility obyvatelstva se tunelové systémy nejen na dálnicích staly nedílnou součástí silničních komunikací. Vzhledem ke stále se zvyšujícím intenzitám dopravy a stavbě delších tunelů je zapotřebí tunelové systémy odvětrávat a ředit emise způsobené projíždějícími automobily.

Silniční tunel, jako součást komunikační sítě, je složitý telematický systém, ve kterém je řada senzorů, aktorů a dalších technických zařízení přispívajících k jeho správné funkci a také bezpečnosti účastníků provozu.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit aplikaci sloužící k řízení ventilace silničního tunelu v reálném čase. Nejedná se o komplexní problematiku ventilace, ale „pouze“ o složku zabývající se přípravou a modelováním dat pro samotné ovládání ventilátorů. Moderní metody řízení ventilace, které budou využity, vycházejí ze znalosti aktuálního stavu dopravy. Některé potřebné vstupní veličiny nelze snadno získat a získávají se tak z matematických modelů jiných, lépe měřitelných, veličin. Je proto nutné se, kromě samotné technologie ventilace, zaměřit i na problematiku získávání a modelování potřebných vstupních dat.

Práce obsahuje teoretický rozbor problematiky tunelů v kapitole 1, tunelové telematiky v kapitole 2 a podrobněji se zabývá samotným subsystémem ventilace silničních tunelů v kapitole 3.

Po bližším seznámení se s rozsáhlým tématem bylo přistoupeno k návrhu metody řízení ventilace tunelu, konkrétně části využití měřených veličin a modelování dalších (neměřených) hodnot. Cílem této části bylo určit požadovanou rychlost proudění vzduchu v tunelu pro správné odvětrání zplodin (kap. 4.2.). Tato rychlost je rozhodujícím vstupem pro následné ovládání samotných ventilátorů.

Výstupní rychlost proudění vzduchu v tunelu byla výsledkem několika matematických modelů, které se určily off-line postupem, s využitím mnoha vztahů založených mimo jiné na fyzikálních principech definovaných v předpisech (kap. 4.3.). Následně je za pomoci regrese modelován přímý vztah výstupní rychlosti proudění vzduchu v tunelu a vstupních měřených dopravních veličin.

Výsledné rovnice matematického modelu sloužící k on-line řízení ventilace jsou implementovány na řídicí techniku (kap. 5). Kapitola 6 řeší problematiku spolehlivosti, resp. chování systému při různých druzích poruch či výpadcích vstupních veličin.

1 Silniční tunel

Silniční tunel je zvláštní dopravní stavbou, která je přirozenou součástí silniční dopravy. V tunelu platí veškerá pravidla silničního provozu a dopravní poměry zpravidla odpovídají dopravním poměrům na běžné povrchové komunikaci. Tunel se oproti běžné povrchové komunikaci odlišuje vyšší náročností investic na jeho vybudování a také správu. V tunelu je použito významně větší množství různorodých technologií, které se snaží o co nejplynulejší dopravu v tunelu, která výrazně snižuje riziko nehody. Úkolem tunelu je bezesporu snaha o co největší bezpečnost projíždějících cestujících, a to při samotném průjezdu tunelem nebo v případě mimořádné události, kterou může být nehoda, požár nebo například porucha zdroje napájení. Zabezpečení v tunelech je složité hlavně kvůli absenci přirozených únikových cest. Hlavní zřetel při projektování, stavbě a následné obsluze tunelů je brán na co nejlepší a nejrychlejší řešení mimořádných událostí. [1]

1.1 Historie

Prvními známými tunelovými stavbami jsou vodovodní štoly. Jejich výstavba spadá již do 10. stol. před n. l. do Jeruzaléma. První dochovanou vodovodní štolou je Ezechiášova štola z 8. stol. před n. l., která byla vybudována také v Jeruzalémě a v současné době je zpřístupněna veřejnosti. První zmínkou o dopravních tunelech je 16 tunelů, které vystavěli Římané v 1. stol. před n. l. Mezi nejznámější dopravní tunely z této doby patří stále ještě existující 2 tunely nedaleko Neapole, které jsou široké 4,5 m a dlouhé 780 m a 970 m.

Prvním a dosud funkčním městským silničním tunelem je tunel Neutor, který byl vybudován v Salcburku v roce 1774, je 131 m dlouhý a příčný profil má velikost cca 70 m².

Prvním železničním tunelem byl tunel Edge Hill, postavený v roce 1830 na trati mezi Manchesterem a Liverpoolem, jeho délka byla 1006 m.

První snaha o zavedení silniční dopravy pod povrch země spadá do 1. poloviny 20. století, kdy se objevily problémy s intenzitou městské povrchové dopravy.

Rozmach výstavby silničních tunelů spadá do období po druhé světové válce, kdy se začala více rozmáhat automobilová doprava.

Tunely slouží také k překonávání přírodních překážek, a tak začala stavba řady tunelů v pohoří Alp, které měly za cíl spojit sever a jih Evropy. Většina těchto tunelů funguje dosud a i přesto, že byly tunely značně modernizovány, řada z nich je v současnosti nevyhovující jak z dopravního, tak bezpečnostního hlediska.

Vedle silničních a železničních tunelů jsou velmi důležitou součástí dopravy podzemní dráhy (metra). První podzemní dráha Evropy byla vybudována v Londýně v roce 1863. Nejrozsáhlejší podzemní dráhou světa s 420 km je New York, který je také nejfrekventovanější s více než 1,5 miliardami pasažérů ročně.

V Česku probíhal vývoj podobně jako v celé Evropě jen v daleko menším rozměru. Výstavba železničních tunelů ve 2. polovině 19. století, ale byla oproti výstavbě silničních tunelů v 1. polovině 20. století přeci jen významnější. Typickým městským silničním tunelem je pražský Letenský tunel, který byl do roku 1997 nejdelším silničním tunelem na území ČR.

Mezi další plány výstavby tunelů patří i některé nestandardní a odvážné projekty, mezi které patří:

- Tunel pod Gibraltarským průlivem, který bude dlouhý přibližně 40 km.
- Tunel pro propojení mezi Sicílií a Apeninským poloostrovem. Messinský průliv je však velmi hluboký, a tak připadá v úvahu plovoucí tunel, který by byl cca 30 m pod hladinou moře a ke dnu by byl připevněn ocelovými lany. Zde se uvažuje i o přemostění.
- Tunel pod Beringovou úžinou, kde je největším problémem vzdálenost asi 85 km a drsné prostředí Aljašky i Čukotského poloostrova.

Zajímavým projektem je bezesporu Swiss Metro, který by propojoval převážně podzemně velká města Švýcarska. [1]

1.2 Nejdelší tunely světa a České republiky

Tab. 1: Nejdelší železniční tunely světa [12]

Název	Stát	Délka [m]	Zahájení provozu
Seikan	Japonsko	53841	1988
Eurotunel	Francie-VB	50450	1994
Lötschberg	Švýcarsko	34577	2007

Tab. 2: Nejdelší silniční tunely světa [12]

Název	Stát	Délka [m]	Zahájení provozu
Lærdahl	Norsko	24510	2000
Zhongnanšan	Čína	18040	2007
Gotthard	Švýcarsko	16918	1980

Tab. 3: Nejdelší železniční tunely České republiky [13]

Název	Místo	Délka [m]	Zahájení provozu
Březenský	Lužná u Rakovníka – Chomutov	1758	2007
Špičácký	Plzeň – Železná Ruda	1747	1876
Vítkovský II	Praha hlavní nádraží – Praha-Libeň	1364	2008

Tab. 4: Nejdelší silniční tunely České republiky [14]

Název	Místo	Délka [m]	Zahájení provozu
Bubenečský	Praha: Střešovice – Troja	3091	2014*
Panenská	Dálnice D8: Trmice – hraniční přechod	2168	2006
Strahovský	Praha: Smíchov – Střešovice	2004	1997

**předpokládaný začátek provozu*

1.3 Model chování řidiče v tunelu

Interakce člověka s vozidlem v průběhu průjezdu silničním tunelem zejména větší délky je odlišná oproti jízdě po klasické povrchové komunikaci. Průjezd tunelem představuje pro řidiče značně větší zátěž, a to jak fyzickou, tak psychickou. Obecně lze říct, že delší pobyt v jakémkoli uzavřeném prostoru působí na člověka depresivně. Projevuje se to i pozměněnými reakcemi člověka na okolní stimuly. Stimuly uvažujeme funkční, které přímo ovlivňují řízení a jízdu vozidla, a okrajové, které více či méně odvádějí část pozornosti řidiče, který se pak plně nevěnuje stimulům funkčním.

V rámci projektu Ministerstva dopravy České republiky „Optimalizace provozu silničních tunelů“ (zkráceně „OPTUN“) bylo při Fakultě dopravní zkoumáno rozdílné chování řidiče při průjezdu tunelem oproti jízdě na běžné povrchové komunikaci. S podrobnostmi a průběhem tohoto projektu se není třeba zabývat, ale z měření lze konstatovat:

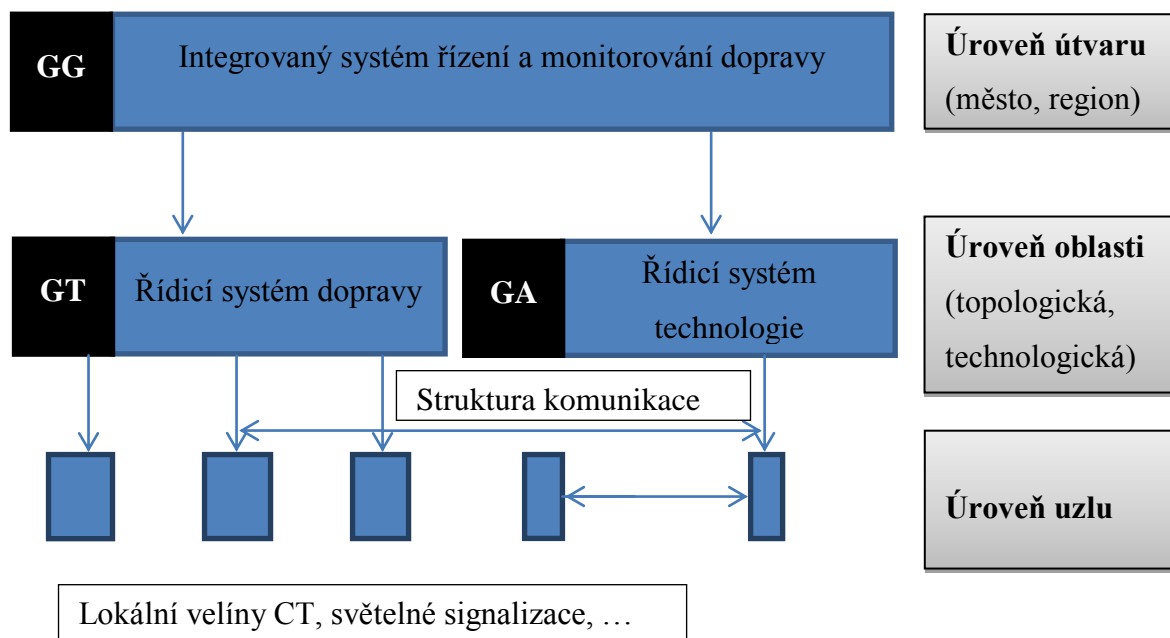
- U naprosté většiny řidičů se zmenšila střední vzdálenost od dělicí čáry mezi oběma dopravními pruhy při průjezdu tunelem oproti jízdě na volné komunikaci;
- U naprosté většiny řidičů je rozptyl trajektorie v tunelu menší než na volné komunikaci.

Obě tvrzení lze shrnout tak, že se řidič snaží držet ve větší vzdálenosti od stěny tunelu, také se více soustředí na jízdu, a tak i více „drží“ stopu. [1]

2 Dopravně-telematický systém v silničních tunelech

2.1 Hierarchie řízení dopravy

Telematika silničního tunelu je vždy součástí telematiky celého dopravního systému. Dopravní systém je rozdělen hierarchicky do tří vrstev (Obr. 1).



Obr. 1: Hierarchie řídicích systémů dopravy [1]

2.1.1 Úroveň uzlu

Uzel představuje nejnižší hierarchickou úroveň, která je tvořena uzavřenými technologickými celky. Technologickým systémem na úrovni uzlu může být světelné signalizační zařízení na křižovatce nebo parkovací systém, například podzemní garáže, nebo i lokální systém řízení dopravy v tunelu, který je řízen lokálním velínem (CT). Pro veškeré technologické celky úrovně uzlu je však potřebné, aby byly propojeny s vyšší vrstvou a tato vrstva o nich měla potřebné údaje.

2.1.2 Úroveň oblasti

Oblast je vyšší úroveň, která integruje řadu uzlů. Oblast, která by měla být co nejvíce uzavřená a bez většího počtu vazeb na okolí, je navrhována dopravním expertem s přispěním matematických metod.

Plošně uspořádanou oblastí jsou především městské aglomerace. **Liniově uspořádanou** oblastí naopak tunelové systémy na dálnicích a silničních tazích.

Úroveň oblasti pokrývá z hlediska **řízení dopravy** v tunelech velín (**GT**). Velín integruje dopravu více tunelů dohromady a snaží se celý systém včlenit do dopravy jako takové. Velín musí být začleněn do řízení dopravy v tunelu přímo, a to především světelnými signalizacemi, jen tak lze koordinovat běžný provoz i řešit mimořádné události.

Velín **řízení technologie** tunelů (**GA**) dohlíží na technické zařízení v tunelech, zajišťuje také jejich bezchybné fungování.

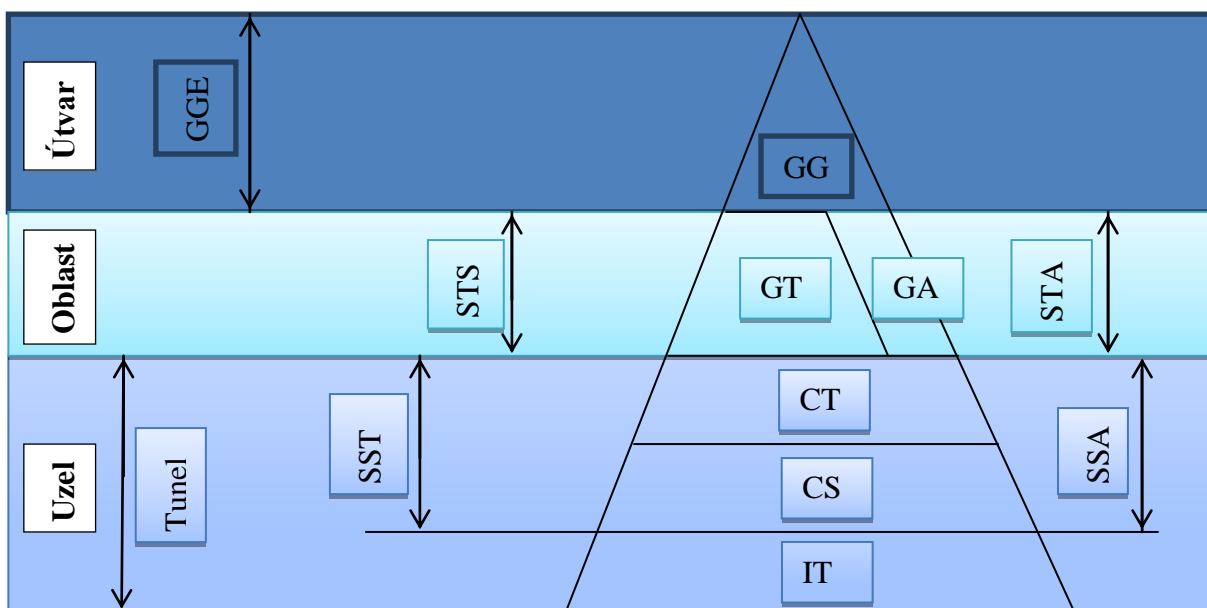
Z hlediska úspor se se oba velíny GT a GA slučují dohromady.

2.1.3 Úroveň útvaru

Nejvyšším stupněm řízení dopravy je úroveň útvaru, která slučuje vždy několik oblastí dohromady. Útvarem nemusí být pouze ústředna slučující několik městských aglomerací v celek, ale i NDIC (Národní dopravní informační centrum), které spravuje systém dálnic na úrovni státu nebo například systém zabývající se nadnárodní přepravou nebezpečného nákladu.

Městské tunely musejí být vždy součástí městského systému řízení dopravy a informace z dálničních tunelů jsou přenášeny do NDIC pro co nejlepší řízení dopravního proudu.

Na Obr. 2 je znázorněna celá hierarchie řízení dopravy od nejnižší IT až po dispečink.



Obr. 2: Hierarchie řídicích systémů [1]

GG..... dispečink řízení dopravy – úroveň útvaru

GT..... dispečink řízení dopravy tunelů – úroveň oblasti

GA.....	dispečink řízení technologie tunelů – úroveň oblasti
CT.....	hlavní řídicí stanice v tunelu a lokální dispečink tunelu
CS.....	programovatelné automaty a moduly vzdálených vstupů a výstupů v tunelu
IT.....	technická zařízení tunelu (světelné signalizační zařízení, ventilátory, ...)
GGE.....	systém řízení dopravy – úroveň útvaru
STS.....	systém řízení dopravy – úroveň oblasti
SST.....	systém řízení dopravy – úroveň uzlu
STA.....	systém řízení technologie – úroveň oblasti
SSA.....	systém řízení technologie – úroveň uzlu

2.2 Pojem telematický systém

Nejprve vysvětlíme pojem **systém**. Systém je abstrakce, která je formou obrazu zkoumaného objektu, části reality. Architekturu systému rozumíme abstraktní zjednodušený model systému, který je tvořen následujícím způsobem: v reálném světě rozeznáme objekt, například dopravně telematický systém (tunel), který rozložíme na množství částic (entit), které propojují vazby. Při tvorbě architektury seskupujeme části objektu do prvků, mezi kterými vytváříme množinu vazeb. Systém můžeme definovat také jako množinu prvků a vazeb mezi nimi.

Definice pojmu: Telematický systém (dle zdroje [1], s. 98):

„Systém můžeme považovat za telematický, pokud využívá pro realizaci daného procesu *P* více subsystémů, které jsou *sjednoceny* ve smyslu dosažení požadované cílové funkce. Mezi subsystémy a jejich funkcemi jsou realizovány relace pro přenos dat a informací v jednotném telekomunikačním prostředí.“

„Dopravní telematika integruje informační a telekomunikační technologie s metodami dopravního inženýrství, aby se pro stávající infrastrukturu komunikací zvýšily přepravní výkony, vzrostla bezpečnost a zvýšila se psychická pohoda cestujících.“

Například řízení dopravy ve městě pomocí světelné signalizace nebo jakkoli složitý systém ventilace v tunelu nemůže být sám o sobě telematickým systémem, protože pro svou správnou činnost využívá pouze jeden (i když složitý) proces.

Tunel můžeme považovat za dopravně-telematický systém, pokud jeho ventilace nebude závislá pouze na teplotních a kouřových čidlech, ale také na parametrech dopravního proudu, které s ventilací souvisí.

2.3 Silniční tunel jako součást telematického systému

Silniční tunel pro zajištění bezpečné, ekonomické a ekologické dopravy využívá velkého množství dat, která pocházejí z různorodých zdrojů. Propojení dat je nutností pro správné fungování telematického systému jako celku. Data mohou být dopravní, fyzikální, také je zapotřebí tunelem přenášet verbální informace (SOS skříňky), dále umožnit přístup k obrazovým informacím pro lepší dohled nad situací v tunelu. Dalšími daty potřebnými k zajištění bezpečnosti jsou data z detektorů souvisejících s ventilací, osvětlením a dalšími bezpečnostními systémy (nouzová tlačítka, požární hlásiče).

Tunel je součástí dopravního systému zařazeného do okolí, proto je nutné, aby tunel komunikoval s dopravními centry, dispečinky policie, záchranné služby a hasičů. Také musí kooperovat v oblasti řízení dopravy tak, aby například světelné signalizace vně tunelu reagovaly na vznikající kolony uvnitř tunelu.

Tunel můžeme v zásadě dělit na stavební a technologickou část. Stavební složkou se dále zabývat nebudeme.

2.3.1 Kategorizace tunelových technologických subsystémů

Technologické subsystémy tunelu můžeme zařadit do tří hlavních celků:

- **Dopravní systém** – zajišťuje kompletní dopravní funkce a je úzce vázán na další systémy řízení města či dálnic.
- **Bezpečnostní vybavení** – zahrnuje několik subsystémů zajišťujících bezpečnost pro uživatele tunelu a obsluhující personál.
- **Technická zařízení** – zabezpečuje funkčnost tunelu: systémy ventilace, napájení, osvětlení atd.

Jednotlivé subsystémy tunelu:

2.3.1.1 Dopravní systém

Řízení dopravy v tunelu je realizováno standardně pomocí aktorů a lokálním řídicím systémem, který ovládá tunel i jeho blízké okolí. Dále mohou tunel řídit i dispečeri, ale jen podle předem připravených scénářů. Intuitivní řízení se povoluje pouze ve výjimečných a nijak jinak neřešitelných případech.

V tunelu se používají klasické dopravní detektory jako na pozemní komunikaci. Přednost však dostávají neintrusivní typy senzorů jako mikrovlnné radary nebo videodetektory, které

jsou méně náročné na instalaci i následné spravování. Jako aktory jsou používána klasická světelná návěstidla, proměnné dopravní značky a pruhové signalizace. Vždy musí být umístěny v zorném poli řidiče a také je běžné jejich daleko častější opakování než na otevřené pozemní komunikaci. V tunelu je dbáno na více striktní dodržování dopravních předpisů, a i proto se málokterý moderní tunel obejde bez možnosti měření rychlostí projíždějících automobilů.

2.3.1.2 Bezpečnostní vybavení

Míra bezpečnosti pro účastníky silničního provozu je v moderních tunelech vyžadována na vysoké úrovni. K bezpečnosti přispívají stavební úpravy, jako jsou únikové cesty, odstavné zálivy a další. Kromě stavebních úprav tunel disponuje řadou bezpečnostních zařízení, která mají za cíl snížit riziko výskytu mimořádných událostí. Pokud událost nastane, zajistit maximální možnou ochranu účastníků a jejich majetku.

K typickým bezpečnostním zařízením patří:

- Elektropožární signalizace tvořená liniovým hlásičem s adresovatelnými mikrosenzory teploty;
- SOS boxy;
- CCTV (uzavřený přenos televizního signálu) v tunelu i v prostorách před tunelem;
- Hasicí a evakuační zařízení;
- Měření úsekové rychlosti, měření teploty před vjezdem apod.

2.3.1.3 Osvětlení

Funkce osvětlení tunelu je důležitou součástí pro zajištění co největší pohody řidiče při průjezdu tunelem. Snahou osvětlení je zajistit řidiči v průběhu celého průjezdu tunelem co nejmenší změny intenzity osvětlení a to v jakémkoli jeho místě a zároveň být energeticky co nejméně náročné. Největším problémem bývá hlavně za jasného počasí průjezd na rozhraní tunelu s otevřenou komunikací, kdy může dojít k výraznému oslnění řidiče a jeho chvilkové zrakové indispozice nebo naopak řidičův vjezd do tunelové „černé díry“.

Delší tunely jsou rozděleny do pěti pásem, jejichž intenzita osvětlení je dle mezinárodních standardů řízena podle vnějšího osvětlení, které je měřeno jasoměry.

2.3.1.4 Větrání

Subsystému větrání se budu více věnovat v další části práce.

2.3.1.5 Spojovací a dorozumívací zařízení

Poslech rozhlasových stanic uvnitř tunelu oživí jízdu řidiči a působí dobře na lidskou psychiku. Jako daleko důležitější je možnost přenosu dopravních informací přímo k řidiči, ať už pomocí klasického hlášení nebo pomocí RDS-TMC. Rádiová komunikace je stěžejní i pro zásah bezpečnostních složek v případě mimořádné události a navíc usnadňuje práci servisním týmům při údržbě tunelu. Měla by kromě jednosměrného spojení s řidičem umožňovat i duplexní spojení záchranných složek. Jako velmi důležité se prokázalo zavedení mobilní telefonní sítě dovnitř tunelu, kdy jsou sami cestující schopni ohlašovat dopravní excesy přímo z tunelu. Je proto nutné, aby tunely byly vybaveny signálem všech mobilních operátorů.

2.3.1.6 Elektrická napájecí soustava

Nutností pro většinu systémů, přístrojů a senzorů v tunelu je napájení elektrickou energií. Elektrická energie musí být přístupna při běžném provozu, ale i v případě mimořádné situace. Všechny tunely vyšší kategorie jsou napájeny ze dvou rozvodů energetické sítě a napětí a proud na sběrnicích je monitorován. Také jsou připraveny různé scénáře řešení celého systému v případě potřeby.

2.3.1.7 Řídicí systém

Řídicí systém je mozkiem celého dopravně-telematického systému, tedy tunelu. Veškeré procesy jsou centrálně řízeny a monitorovány. Na úrovni řízené technologie se v tunelu používají stanice PLC. Tyto stanice jsou spolehlivé a modulární (sestavitelné), což je pro řízení v tunelu ideální. Spolehlivost se zvyšuje také zálohováním velinů a zálohováním propojení mezi všemi stanicemi.

2.3.1.8 Pomocná technologická zařízení

Tunel obsahuje další technická zařízení, která mu pomáhají ve správné funkci. Může mezi ně patřit vodní hospodářství, které slouží k napájení požárních nádrží a odvodu vody z komunikace nebo například vyhřívání, které brání namrzání vody v odvodních kanálech či na vozovce.

2.3.2 Architektura tunelu

V současné době nemůžeme dopravní telematický systém tunelu, popsat jednoduše. Hledáme proto formu modelu, zjednodušení, které nám tunel popíše ve zjednodušené, pochopitelné

formě. Tato zjednodušená forma je pak modelem pro složitý tunelový systém. Pro model je žádoucí, aby byl homomorfní, aby se z modelu dal zpětně vytvořit daný tunelový systém.

[1]

Definice pojmu: Architektura tunelového systému (dle zdroje [1], s. 98):

„Architektura tunelového systému z hlediska dopravní telematiky popisuje na základě uživatelských potřeb tunel ve formě komplexního modelu tvořeného funkčním, informačním, fyzickým, organizačním a telekomunikačním pragmatickým modelem.“

3 Ventilace tunelů

Ventilace tunelu je důležitá hned ze dvou důvodů – ředění emisí a usměrňování kouře při požáru. Při běžném provozu je důležité, aby v tunelu nezůstávalo velké množství vzdušiny obsahující škodliviny. Je znám maximální podíl škodlivin ve vzduchu, který je ještě bezpečný pro člověka pracujícího v tunelu i pro řidiče, který tunelem projíždí. V těchto případech se koncentrace znečištění liší. Výměny vzdušiny v tunelu se docílí přirozeným nebo mechanickým způsobem, často však jejich kombinací.

Na přirozené výměně se podílí tzv. pístový efekt, který je způsoben pohybem automobilů uvnitř tunelu. Dále potom tlak vzduch působící na oba portály tunelu a teplotní či tlakový rozdíl mezi oběma portály (tzv. komínový efekt). Pístového efektu lze účinně využít u tunelů s jednosměrným provozem do délky cca 1 000 m, délka závisí na intenzitě dopravy. V tunelu s obousměrným provozem je pístový efekt minimální.

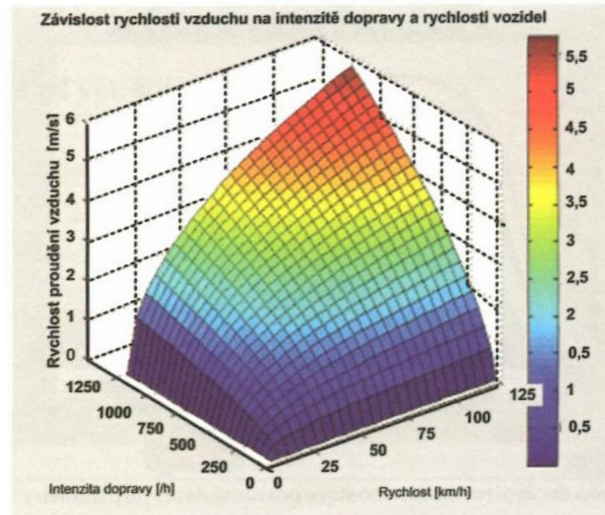
Mechanické větrání využívá ventilátory v tunelu i ventilátory umístěné mimo profil tunelové trouby. Dále využívá vzduchovody a klapky, které napomáhají vhodnému směřování vzduchu.

Druhou hlavní funkcí ventilace je správná funkce v případě požáru. V této situaci je snahou převážně mechanického větrání odvádět z dosahu člověka oheň a horký kouř se škodlivinami, a dále zajistit co nejlepší viditelnost v tunelu. [1]

3.1 Druhy ventilace

3.1.1 Přirozené větrání

Obměna vzduchu se realizuje díky rozdílům teploty a tlaku na konci tunelu a také díky pístovému efektu, který je způsoben projíždějícími vozidly. Vliv na přirozenou ventilaci má i odpor tunelu a převládající větry v okolí tunelu. Na Obr. 3 vidíme rozdílné hodnoty rychlosti vzduchu pro různé intenzity. Například pro rychlost 80 km/h a intenzitu 250 voz/h je rychlost vzduchu 0,5 – 1 m/s. Pro stejnou rychlost ale intenzitu 1 100 voz/h už rychlost vzduchu dosahuje hodnoty 4 m/s.



Obr. 3: Závislost rychlosti vzduchu na rychlosti vozidel a intenzitě dopravy [1]

3.1.1.1 Obousměrný provoz

Při obousměrném provozu tunelu vzniká největší riziko hromadění zplodin v centrální části tunelu, kdy hlavně při vyšších intenzitách provozu vykonává sloupec vzduchu kmitavé pohyby, a tak vzduch nikam neproudí. V oblasti u portálů se vzduch většinou mění rychle.

3.1.1.2 Jednosměrný provoz

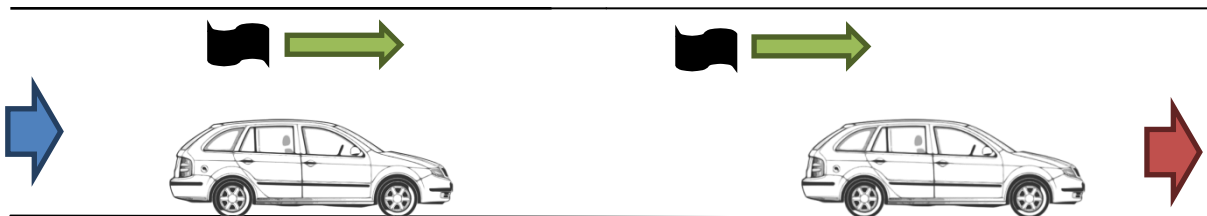
Jednosměrný pohyb vozidel uvnitř tunelu nutně vyvolá pístový efekt, díky kterému je vzdušina v tunelu samovolně ventilována i pro několikakilometrový tunel. Největší účinnost pístového efektu nastává při středně hustém provozu. Pokud je provoz řídký, může pístový efekt velmi negativně ovlivnit například rozdíly tlaků či teplot na obou koncích tunelu. Při hustém provozu je naopak riziko neúnosného zatížení škodlivinami z výfukových plynů.

3.1.1.3 Spojení přirozené a umělé ventilace

Vhodným spojením přirozené a umělé ventilace lze výrazně snížit energetické zatížení na provoz tunelu. Je však dokázáno, že nevhodnou činností umělé ventilace může být přirozená ventilace omezena. Například pokud budeme do jednosměrného tunelu přivádět umělou ventilací čerstvý vzduch, aniž bychom stejné množství zase odváděli, bude tak mít umělá ventilace negativní vliv.

3.1.2 Podélné větrání

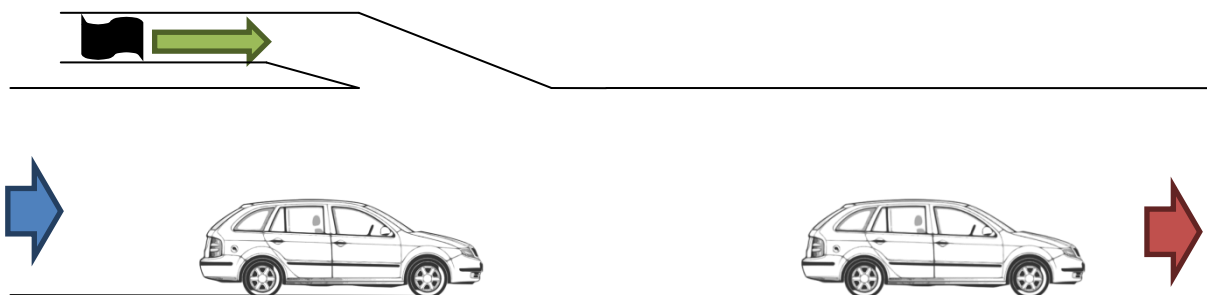
Podélné neboli longitudinální větrání proudí vzduch tunelem rovnoběžně s jeho osou. Samotné proudění je prováděno většinou pomocí proudových ventilátorů. V tomto případě bývá vzduch přiváděn i odváděn pouze koncovými portály Obr. 4.



Obr. 4: Podélné větrání s proudovými ventilátory, překresleno z [1]

Dalším řešením podélného větrání je možnost využití bodových injektorů, které působí z ventilačních šachet ve směru jízdy nebo z jedné ústřední šachty uprostřed tunelu, ze které proudí vzduch do obou portálů zároveň.

Jedno z možných řešení je tzv. Sacardo injektor (Obr. 5), který vhání vzduch ventilační šachtou do tunelu pod mírným úhlem a podporuje tak přirozené proudění.



Obr. 5: Podélné větrání se Sacardo injektorem, překresleno z [1]

Podélného větrání se využívá především u tunelů s jednosměrným provozem. Pro obousměrný tunel se podélného větrání používá výjimečně a jen v případech, že je zajištěno odvětrání tunelu při požáru vozidla.

V tomto typu větrání přibývá škodlivin v tunelu prakticky lineárně, kdy nejmenší koncentrace je u vstupního portálu a naopak největší koncentrace škodlivin je u portálu výstupního.

Rychlost proudění vzduchu uvnitř tunelu je omezena:

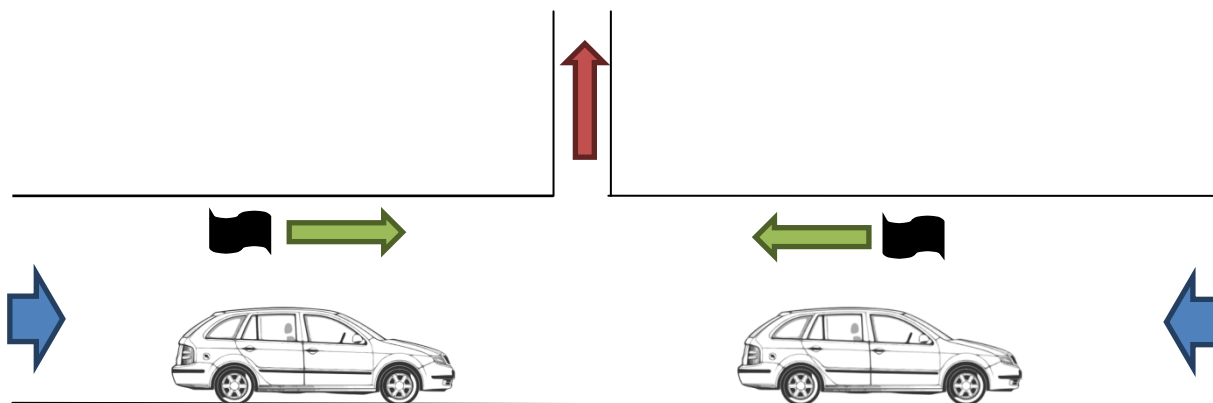
- U jednosměrného provozu na 10 m/s;
- U obousměrného provozu na 8 m/s.

Větší hodnoty vzduchu by totiž mohly omezovat pohyb osob tunelem nebo například i otevření dveří automobilu.

Profil tunelu je v případě podélného větrání vhodné volit větší, abychom omezili rychlost proudění vzduchu a zároveň docílili potřebného množství vyměněné vzdušiny. Čím větší profil tunelu, tím bývá přirozeně dražší výstavba tunelu. Dalším úskalím je fakt, že ventilátory

nesmějí zasahovat do světlého profilu pro projíždějící automobily a také by se kvůli nim neměl zvětšovat průřez tunelu.

Pro snížení koncentrace emisí je možné u tunelů vybudovat výfukový komín (Obr. 6), který odsává vzduch se škodlivinami. Výfukový komín je vhodné vybudovat pro tunel s jednosměrným provozem u koncového portálu a pro tunel s obousměrným provozem uprostřed tunelu.

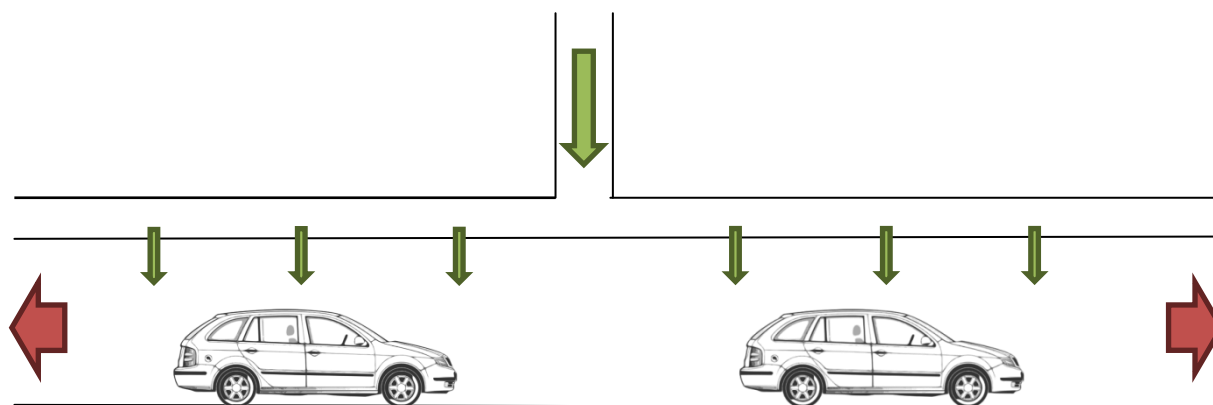


Obr. 6: Tunel s pomocným výfukovým komínem uprostřed tunelu, překresleno z [1]

3.1.3 Polopříčné větrání

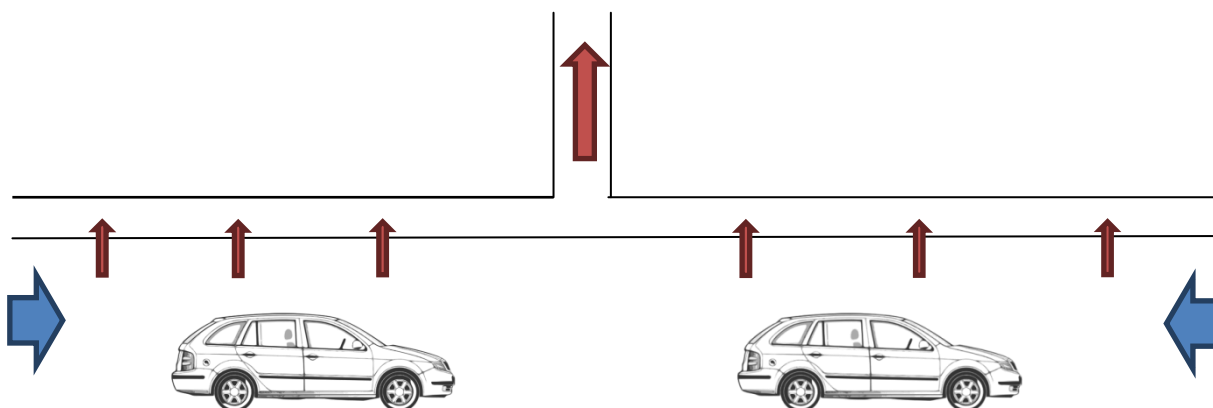
Při normálním režimu ventilace je v případě polopříčného (semi-transverse) větrání dvojitá možnost korigovat škodliviny v tunelu.

Nejprve je možné čerstvý vzduch přivádět ventilačním kanálem, který je oddělen od tunelové trouby a je podélný s osou tunelu. Z tohoto kanálu je vzduch vyústky vyfukován v pravidelných vzdálenostech do trouby tunelu a škodliviny potom odcházejí oběma portály (Obr. 7).



Obr. 7: Polopříčné větrání, čerstvý vzduch je přiváděn vyústky, překresleno z [1]

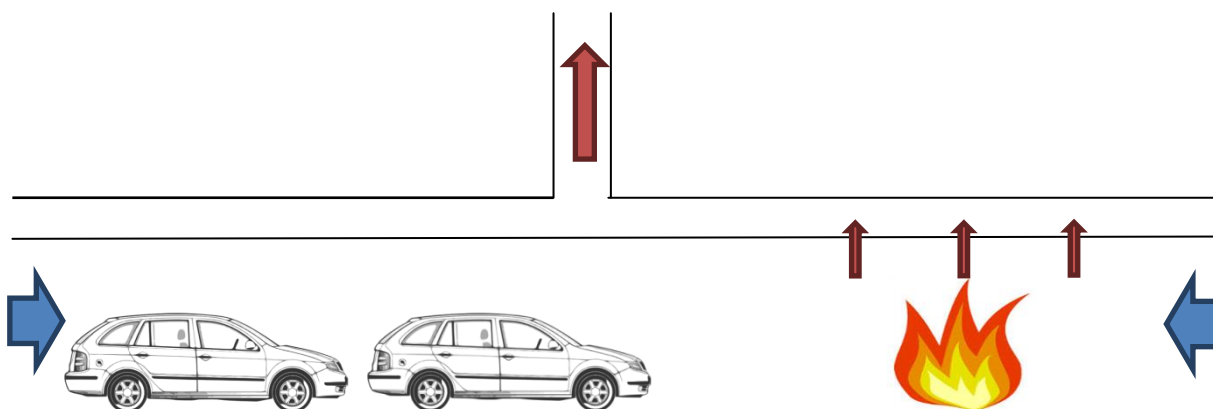
Za druhé je možné daný systém provozovat v podstatě naopak. Vyústky je odsáván škodlivý vzduch do odděleného ventilačního kanálu a čerstvý vzduch je naopak přiváděn oběma portály Obr. 8.



Obr. 8: Polopříčné větrání, čerstvý vzduch je přiváděn portály, překresleno z [1]

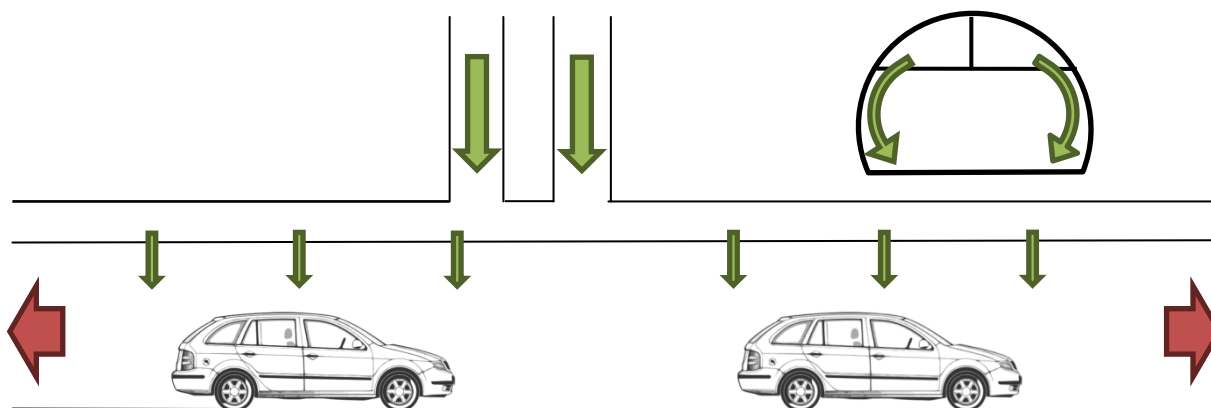
U delších tunelů se běžně ventilace dělí do několika úseků, které vzájemně spolupracují. Počet úseků je dán průřezem ventilačního kanálu, množstvím vzduchu potřebného k výměně a maximální možné rychlosti vzduchu uvnitř ventilačního kanálu, běžně méně než 30 m/s.

Při požáru je důležité odsání kouře a tepla v co největším množství a zároveň přívod čerstvého vzduchu. První systémy ventilace používaly k odsání kouře a tepla všechny vyústky, což se ukázalo jako chybné. Modernější řešení používají klapky, které se ovládají samostatně pomocí teplotních čidel, a tak je sání kouře a ohně orientováno do ohniska problému. Klapky mohou být ovládány také pomocí řídicího systému, který zajišťuje i spolupráci sacích ventilátorů vzduchotechniky. Na Obr. 9 jsou otevřeny tři klapky pro odsání kouře a tepla.



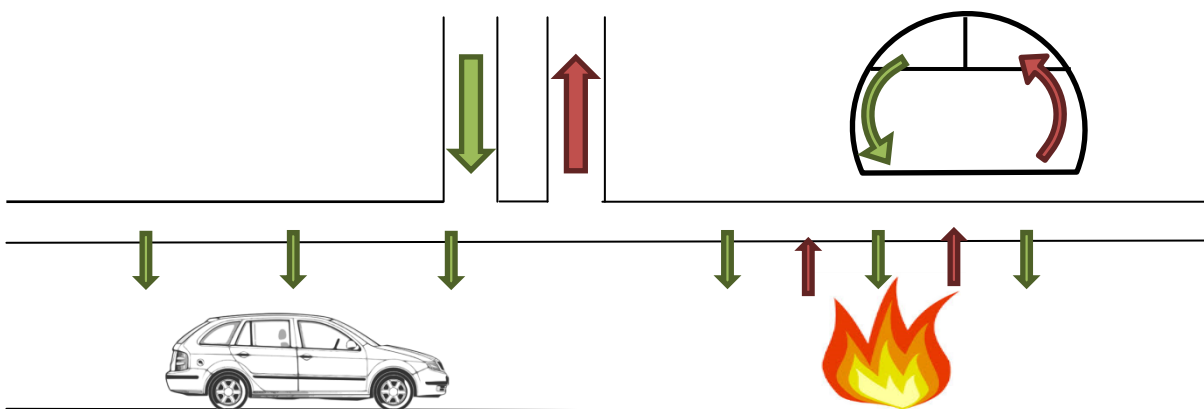
Obr. 9: Polopříčné větrání s otevřenými odsávacími klapkami, překresleno z [1]

Polopříčné-příčné větrání je dalším způsobem odvětrávání tunelu. Při normálním režimu ventilace je čerstvý vzduch přiváděn dvěma nezávislými kanály do tunelu a kontaminovaný vzduch proudí ven oběma portály (Obr. 10).



Obr. 10: Polopříčné-příčné větrání, překresleno z [1]

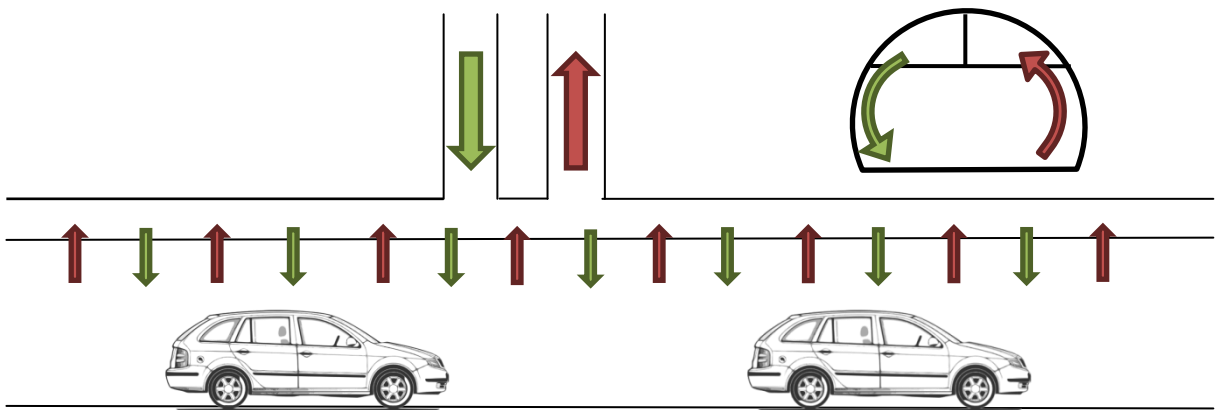
V případě požáru se proud vzduchu v jednom z kanálů obrátí a tento kanál odvádí kouř a teplo z tunelu, druhým kanálem je stále možné přivádět čerstvý vzduch (Obr. 11). Proces změny proudění vzduchu je kvůli jeho setrvačnosti zdlouhavý, a proto je rychlejší a výhodnější odsávat kouř z tunelu pomocí samostatného kanálu bez změny proudění vzduchu.



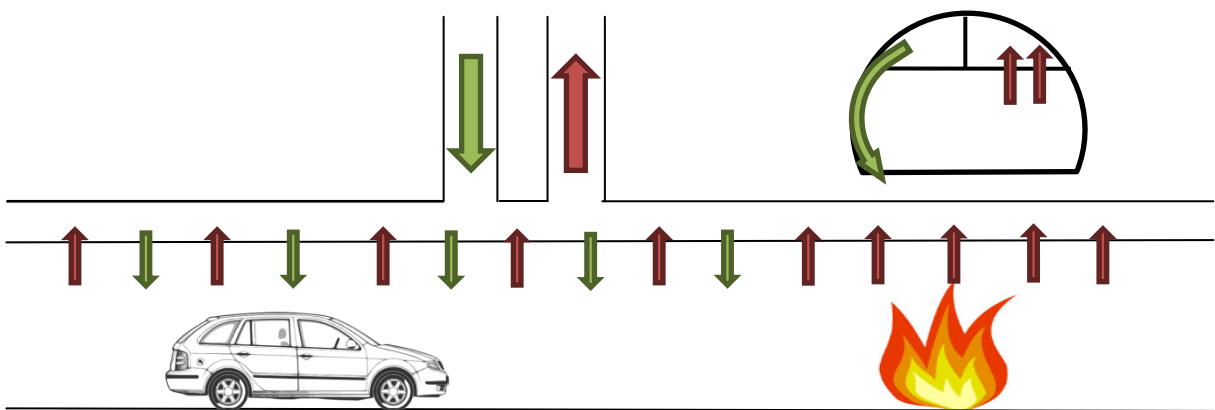
Obr. 11: Polopříčné-příčné větrání, překresleno z [1]

3.1.4 Příčné větrání

Příčné větrání je po celé délce tunelu tvořeno dvěma oddělenými kanály. V normálním režimu je jedním kanálem přiváděn čerstvý vzduch a vyústky je vyfukován do tunelové trouby, kontaminovaný vzduch je naopak odsáván nasávacími otvory, které také vedou do samostatného kanálu. Vyústky i nasávací otvory jsou běžně umístěny pod stropem jako na Obr. 12.



Obr. 12: Příčné větrání, překresleno z [1]



Obr. 13: Příčné větrání, překresleno z [1]

Při požáru přivádí ventilace čerstvý vzduch spodem mimo oblast požáru, v oblasti požáru je většinou vypnut a kouř a teplo je odsáváno bodově na jako na Obr. 13, podobně jako v případě polopříčného větrání.

3.2 Parametry větráku APW

APW (axiální přetlakové ventilátory) jsou určené pro podélné větrání v silničních tunelech, je možné je také použít pro tunely železniční. Jsou určeny pro pohánění vzdušiny bez brusných příměsí, a to v rozmezí teplot od -20 °C do 40 °C , což je pro prostředí ČR dostačující hodnota. Ventilátory jsou vyráběny tak, aby vydržely v provozu alespoň 60 minut při teplotě 300 °C .

Pro ventilátory s možností obráceného chodu platí tyto parametry:

- Objemový průtok $4,2$ až $44,9\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Statický tah 106 až $1\,971\text{ N}$;
- Vlhkost vzdušiny až 95% ;

- Průměr větráku 500 až 1 600 mm. [11]

3.3 Výpočet potřebného množství vzduchu k zředění škodlivin

Ventilace uvnitř tunelu musí zajistit potřebnou kvalitu vzduchu pro projíždějící řidiče a také pro pracovníky údržby tunelu. Ventilace také musí zajistit co nejlepší řízení kouře při požáru v tunelu. Při požáru předpokládáme, že ovlivní činnost ventilace pouze v oblasti několik desítek metrů od ohniska. Potřebujeme ale co nejlépe usměrnit kouř vyvolaný požárem, který by se při špatně řízené ventilaci mohl rozšířit po celé délce tunelu. Ventilaci můžeme řadit do tří režimů:

- Normální režim s měnícími se intenzitami dopravy;
- Režim, kdy se provádí údržba;
- Mimořádný režim při požáru.

3.3.1 Normální režim a režim při údržbě tunelu

Úkolem ventilace v normálním režimu je udržování viditelnosti na přijatelné úrovni a také zamezování větší koncentrace toxických plynů, jako jsou CO a NO_x, než je povolená mez. Viditelnost v tunelu snižují hlavně prachové a sazové částice z dieselových motorů. Maximální koncentrace veškerých nečistot ve vzduchu uvnitř tunelu je dána standardem [5] a nařízením vlády České republiky 178/2001 Sb. „Podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci“.

Tab. 5: Doby pobytu osob uvnitř tunelu dle PIARC

Pulz	Druh činnosti	Doba pobytu [hod]	Koncentrace CO [ppm]
110	Chůze	0,5	100
		1,0	60
		1,5	40
		2,0	35
135	Těžší práce	0,5	80
		1,0	50
		1,5	35
		2,0	30

Hodnota 1 ppm (Part Per Milion) = 1 částička v milionu = 1 cm³ zplodin v m³.

V **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** vidíme doby pobytu v závislosti na druhu činnosti a hodnotě koncentrace oxidu uhelnatého. Dané hodnoty udává mezinárodní silniční organizace

PIARC a odpovídají hodnotě 3 % vázání CO na hemoglobin v krvi, což může způsobovat malátnost, bolesti hlavy apod. Tunely se začínají větrat okolo hodnot 40 ppm a kritická hodnota pro uzavření tunelu je 120 ppm.

Veličinami pro výpočet intenzity ventilace jsou hlavně škodliviny, které se vyskytují ve výfukových plynech automobilů. Mezi závadné prvky patří CO, NO_x, nespálené uhlovodíky, oxid siřičitý, cyklické uhlovodíky, HC, olovo, saze a olejová mlha. Oxid uhličitý může způsobit až ztrátu vědomí a ostatní prvky tlumí světelný paprsek a vytváří tzv. opacitu neboli zakouřenost.

3.3.1.1 Zatížení ovzduší v tunelu emisemi CO od osobního automobilu

Výpočet ventilace je tedy přímo závislý na intenzitě dopravy a také na jejím složení. Emise oxidu uhelnatého průměrného **osobního automobilu**:

- s benzínovým motorem:

$$e_{ov,B} = (e_{0,co,B} * f_z * f_H)_{OV,B} \quad (1)$$

- s dieselovým motorem:

$$e_{ov,D} = (e_{0,co,D} * f_z * f_H)_{OV,D} \quad (2)$$

Emise CO od průměrného osobního automobilu (benzínový i dieselový motor dohromady):

$$e_{ov,co} = \left(\frac{100 - a_{ov,D}}{100} * e_{ov,B} \right) + \left(\frac{a_{ov,D}}{100} * e_{ov,D} \right) \quad (3)$$

Za proměnné se do vzorců dosazují předem dané hodnoty z tabulek podle druhu motoru:

$e_{0,co,B}$ základní emise CO pro OV_B [m³.h⁻¹.voz⁻¹]

$e_{0,co,D}$ základní emise CO pro OV_D [m³.h⁻¹.voz⁻¹]

f_z časový faktor (klesá s časem) [-]

f_H faktor nadmořské výšky (roste s výškou) [-]

$e_{ov,B}$ CO – emise průměrného OV s benzínovým motorem [m³.h⁻¹.voz⁻¹]

$e_{ov,D}$ CO – emise průměrného OV s dieselovým motorem [m³.h⁻¹.voz⁻¹]

$e_{ov,co}$ CO – emise průměrného OV s benzínovým a dieselovým motorem [m³.h⁻¹.voz⁻¹]

$a_{ov,D}$ podíl osobních vozidel s dieselovým motorem [%]

Základní emise e_0 pro benzínový motor závisí na sklonu vozovky a na rychlosti jízdy. Pro rychlost 80 km/h a sklon vozovky roven nule je $e_0 = 0,0555$. Časový faktor

f_z se postupně snižuje díky snižování emisí u moderních automobilů. Pro rok 2010 měl hodnotu 0,509 a pro rok 2020 bude mít hodnotu pouze 0,243. Faktor nadmořské výšky f_H výslednou hodnotu ovlivňuje opravdu výrazně. Pro výšku 700 m n. m. je roven 1 a pro výšku 2000 m n. m. je roven hodnotě 11,4. [5]

3.3.1.2 Zatížení ovzduší v tunelu emisemi CO od nákladního automobilu

Emise oxidu uhelnatého pro **nákladní automobil**:

$$e_{nv,co} = (e_{0,co,n} * f_z * f_H * f_M) \quad (4)$$

Za proměnné se do vzorců dosazují předem dané hodnoty z tabulek podle druhu motoru:

$e_{0,co,n}$ základní emise CO pro jedno NV [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]

f_z časový faktor [-]

f_H faktor nadmořské výšky [-]

f_M hmotnostní faktor [-]

$e_{nv,co}$ CO – emise průměrného nákladního vozidla [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]

Základní emise e_0 nákladního automobilu pro rychlost 80 km/h a sklon vozovky roven nule je $e_0 = 0,1050$. Časový faktor f_z pro rok 2010 měl hodnotu 0,613 a pro rok 2020 bude mít hodnotu pouze 0,273. Faktor nadmořské výšky f_H pro 700 m n. m. je roven 1 a pro výšku 2000 m n. m. je roven hodnotě 12,75.

Výpočet ventilace je závislý na celkovém součtu všech emisí od automobilů. Je tedy důležitá intenzita dopravy a také skladba dopravního proudu, protože nákladní automobil vykazuje vyšší hodnoty emisí než osobní automobil. Veškerý znečištěný vzduch uvnitř tunelu je potřeba „zředit“ na určitou, přijatelnou hodnotu. [5]

3.3.1.3 Ředění oxidu uhelnatého

Jak již bylo řečeno, je vzduch uvnitř tunelu znečišťován několika různými plyny. Pro dosažení hodnot zdravotně nezávadného ovzduší v tunelu a také pro dobrou viditelnost je potřeba tyto plyny ředit na přijatelnou hodnotu. Následný výpočet se zabývá ředěním emisí oxidu uhelnatého pro danou skladbu vozidel v tunelu délce L_T .

$$E_{co} = \left[\left(\frac{1 - \%NV}{100} \right) \frac{e_{ov,co}}{v_{ov}} + \frac{\%NV}{100} * \frac{e_{nv,co}}{v_{nv}} \right] * N * \frac{L_T}{3600} \quad (5)$$

kde:

E_{CO} množství emisí CO v tunelu [$m^3 \cdot s^{-1}$]
 $e_{ov,co}$ CO – emise průměrného osobního vozidla [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot ov^{-1}$]
 $e_{nv,co}$ CO – emise průměrného nákladního vozidla [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot ov^{-1}$]
 v_{ov} rychlost osobních vozidel [$km \cdot h^{-1}$]
 v_{nv} rychlost nákladních vozidel [$km \cdot h^{-1}$]
 L_T délka tunelu [km]
 N celkový počet vozidel [voz.h⁻¹]
 $\%NV$ podíl nákladních vozidel [%]

Pokud známe hodnotu emisí oxidu uhelnatého, které vyprodukují automobily při průjezdu tunelem, je třeba ještě dopočítat množství čerstvého vzduchu, kterým musíme emise naředit:

$$Q_{FL,co} = \frac{E_{co} * 10^6}{c_{lim,co}} \quad (6)$$

kde:

$Q_{FL,co}$ potřebné množství čerstvého vzduchu pro zředění CO [$m^3 \cdot s^{-1}$]
 E_{CO} množství emisí v tunelu [$m^3 \cdot s^{-1}$]
 $c_{lim,co}$ limitní koncentrace škodlivin oxidu uhelnatého daná normami [ppm]

3.3.1.4 Opacita – zplodiny z dieselových motorů

Opacita, zakouřenost, viditelnost v tunelu je snižována především kouřem z dieselových motorů. Světelný paprsek umožňující viditelnost tlumí právě výfukové plyny a prachové částice. Hodnota útlumu se stanoví:

$$E = E_0 * e^{-Kl} \quad (7)$$

kde:

E úroveň světelného paprsku po průchodu [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 E_0 vstupní úroveň paprsku [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 K koeficient opacity [$l \cdot m^{-1}$]
 l délka měřené trasy [m]

3.3.1.5 Opacita od osobního automobilu

Výpočet ventilace je tedy přímo závislý na intenzitě dopravy a také na jejím složení. Opacita průměrného **osobního automobilu**:

- s benzínovým motorem:

$$e_{ov,Z,B} = 0 \quad (8)$$

- s diesellovým motorem:

$$e_{ov,Z,D} = (e_{0,OP,D} * f_Z * f_H)_{OV,D} + q_{ar,ov} \quad (9)$$

kde:

- $e_{ov,Z,B}$ opacita OV s benzínovým motorem [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
 $e_{ov,Z,D}$ opacita OV s diesellovým motorem [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
 $e_{0,OP,D}$ základní hodnota opacity pro jedno OV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
 f_Z časový faktor [-]
 f_H faktor nadmořské výšky [-]
 $q_{ar,ov}$ dodatečný příspěvek opacity pro OV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]

3.3.1.6 Opacita od nákladního automobilu

Emise opacity pro **nákladní automobil**:

$$e_{nv,Z} = (e_{0,OP,n} * f_Z * f_H * f_M) + q_{ar,nv} \quad (10)$$

kde:

- $e_{nv,Z}$ opacita NV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
 $e_{0,OP,n}$ základní hodnota opacity pro jedno NV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
 f_Z časový faktor [-]
 f_H faktor nadmořské výšky [-]
 f_M hmotnostní faktor [-]
 $q_{ar,nv}$ dodatečný příspěvek opacity pro OV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]

3.3.1.7 Ředění opacity

Celková emise škodlivin snižující viditelnost:

$$E_Z = \left[\left(\frac{1 - \%NV}{100} \right) \frac{e_{ov,Z,D}}{v_{ov}} + \frac{\%NV}{100} * \frac{e_{nv,Z}}{v_{nv}} \right] * N * \frac{L_T}{3600} \quad (11)$$

kde:

- E_Z celková hodnota opacity [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 $e_{ov,Z,D}$ opacita OV [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]

$e_{nv,Z}$ opacita N [$m^2 \cdot h^{-1} \cdot voz^{-1}$]
 v_{ov} rychlost osobních vozidel [$km \cdot h^{-1}$]
 v_{nv} rychlost nákladních vozidel [$km \cdot h^{-1}$]
 L_T délka tunelu [km]
 $\%NV$ podíl nákladních vozidel [%]
 N celkový počet vozidel [$voz \cdot h^{-1}$]

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme zplodiny naředit, abychom omezili opacitu:

$$Q_{FL,Z} = \frac{E_Z}{k_{lim,Z}} \quad (12)$$

kde:

$k_{lim,Z}$ limitní koncentrace škodlivin oxidu uhelnatého daná normami [m^{-1}]
 $Q_{FL,Z}$ potřebné množství čerstvého vzduchu pro zředění opacity [$m^3 \cdot s^{-1}$]
 E_Z celková hodnota opacity [$m^2 \cdot s^{-1}$]

Potřebné celkové množství přivedeného čerstvého vzduchu pro zředění oxidu uhelnatého a snížení opacity se rovná maximu z těchto dvou hodnot, tedy:

$$Q_{FL} = \max(Q_{FL,CO}; Q_{FL,Z}) \quad (13)$$

kde:

Q_{FL} maximum potřebného množství čerstvého vzduchu pro zředění CO, opacity [$m^3 \cdot s^{-1}$]
 Z minimální potřebné hodnoty přivedeného vzduchu za 1 sekundu a známé velikosti příčného řezu tunelu dopočítáme minimální potřebnou rychlost vzduchu v tunelu:

$$v_t = \frac{\max(Q_{FL,CO}; Q_{FL,Z})}{F_T} \quad (14)$$

kde:

v_t rychlost vzduchu v tunelu [$m \cdot s^{-1}$]
 F_T příčný průřez tunelu [m^2]

Pokud tunelová ventilace není schopná dané množství čerstvého vzduchu do tunelu dodat, je nutností omezit intenzity uvnitř tunelu, ba dokonce tunel úplně uzavřít. [1]

3.3.2 Mimořádný režim při požáru v tunelu

Ve většině případů při dimenzování ventilace tunelu je stěžejní situace při požáru. Normální režim ventilace tunelu bývá většinou snadněji udržitelný. Jako základ pro dimenzování se bere požár jednoho nákladního vozidla s tepelným výkonem 20 MW a množstvím vyvíjeného kouře $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud by v tunelu vybuchla cisterna plná benzínu (nejhorší případ), je velmi pravděpodobné, že by ani zásahové jednotky nemohly kvůli velkému nebezpečí zakročít, proto se ventilace dimenzuje na požár klasického nákladního vozidla. V následující tabulce jsou uvedeny standardní tepelné výkony a množství kouře pro jednotlivé situace:

Tab. 6: Standardizované hodnoty tepelného výkonu a množství zplodin

Druh automobilu	Tepelný výkon [MW]	Množství zplodin [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
1 osobní vůz	5	20
2-3 osobní vozy nebo osobní mikrobus	8 – 15	30
1 dodávkový vůz nebo malý městský autobus	15 – 20	50
1 autobus nebo městský autobus	20 – 30	60 – 80
1 těžký nákladní vůz – nejhorší případ	100	200
1 cisterna s benzínem – nejhorší případ	200 – 300	300

Po vypuknutí požáru je důležité držet kouř co nejdále od lidí, aby měli čas a prostor tunel opustit.

V případě podélné ventilace je žádoucí, aby proudění vzduchu probíhalo ve směru jízdy tunelem – uvažujeme, že vozidla před požárem mohla samovolně opustit tunel. Osoby před požárem naopak unikají proti směru jízdy, a tak je důležité kouř vyfukovat právě k výjezdu z tunelu.

Požár má vliv i na přirozené proudění vzduchu tunelem – vzniká vztlak, který závisí na rozdílu teplot uvnitř a vně tunelu. Při výpočtu síly ventilace je třeba brát v úvahu i další přirozené jevy, jako: protivítr u portálů, průměrný barometrický tlak nebo střední hodnotu teploty vzduchu vně tunelu. Rychlost proudění v daný okamžik závisí také na tlakových ztrátách v tunelu, součiniteli tření, množství vozidel v tunelu, atd. Všechny tyto okrajové podmínky velmi ovlivňují konečnou vypočtenou hodnotu. Ve zdroji [5] se uvádí, že při požáru o tepelném výkonu 30 MW je nutné počítat při jistých okrajových podmínkách s rychlostí vzduchu $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

V případě polopříčné a příčné ventilace se kouř a teplo z tunelu odsává pomocí kouřových klapek umístěných většinou u stropu tunelu. Klapky by měly v dvoupruhovém tunelu odsávat vzduch o objemu $120 - 150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v délce tunelu $50 - 100$ metrů a zároveň by rychlost odsávaného vzduchu v okolí klapek neměla přesáhnout hodnotu $12 - 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.4 Výpočet rychlosti vzduchu v tunelu

Kapitola 3.3 byla zaměřena na matematické vypočítání škodlivin ve vzduchu uvnitř tunelu v závislosti na skladbě dopravního proudu, na jeho intenzitě a také rychlosti dopravního proudu projíždějícího tunelem. Výpočty lze využít pro dimenzování ventilace tunelu, což také ovlivňují fyzikální principy, které budou rozebrány v této kapitole.

Na proudění vzduchu v tunelu se podílí hned několik faktorů. Od faktorů, které jsou lidmi těžko ovlivnitelné, jako rozdílné tlaky a teploty mezi portály nebo síla větru na portál tunelu, po faktory, které člověk ovlivňuje. Mezi člověkem ovlivnitelné faktory patří především odpor tunelu, který je dán jeho charakterem, a píستový efekt, který v závislosti na intenzitě dopravy a rychlosti dopravního proudu způsobují sama vozidla projíždějící tunelem. Výsledný směr a rychlost proudění vzduchu v tunelu lze vypočítat z bilanční rovnice sil na něj působících. Výsledek těchto sil musí být v rovnováze. Rychlost proudění vzduchu v tunelu je omezena minimální rychlostí $1,5 \text{ m/s}$ a maximální přijatelnou rychlostí 10 m/s , pokud jsou tyto hodnoty překročeny, je proveden zásah v řízení ventilačního systému tunelu. Dalším omezením je minimální rychlost vzduchu potřebná ke zředění emisí CO a opacity. [5]

3.4.1 Síly ovlivňující pohyb vzdušiny v tunelu:

V následujícím vztahu závisejí směry sil na podmínkách daného tunelu.

$$Q_{voz} \pm Q_{vitr} \pm Q_{kom} - Q_{tun} = 0 \quad (15)$$

3.4.1.1 Píستový efekt vozidel:

$$Q_{voz} = (M_{ov} * (c_w * F)_{ov}) * (v_{ov} - v_t)^2 + (M_{nv} * (c_w * F)_{nv}) * (v_{nv} - v_t)^2 \quad (16)$$

3.4.1.2 Síla větru působící na portál tunelu

$$Q_{vitr} = P_{vitr} * F_T \quad (17)$$

3.4.1.3 Komínový efekt

$$Q_{kom} = F_T * \xi_T * \frac{\rho}{2} v_t^2 \quad (18)$$

3.4.1.4 Odpor tunelové trouby

$$Q_{tun} = F_T * \frac{\rho}{2} * \lambda * \frac{L_T}{D} * v_t^2 \quad (19)$$

3.4.1.5 Další potřebné vztahy:

$$\xi_T = \xi_e + \xi_a + \lambda * \frac{L_T}{D} \quad (20)$$

$$D = \frac{4 * F_T}{U} \quad (21)$$

kde:

Q_{voz} pístový efekt [N]

$Q_{vítr}$ síla větru působící na portál [N]

Q_{kom} komínový efekt [N]

Q_{tun} odpor tunelové trouby [N]

M_{ov} počet OV v tunelu v jednom směru [-]

$(c_w * F)_{ov}$ aerodynamický součinitel vynásobený čelní plochou OV [m²]

v_{ov} rychlost OV v tunelu [m.s⁻¹]

v_t rychlost vzduchu v tunelu [m.s⁻¹]

M_{nv} počet NV v tunelu v jednom směru [-]

$(c_w * F)_{nv}$ aerodynamický součinitel vynásobený čelní plochou NV [m²]

v_{nv} rychlost NV v tunelu [m.s⁻¹]

$P_{vítr}$ tlak větru na portál tunelu [Pa]

F_T příčný průřez tunelu [m²]

ξ_T vřazené odpory [-]

ρ hustota vzduchu [kg.m⁻³]

λ součinitel tření tunelové trouby [-]

L_T délka tunelu [m]

D hydraulický průměr tunelu [m]

ξ_e součinitel tlakové ztráty na vstupu do tunelu [-]

ξ_a součinitel tlakové ztráty na výstupu z tunelu [-]

U obvod příčného řezu tunelu [m]

3.5 Moderní metody v navrhování ventilačního systému

Moderní metody se snaží odstranit nedostatky dosavadních postupů navrhování a řízení ventilace tunelů. Prvním nedostatkem je, že při dimenzování ventilace pomocí výpočtu uvedeného v kapitole 3.3 jsou vstupní intenzity brány z pevně dané denní variace dopravy. Ventilační systém je navrhovaný většinou na maximální hodinovou intenzitu dopravy, což ale neodpovídá proměnné denní intenzitě dopravního proudu. Například pro hodinovou intenzitu dopravy ve dvoupruhovém tunelu 1 900 vozidel za hodinu je průměrný odstup vozidel asi 10 metrů. To však neodpovídá realitě, kdy se nám auta shlukují. Běžně se stává, že projede několik desítek vozidel za sebou a potom pár minut neprojede vozidlo žádné, to ale statický model neřeší.

Druhou hlavní nevýhodou je způsob měření koncentrace oxidu uhelnatého a opacity. Senzory pro měření se používají velmi drahé a jsou umístěny u portálů tunelu, někdy i uprostřed tunelu. Senzory pak zachycují pouze škodliviny v bezprostřední blízkosti nebo zachytí škodliviny s časovým odstupem vlivem pístového efektu. Například kolonu nebo zastavení vozidel je těmito senzory nemožné zaznamenat, a pokud vůbec, tak s minimálním časovým prodloužením v případě, že se nehoda nestane přímo pod senzorem. [1]

3.5.1 Odhadování množství škodlivin z dopravních dat

Díky projektu OPTUN, který se také zabýval problematikou odhadu škodlivin uvnitř tunelu pomocí dopravních dat, můžeme dojít k závěru, že parametry jako rozdíl tlaků a teploty uvnitř a vně tunelu jsou zanedbatelné. Na přesnosti odhadů koncentrace škodlivin mají největší podíl parametry: intenzita osobních a nákladních vozidel, a také jejich rychlost.

Při porovnání dvou matematických metod, mezi které patřily rozhodovací stromy a mnohočetná regrese, k přesnějším výsledkům vedla jednodušší regrese, díky které byl výpočet škodlivin poměrně jednoduchý, což umožňuje použití v praxi.

Na příkladu níže vidíme odhad množství oxidu uhelnatého pro aktuální čas a pro predikci za 15 minut. [1]

$$CO_{akt} = 1,2458 + 0,1610v + 0,1130q_{ov} - 0,5229q_{nv} \quad (22)$$

$$CO_{+15} = 1,4043 + 0,1704v + 0,1019q_{ov} - 0,6338q_{nv} \quad (23)$$

kde:

CO_{akt} aktuální množství škodlivin CO [$m^3 \cdot s^{-1}$]

CO_{+15} množství škodlivin CO za 15 minut [$m^3 \cdot s^{-1}$]

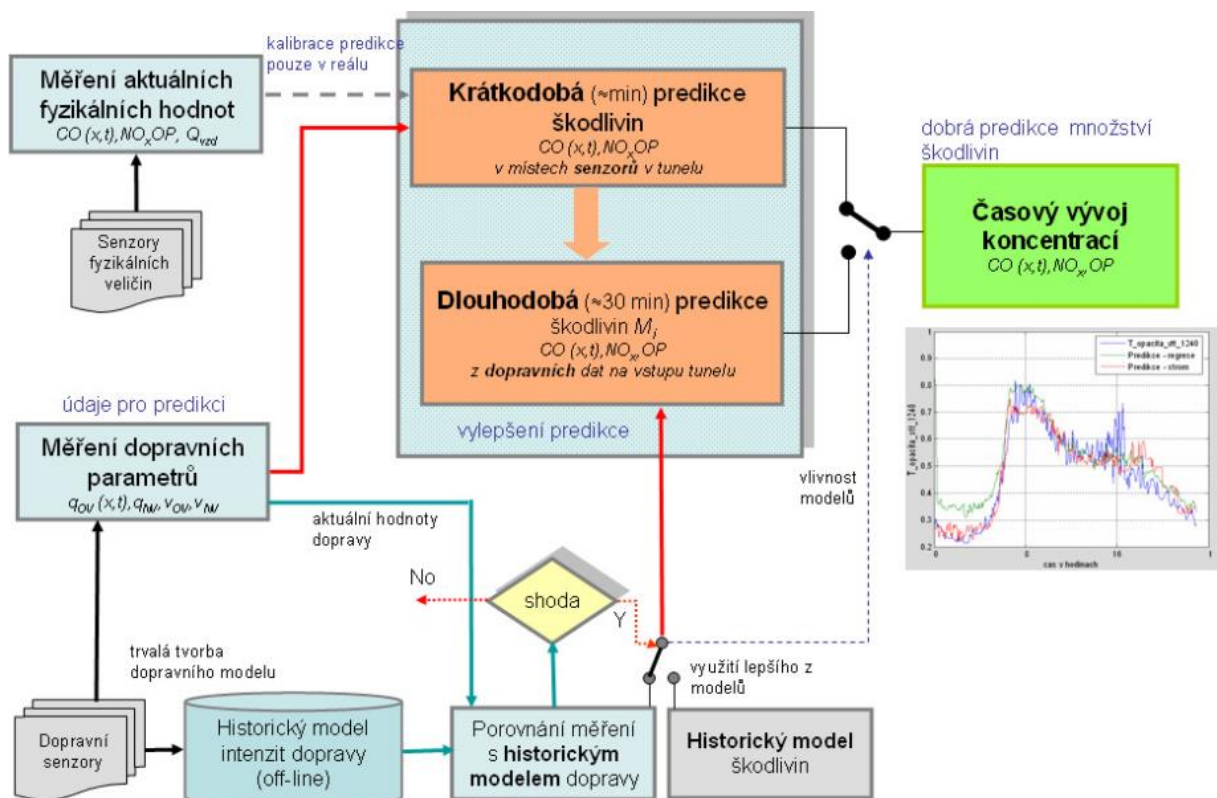
v rychlost vozidel v tunelu [$km \cdot h^{-1}$]

q_{ov} intenzita OV [$voz \cdot h^{-1}$]

q_{nv} intenzita NV [$voz \cdot h^{-1}$]

3.5.1.1 Hybridní model pro odhadování škodlivin

Hybridním modelem se v této souvislosti myslí nadstavba v podobě porovnání aktuálních dat s historickým modelem pro jednotlivé doby a dny v týdnu. Pokud aktuální data ze senzorů udávají podobný vývoj jako historický model, lze predikovat blízkou budoucnost pomocí historického modelu a je možné využít historický model dopravy a jemu odpovídající historický model škodlivin k aktuálnímu řízení ventilace tunelu. [9]



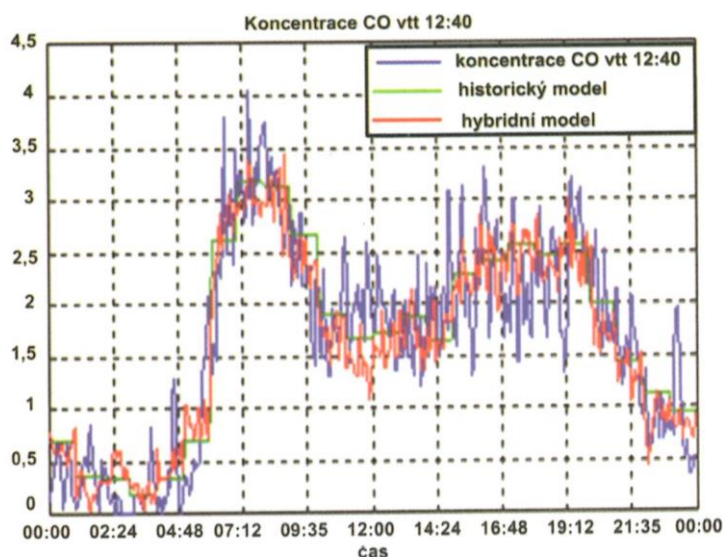
Obr. 14: Hybridní model pro odhadování škodlivin [9]

Kvalita predikce jednotlivých modelů je otázkou samotného vyladění modelu pro dané případy. Důležité je, že pomocí regresního vztahu můžeme predikovat pomocí vstupních

veličin dopravy koncentrace škodlivin pro daný časový úsek a následně podle této predikce řídit vzduchotechniku.

Na Obr. 15 vidíme reálné hodnoty naměřené při projektu OPTUN v tunelu Mrázovka odpovídající dennímu průběhu dopravy. Na grafu je patrný značný rozptyl daný fluktuacemi vozidel, a tak i vzdušiny. Historický model (zeleně) data průměruje.

Nejdůležitějším konstatováním vyplývajícím z Obr. 15 je minimální rozdíl mezi matematicky odhadovanou hodnotou koncentrace oxidu uhelnatého měřenou z dopravních dat a reálným měřením oxidu uhelnatého pomocí senzorů. Matematický model je tedy použitelný v praxi.



Obr. 15: Výsledky odhadů hybridního modelu a reálného měření oxidu uhelnatého [1]

3.5.2 Modelování jízdy vozidel v tunelu

Testování vzduchotechniky řízené pomocí dopravních dat musí vycházet i z kvalitního modelu dopravy. V rámci projektu OPTUN zvolili fiktivní tunel délkou odpovídající Strahovskému tunelu, který vymodelovali v programu AIMSUN. Tunel byl v simulačním modelu rozdělen na úseky s délkou 10 m, kdy v každém z úseků byly monitorovány dopravní parametry a koncentrace škodlivin.

Pro modelování dopravních dat byly vytvořeny dvě skupiny vozidel: osobní a nákladní. Pro obě skupiny bylo nutno definovat následující parametry: délka vozidla, šířka vozidla, maximální rychlost, maximální zrychlení, normální brzdění, dodržování povolené rychlosti, minimální mezery mezi vozidly, trpělivost při dávání přednosti v jízdě.

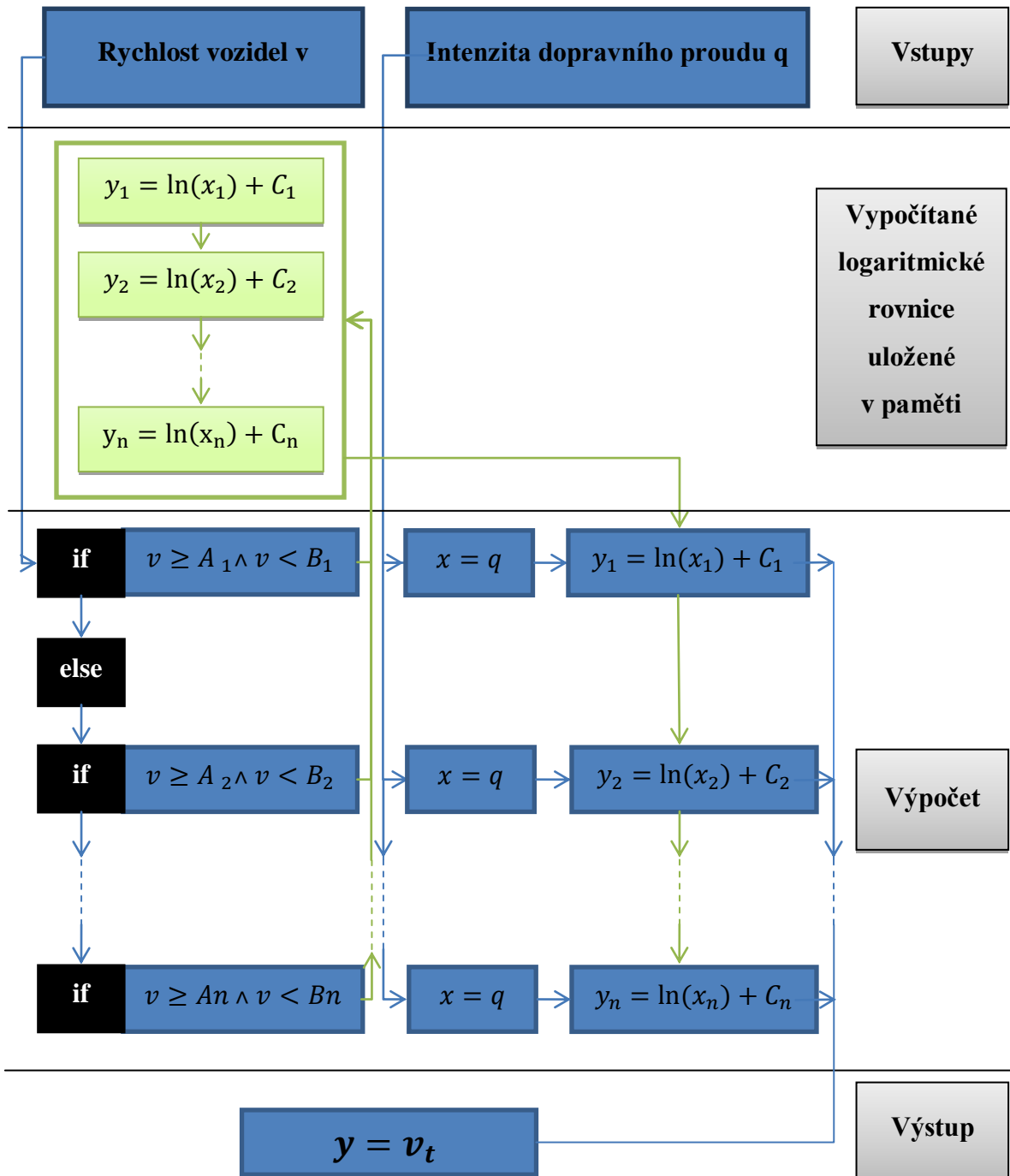
Také bylo třeba definovat průměrné spotřeby paliva pro zrychlení, zpomalení, rychlosti 90 km/h a 120 km/h, a také pro jízdu na neutrál.

Dále byly definovány dle [4] hodnoty CO, NO_x, a HC pro různá zrychlení, zpomalení a pro rychlosti od 5 km/h do 120 km/h.

V průběhu simulace byla měřena následující dopravní data: intenzita dopravy, hustota vozidel, počet zastavení, množství spotřebovaného paliva, množství vypouštěných exhalací (CO, NO_x, HC) a průměrná rychlost. Pro co největší věrohodnost výsledků simulace byly nastiňovány různé dopravní situace od nerovnoměrného rozdělení dopravního proudu až po dopravní nehodu. [1]

4 Návrh ventilace tunelu

Ventilace tunelu je navržena podle moderních metod, uvedených v kapitole 3.5. Návrh je tvořen se záměrem on-line řízení v závislosti na vstupních datech rychlosti a intenzity dopravního proudu.



Obr. 16: Návrh algoritmu ventilace tunelu

Na Obr. 16 je uveden schematický postup návrhu ventilace. Vstupní hodnota rychlosti dopravního proudu je nejprve pomocí porovnání vložena do příslušného intervalu.

Dle zařazení rychlosti dopravního proudu do jednoho z intervalů je zvolena příslušná logaritmická rovnice, do které je za neznámou proměnou vložena intenzita dopravního proudu. Logaritmická podoba modelu plyne z analýzy veličin, uvedená v kapitole 4.3. Výsledek této logaritmické rovnice je rychlost proudění vzduchu v tunelu, což je předmětem zájmu.

V závislosti na výsledné rychlosti proudění vzduchu v tunelu je možné ovládat systém větrání z operátorského pultu, viz Obr. 19, kde jsou indikovány všechny potřebné informace. V kapitole 6 jsou definovány jednotlivé možné nouzové režimy, které mohou, při nesprávném fungování některé části dopravně-telematického systému, nastat. V případě běžného, bezporuchového fungování tunelu je možné ventilační systém řídit automaticky, pokud však program nedostává reálná vstupní dopravní data, informuje operátora varovným signálem a ten může zvolit manuální řízení ventilace tunelu.

Pro reálný návrh systému ventilace se skutečnými vstupními parametry i dopravními daty byl využit dálniční tunel Klimkovice, který je blíže specifikován v následující kapitole.

4.1 Charakteristika tunelu

V navržené metodě vycházím z charakteristik tunelu. Zvolený tunel Klimkovice se nachází na dálnici D1 v Moravskoslezském kraji. Nalezneme ho na úseku mezi Bílovcem a Ostravou-Rudná, na 347. kilometru. Jedná se o druhý nejdelší dálniční tunel České republiky. Byl vybudován z důvodu ochrany životního prostředí a minimalizace vlivu dopravy na obec Klimkovice. Tunel je tvořen dvěma tubusy se dvěma jízdními pruhy pro každý směr. Maximální projektovaná rychlost tunelu je 110 km/h, ale v současné době je omezena na 80 km/h. Výstavba trvala čtyři roky a stála přibližně 2,5 mld. Kč. Tunel je dle TP 98 řazen do nejvyšší bezpečnostní kategorie.

4.1.1 Parametry tunelu využité pro výpočet

Tab. 7: Parametry Klimkovického tunelu použité pro výpočty

Délka tunelu	L_T	1,1 km
Příčný průřez tunelu	F_T	72,55 m ²
Nadmožská výška	MM	263 m n. m.
Sklon vozovky	S	0,6 %
Obvod příčného řezu tunelu	U	33 m
Hydraulický průměr tunelu	D	8,47 m
Rok dimenzování ventilačního systému	R	2014
Denní intenzita pro jeden směr	q_{den}	8 900 voz/den
Podíl osobních vozidel s dieselovým motorem	$a_{ov,D}$	29,66 %
Podíl osobních vozidel	%OV	76 %
Podíl nákladních vozidel s hmotností 10 t	$a_{nv,10}$	6 %
Podíl nákladních vozidel s hmotností 20 t	$a_{nv,20}$	6 %
Podíl nákladních vozidel s hmotností 30 t	$a_{nv,30}$	12 %
Podíl nákladních vozidel dohromady	a_{nv}	24 %

V Tab. 7 je intenzita dopravy a podíl nákladních vozidel čerpán z dat při celostátním sčítání dopravy v roce 2012 a je k nalezení na [8]. Maximální hodinovou intenzitu 8 % jsem určil z denní intenzity dopravy podle [6], kdy se nachází především mezi 8. – 9. hodinou ranní a také okolo 17. hodiny večerní. Podíl osobních vozidel s naftovým motorem byl v roce 2000 podle [8] odhadován na hodnotu 13,6 % pro rok 2015 v České republice, hodnota udávaná Ministerstvem dopravy České republiky k datu 30. 6. 2012 je však 29,66 %. Díky kamerovému systému s měřením úsekové rychlosti v tunelu můžeme počítat s dodržováním nejvyšší dovolené rychlosti 80 km/h u většiny projíždějících automobilů.

4.2 Výpočet zředění CO a opacity

Pro výpočet škodlivých emisí jsem zvolil čtyři situace, které by mohly v tunelu nastat.

4.2.1 Minimální intenzita

Podle [6] je minimální intenzita dopravy okolo 3. hodiny ranní, kdy dosahuje pouze 0,3 % z celkové denní intenzity. Pro tento čas budu uvažovat nejvyšší dovolenou rychlost pro osobní i nákladní dopravu.

Tab. 8: Dopravní parametry Klimkovického tunelu pro minimální intenzitu

Hodinová intenzita dopravy v jednom směru	q_{hod}	26,7 voz.h ⁻¹
Intenzita OV za hodinu	q_{ov}	20,3 voz.h ⁻¹
Intenzita NV za hodinu	q_{nv}	6,4 voz.h ⁻¹
Rychlost osobních vozidel	v_{ov}	80 km/h
Rychlost nákladních vozidel	v_{nv}	80 km/h

4.2.1.1 Zředění CO

Koncentrace CO osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (1) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,B} = 0,0140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO osobního automobilu s dieselovým motorem vyjde dle vztahu (2) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,D} = 0,0086 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO průměrného osobního automobilu vyjde dle vztahu (3) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,co} = 0,0124 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO nákladního automobilu vyjde dle vztahu (4) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,co} = 0,0491 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (5) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_{co} = 0,0000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci CO naředit, spočítáme ze vztahu (6) a vychází $Q_{FL,co} = 0,0309 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.1.2 Zředění opacity

Koncentrace opacity osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (8) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,B} = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity osobního automobilu s dieselovým motorem vyjde dle vztahu (9) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,D} = 7,2466 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity nákladního automobilu vyjde dle vztahu (10) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,Z} = 41,6532 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (11) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_Z = 0,0016 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci opacity naředit, spočítáme ze vztahu (12) a vychází $Q_{FL,Z} = 0,3162 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.1.3 Výsledná rychlost vzduchu

Potřebné celkové množství přivedeného čerstvého vzduchu pro zředění oxidu uhelnatého a snížení opacity se rovná podle vztahu (13) $Q_{FL} = 0,3162 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Minimální rychlost vzduchu pro zředění CO a opacity je podle (14) $v_t = 0,0044 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.2 Maximální intenzita dopravy ze současných sběrů dat

Podle [6] je špičkovou hodinovou intenzitou na dálničních úsecích 8 % z celkové denní intenzity. Tuto hodnotu intenzity dopravní proud nabývá v ranní a odpolední špičce.

Tab. 9: Dopravní parametry Klimkovického tunelu pro maximální reálnou intenzitu

Hodinová intenzita dopravy v jednom směru	q_{hod}	712 voz.h ⁻¹
Intenzita OV za hodinu	q_{ov}	541 voz.h ⁻¹
Intenzita NV za hodinu	q_{nv}	171 voz.h ⁻¹
Rychlost osobních vozidel	v_{ov}	80 km/h
Rychlost nákladních vozidel	v_{nv}	80 km/h

4.2.2.1 Zředění CO

Koncentrace CO osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (1) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,B} = 0,0140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO osobního automobilu s dieselovým motorem vyjde dle vztahu (2) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,D} = 0,0086 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO průměrného osobního automobilu vyjde dle vztahu (3) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,co} = 0,0124 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO nákladního automobilu vyjde dle vztahu (4) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,co} = 0,0491 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (5) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_{co} = 0,0001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci CO naředit, spočítáme ze vztahu (6) a vychází $Q_{FL,CO} = 0,8246 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.2.2 Zředění opacity

Koncentrace opacity osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (8) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,B} = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity osobního automobilu s dieselovým motorem vyjde dle vztahu (9) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,D} = 7,2466 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity nákladního automobilu vyjde dle vztahu (10) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,Z} = 41,6532 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (11) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_Z = 0,0422 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci opacity naředit, spočítáme ze vztahu (12) a vychází $Q_{FL,Z} = 8,4325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.2.3 Výsledná rychlost vzduchu

Potřebné celkové množství přivedeného čerstvého vzduchu pro zředění oxidu uhelnatého a snížení opacity se rovná podle vztahu (13) $Q_{FL} = 8,4325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Minimální rychlost vzduchu pro zředění CO a opacity je podle (14) $v_t = 0,1162 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.3 Maximální možná intenzita dopravy

Dle [7] je maximální možná intenzita jednoho pruhu 2 900 voz/h při návrhové rychlosti 80 km/h, podélném sklonu vozovky menším než 2 % a podílu pomalých vozidel 25 %.

Tab. 10: Dopravní parametry Klimkovického tunelu pro maximální možnou intenzitu

Hodinová intenzita dopravy v jednom směru	q_{hod}	5800 voz.h ⁻¹
Intenzita OV za hodinu	q_{ov}	3 040 voz.h ⁻¹
Intenzita NV za hodinu	q_{nv}	960 voz.h ⁻¹
Rychlost osobních vozidel	v_{ov}	80 km/h
Rychlost nákladních vozidel	v_{nv}	80 km/h

4.2.3.1 Zředění CO

Koncentrace CO osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (1) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,B} = 0,0140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO osobního automobilu s diesellovým motorem vyjde dle vztahu (2) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,D} = 0,0086 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO průměrného osobního automobilu vyjde dle vztahu (3) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,co} = 0,0124 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO nákladního automobilu vyjde dle vztahu (4) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,co} = 0,0491 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (5) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_{co} = 0,0005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci CO naředit, spočítáme ze vztahu (6) a vychází $Q_{FL,co} = 6,7171 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.3.2 Zředění opacity

Koncentrace opacity osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (8) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,B} = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity osobního automobilu s diesellovým motorem vyjde dle vztahu (9) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,D} = 7,2466 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity nákladního automobilu vyjde dle vztahu (10) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,Z} = 41,6532 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (11) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_Z = 0,3435 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci opacity naředit, spočítáme ze vztahu (12) a vychází $Q_{FL,Z} = 68,6920 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.3.3 Výsledná rychlost vzduchu

Potřebné celkové množství přivedeného čerstvého vzduchu pro zředění oxidu uhelnatého a snížení opacity se rovná podle vztahu (13) $Q_{FL} = 69,6920 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Minimální rychlost vzduchu pro zředění CO a opacity je podle (14) $v_t = 0,9468 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.4 Kongesce

Maximální obsazenost 1,1 km dlouhého dvoupruhového tunelu pro rychlost 5 km/h je 260 vozidel. Tato hodnota byla vypočtena z veličin v Tab. 11 a z daných procentních podílů pro jednotlivé skupiny vozidel, které jsou k nalezení v tabulce Tab. 7.

Tab. 11: Uvažované délky vozidel včetně mezer

Osobní vozidlo	L_{ov}	6 m
Nákladní vozidlo o hmotnosti 10 t	$L_{nv,10}$	10 m
Nákladní vozidlo o hmotnosti 20 t	$L_{nv,20}$	15 m
Nákladní vozidlo o hmotnosti 30 t	$L_{nv,30}$	20 m

Tab. 12: Dopravní parametry Klimkovického tunelu pro kongesci

Hodinová intenzita dopravy v jednom směru	q_{hod}	1 200 voz.h ⁻¹
Intenzita OV za hodinu	q_{ov}	888 voz.h ⁻¹
Intenzita NV za hodinu	q_{nv}	312 voz.h ⁻¹
Rychlost osobních vozidel	v_{ov}	5 km/h
Rychlost nákladních vozidel	v_{nv}	5 km/h

4.2.4.1 Zředění CO

Koncentrace CO osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (1) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,B} = 0,0114 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO osobního automobilu s dieselovým motorem vyjde dle vztahu (2) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,D} = 0,0032 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO průměrného osobního automobilu vyjde dle vztahu (3) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,co} = 0,0089 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO nákladního automobilu vyjde dle vztahu (4) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,co} = 0,0242 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace CO pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (5) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_{co} = 0,0009 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci CO naředit, spočítáme ze vztahu (6) a vychází $Q_{FL,co} = 13,1900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.4.2 Zředění opacity

Koncentrace opacity osobního automobilu s benzínovým motorem vyjde dle vztahu (8) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,B} = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity osobního automobilu s diesellovým motorem vyjde dle vztahu (9) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{ov,Z,D} = 2,2988 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity nákladního automobilu vyjde dle vztahu (10) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $e_{nv,Z} = 16,9037 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{voz}^{-1}$.

Koncentrace opacity pro danou skladbu vozidel vyjde dle vztahu (11) pro hodnoty z Tab. 7 a Tab. 8 $E_Z = 0,4256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Množství čerstvého vzduchu, kterým musíme koncentraci opacity naředit, spočítáme ze vztahu (12) a vychází $Q_{FL,Z} = 85,1252 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

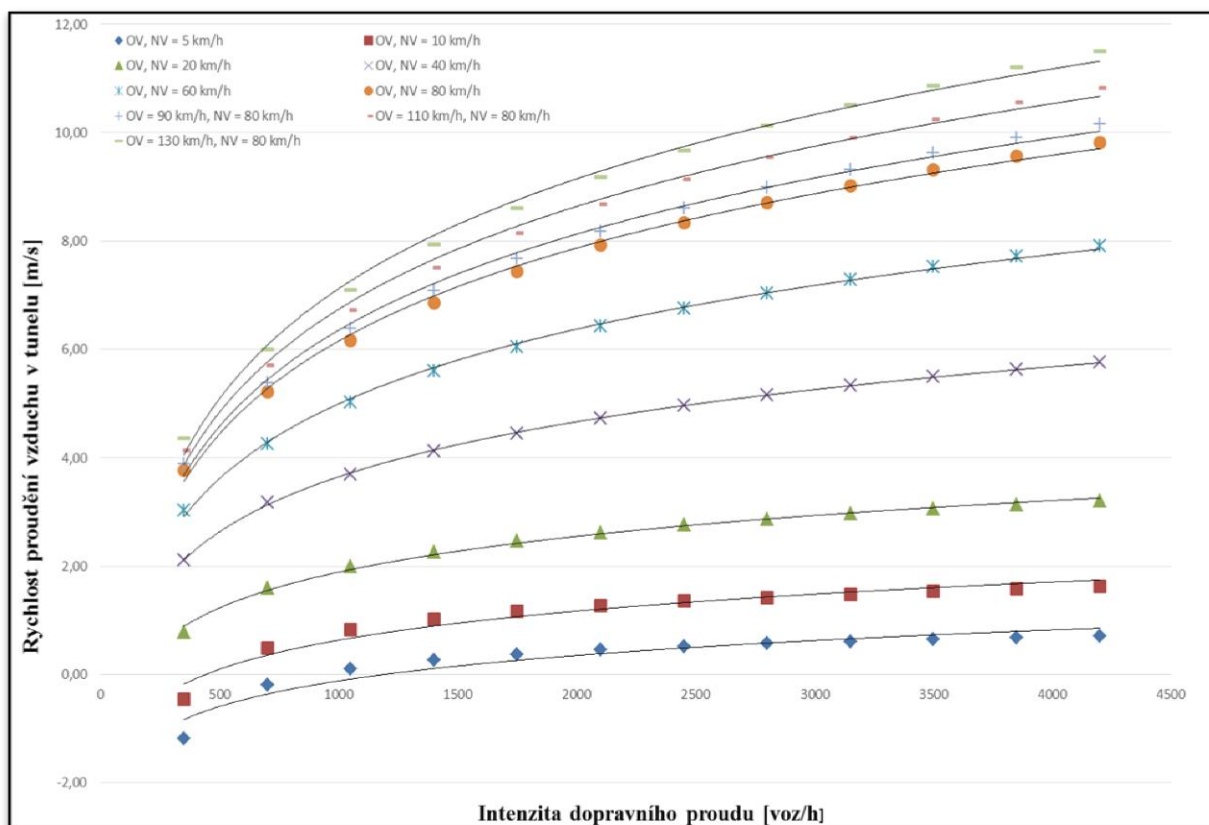
4.2.4.3 Výsledná rychlost vzduchu

Potřebné celkové množství přivedeného čerstvého vzduchu pro zředění oxidu uhelnatého a snížení opacity se rovná podle vztahu (13) $Q_{FL} = 85,1252 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Minimální rychlost vzduchu pro zředění CO a opacity je podle (14) $v_t = 1,1733 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.3 Výpočet rychlosti vzduchu v závislosti na působících silách

Na Obr. 17 je znázorněna závislost rychlosti proudění vzduchu v tunelu na rychlosti vozidel a intenzitě dopravy. Graf byl vytvořen díky výsledkům matematického modelu, který je v příloze A. Dále byly z grafu pomocí regrese stanoveny logaritmické rovnice, které uvádějí vztah pro výpočet rychlostí proudění vzduchu z libovolných vstupních hodnot. Seznam logaritmických rovnic je v Tab. 13.



Obr. 17: Závislost rychlosti vzduchu v tunelu na rychlosti vozidel a intenzitě dopravy

Tab. 13: Logaritmické rovnice pro výpočet rychlosti vzduchu

Rychlost vozidel v intervalu <0;7,5) km/h	$y = 0,6789 \ln(x) - 4,8126$
Rychlost vozidel v intervalu <7,5;15) km/h	$y = 0,7738 \ln(x) - 4,7151$
Rychlost vozidel v intervalu <15;30) km/h	$y = 0,9523 \ln(x) - 4,6913$
Rychlost vozidel v intervalu <30;50) km/h	$y = 1,4648 \ln(x) - 6,4706$
Rychlost vozidel v intervalu <50;70) km/h	$y = 1,9874 \ln(x) - 8,7341$
Rychlost vozidel v intervalu <70;85) km/h	$y = 2,4722 \ln(x) - 10,924$
Rychlost OV v intervalu <85;100) km/h Rychlost NV větší než 70 km/h	$y = 2,5562 \ln(x) - 11,304$
Rychlost OV v intervalu <100;120) km/h Rychlost NV větší než 70 km/h	$y = 2,7368 \ln(x) - 12,165$
Rychlost OV větší než 120 km/h Rychlost NV větší než 70 km/h	$y = 2,9244 \ln(x) - 13,082$

y je výsledná rychlost vzduchu v tunelu, x odpovídá intenzitě dopravy v tunelu

Pro výpočet byly použity vzorce z kapitoly 3.4.1. V rovnici (15) bylo uvažováno v případě orientace sil jako pro nejhorší případ. Pro kladný směr (směr jízdy vozidel) je orientován pouze pro příspěvek síly Q_{voz} (pístový efekt), ostatní síly Q_{vitr} (síla větru na portál), Q_{kom} ,

(komínový efekt) i Q_{tun} (odpor tunelové trouby) jsou orientovány proti směru jízdy vozidel. Rovnici (15) můžeme přepsat do následné podoby:

$$Q_{voz} = Q_{vitr} + Q_{kom} + Q_{tun} \quad (24)$$

V rovnici (15) i (24) není uvažován vliv síly ventilace tunelu. Podle literatury [1] není pro tunely do cca 1 km (v závislosti na intenzitě dopravy) potřeba nutně zavádět ventilační systém. Proto je výpočet rychlosti vzduchu pro Klimkovický tunel uveden bez vlivu ventilace. Ventilace bude uvažována až po zjištění výsledné hodnoty proudění vzduchu v tunelu, pro korekci nízké nebo vysoké rychlosti proudění vzduchu.

Pro výpočet rychlosti vzduchu z rovnice (24) jsem zvolil funkci *solve* v programu Matlab.

Stejně jako v kapitole 4.2 se při výpočtu zaměřím na čtyři možné situace dopravy v tunelu. Hodnoty budu čerpat podobně jako při výpočtu množství vzduchu z Tab. 7.

4.3.1 Minimální intenzita

Pro výpočet rychlosti vzduchu pro minimální intenzitu dopravy použiji hodnoty z Tab. 8.

Výsledná rychlost vzduchu je $v_t = -2,5826 \text{ m/s}$.

Záporné znaménko udává směr proudění větru proti jízdě vozidel, což je způsobeno především konstantní silou větru na portál tunelu a minimálnímu pístovému efektu.

4.3.2 Maximální intenzita dopravy ze současných sběrů dat

Pro výpočet rychlosti vzduchu pro maximální intenzitu dopravy ze současných dat použiji hodnoty z Tab. 9.

Výsledná rychlost vzduchu je $v_t = 5,2537 \text{ m/s}$.

Zde je již znát vliv pístového efektu díky větší intenzitě vozidel.

Pro porovnání: minimální rychlost vzduchu pro zředění oxidu uhelnatého a opacity je podle kap. 4.2.2 $v_t = 0,1162 \text{ m.s}^{-1}$.

4.3.3 Maximální možná intenzita dopravy

Pro výpočet rychlosti vzduchu pro maximální možnou intenzitu dopravy použiji hodnoty z Tab. 10.

Výsledná rychlost vzduchu je $v_t = 10,7289 \text{ m/s}$.

Pro maximální možnou intenzitu vozidel v tunelu se hodnota rychlosti větru dostala nad omezující hodnotu 10 m/s, což by vyžadovalo reverzní chod ventilátorů pro snížení této rychlosti. Takto vysoká intenzita dopravy je však v současné době velmi nepravděpodobná.

4.3.4 Kongesce

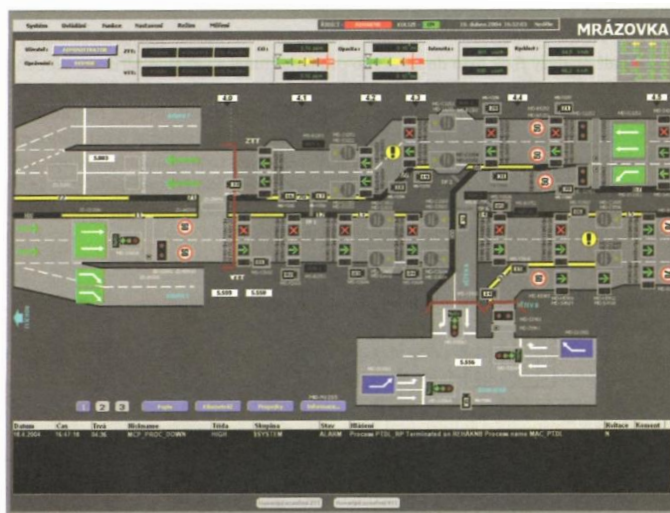
Pro výpočet rychlosti vzduchu v případě kongesce v tunelu použijí hodnoty z Tab. 12.

Výsledná rychlost vzduchu je $v_t = 0,1768 \text{ m/s}$.

Díky této výsledné rychlosti vzduchu vidíme, že nezávisí pouze na intenzitě dopravy, ale také na rychlosti vozidel, která výrazně ovlivňuje velikost pístového efektu.

4.4 Návrh operátorského pracoviště

Na Obr. 18 je operátorské pracoviště části tunelu Mrázovka. Operátorské pracoviště obecně musí zprostředkovat styk mezi operátory a řízenou technologií, tzv. HMI (Human-Machine-Interface).



Obr. 18: Řízení dopravy – jižní vyústění tunelu Mrázovka strana [1]

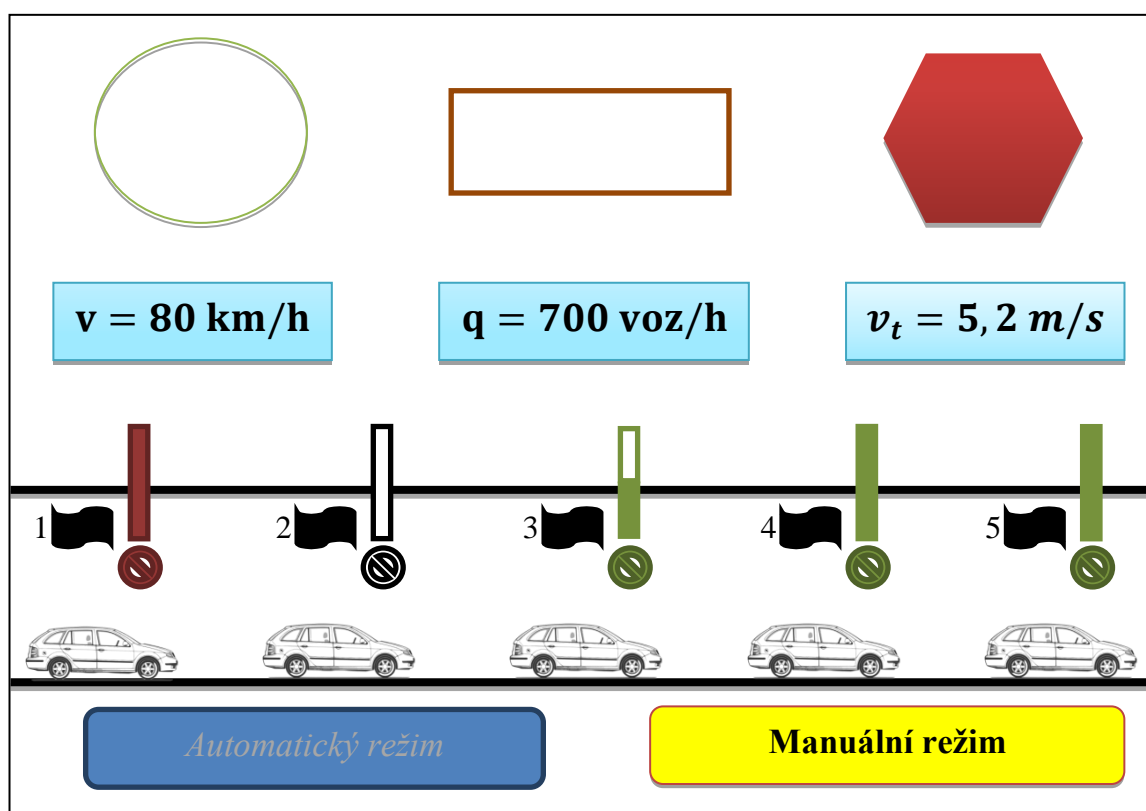
Návrh operátorského pracoviště je na Obr. 19. Operátorské pracoviště zobrazuje přehledně všechny důležité informace na dotykovém displeji.

Horní tři obrazce indikují operátorovi tři aktuální stavy ventilace tunelu: bezproblémový, s výstrahou a chybný (aktuálně svítící).

Tři obdélníčky podbarvené tyrkysově zobrazující aktuální rychlost dopravního proudu, aktuální intenzitu dopravy a rychlost proudění vzduchu v tunelu.

Schéma tunelu zobrazuje jeho celou uvažovanou délku rozdělenou reálným počtem ventilátorů na dílčí úseky. První ventilátor svítí červeně, což indikuje, že je nefunkční, proto také v horní části svítí červený chybný signál. Druhý ventilátor je neutrálně černý, což znamená, že je funkční, ale aktuálně není v provozu. Ventilátor tři je z části vybarven zeleně a to znamená, že je spuštěn na poloviční výkon. Ventilátory čtyři a pět pracují na maximum.

Pod schématem tunelu jsou dvě volitelné možnosti ovládání ventilace a to manuální, která je spuštěná, a automatická.



Obr. 19: Návrh operátorského pracoviště

5 Implementace návrhu v prostředí Rockwell Automation

Projekt Aplikace řídicích systémů na Fakultě dopravní umožňuje ve vlastní laboratoři projektu programování algoritmů v prostředí Rockwell Automation, což bylo použito i při implementaci návrhu ventilace tunelu. Programovací prostředí je názorné a nevyžaduje speciální jazyk, jak tomu bývá u jiných programovacích nástrojů. V laboratoři jsou k dispozici také automaty PLC, Obr. 20, které umožňují, díky velkému množství modulů, sestavit řídicí systém optimálně navržený pro danou aplikaci.



Obr. 20: Řídicí systém SLC - 500

Na Obr. 16 je schematicky znázorněn algoritmus pro řízení ventilace. Vstupními hodnotami jsou rychlost dopravního proudu v a intenzita dopravního proudu q . Podle logaritmických funkcí, které jsou vygenerovány matematickým modelem, se v závislosti na vstupních hodnotách vypočítává cyklicky rychlost proudění vzduchu. Výsledná rychlost proudění vzduchu je stejně jako v kapitole 4.3 uvažována bez vlivu ventilátorů. Z výstupu rychlosti vzduchu v tunelu je možné následně ovládat celý ventilační systém tunelu, což je už nad rámec této bakalářské práce.

5.1 Popis dat

Data použitá při výpočtu a práci algoritmu jsou rozdělena do následujících částí: vstupní data, data uložená v paměti programu a výstupní data.

5.1.1 Vstupní data

Vstupními daty jsou aktuální hodnoty rychlosti dopravy a aktuální hodnoty intenzity dopravy. Rychlost dopravy je uložena do proměnné typu FLOAT na pozici F8:10 odkud je dále načítána do algoritmu. Intenzita dopravy je uložena do proměnné typu INTEGER na pozici N7:0.

5.1.2 Data uložená v programu

Stěžejní pro výpočet výsledné hodnoty proudění vzduchu jsou logaritmické rovnice. Logaritmické rovnice jsou autentické pro každý interval vstupních rychlostí dopravního proudu a po vložení zvolené intenzity dopravy se automaticky zvolí požadovaná rovnice. Logaritmické rovnice byly vygenerovány díky proložení křivky výslednými hodnotami rychlosti proudění vzduchu, Obr. 17.

Data, která jsou uložena pro výpočet logaritmické rovnice, lze v programu nahradit funkcí *compute*. Od toho ale nakonec bylo pro lepší názornost upuštěno.

Dalšími uloženými daty jsou okrajové hodnoty rychlosti dopravního proudu, které jsou uloženy v proměnné typu FLOAT na pozici F8:0 až F8:8, Obr. 21.

Offset	0	1	2	3	4
F8:0	0	7.5	15	30	50
F8:5	70	85	100	120	0
F8:10	25	0	0	0	0

Symbol: F8:13 Radix: Columns: 5
Desc: Výsledná rychlost vetru v tunelu

F8 Properties Usage Help

Obr. 21: Datová tabulka FLOAT v prostředí RSLogix

5.1.3 Výstupní data

Výstupními daty programu jsou dílčí výpočty logaritmické rovnice a rychlost proudění vzduchu v tunelu. Dílčí výpočty logaritmické rovnice jsou průběžně ukládány do proměnné typu FLOAT na pozici F8:11 a F8:12. Výsledná rychlost proudění vzduchu je uložena také do proměnné typu FLOAT na pozici F8:13.

V závislosti na výsledné rychlosti proudění vzduchu je možné dále řídit ventilaci v tunelu.

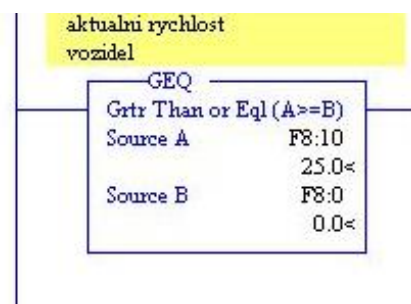
5.2 Funkce

Vstupní data rychlostí dopravního proudu vkládána on-line do programu jsou nejprve přiřazena danému intervalu rychlosti. Po přiřazení do intervalu rychlosti je dále počítáno s logaritmickou rovnicí určenou pro daný přiřazený interval. V programu uložené logaritmickou rovnicí, viz Tab. 13, které byly vypočítány matematickým modelem, jsou

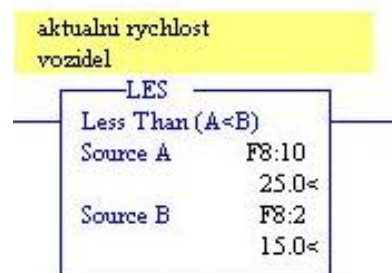
základem pro výpočet výstupní rychlosti vzduchu v tunelu. V rovnici se dále již nepočítá se vstupní hodnotou rychlosti dopravního proudu (ta slouží pro zvolení intervalu rychlosti), nýbrž s jeho intenzitou, která je také on-line zadávána do programu.

Pravidla pro zařazení rychlosti do správného intervalu jsou programována pomocí podmínek a logaritmické rovnice jsou v programu RSLogix počítány příkazy řazenými paralelně v žebříku.

Pro porovnání vstupní rychlosti dopravního proudu a zařazení této hodnoty do definovaného intervalu jsem použil funkci „Greater Than or Equal“ (Obr. 22) a funkci „Less Than“ (Obr. 23).

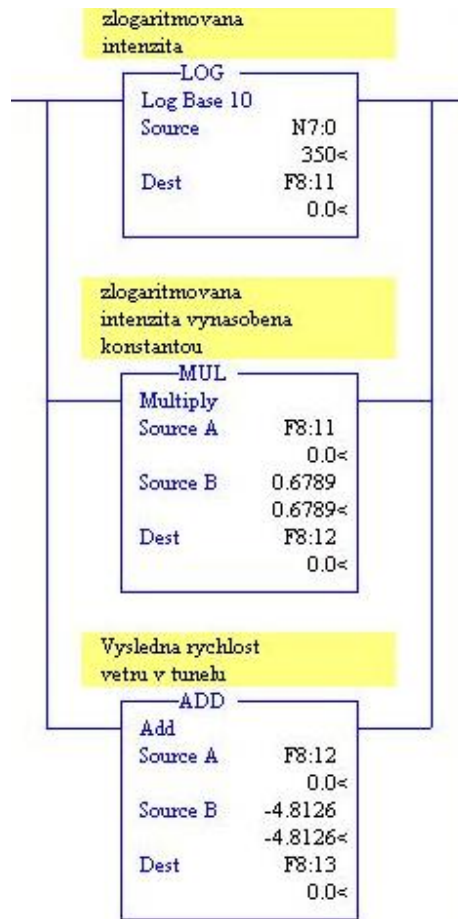


Obr. 22: Funkce Greater Than or Equal v programu RSLogix



Obr. 23: Funkce Les Than v programu RSLogix

Postup výpočtu logaritmické rovnice v závislosti na vstupních hodnotách je na Obr. 24.



Obr. 24: Výpočet logaritmické rovnice v programu RSLogix

6 Analýza spolehlivosti navrženého programu

V této kapitole se zabývám situacemi, kdy vstupní data rychlosti a intenzity dopravního proudu a výstupní hodnoty rychlosti proudění větru v tunelu jsou neobvyklé, nereálné nebo dokonce žádné.

Hodnoty rychlosti a intenzity vozidel jsou do programu vkládány každých 180 sekund. Interval je zvolený tak, aby bylo ovládání co nejplynulejší, reagovalo na změny dopravy, ale zároveň nebylo příliš velké výkyvy v datech.

6.1 Reakce programu na vstupní hodnotu rychlosti

Pro naměřené rychlosti vozidel od 0 km/h do 110 km/h pracuje ventilace systému podle klasického řízení. Pro hodnoty mimo uvedený interval existují tři varianty.

6.1.1 Naměřená rychlost vozidel je záporná

Naměřenou rychlost vozidel menší než 0 km/h nemůže reálně způsobit žádná situace. Hypoteticky můžeme v případě požáru naměřit zápornou rychlost vozidel při jejich couvání od ohniska požáru, ale u takto dlouhého tunelu není pravděpodobné, že by cestující k záchraně používali vozidlo. V případě jeho použití by musela začít couvat všechna vozidla v tunelu a před tunelem by musela vozidla zastavit v dostatečně velké vzdálenosti tak, aby se nesrazila s couvajícími vozidly.

Zdrojem záporné rychlosti vozidel může být chyba měření, porucha detektoru, poškození kabelů či výpadek elektřiny.

Pro zápornou vstupní hodnotu rychlosti vozidel program uvědomí obsluhu tunelu chybovou hláškou (červené světlo) s informací o této skutečnosti. Obsluha zkontroluje situaci a zařídí se podle předem připravených scénářů.

6.1.2 Naměřená rychlost vozidel je vyšší než 110 km/h

V krajním případě se můžeme setkat, při velmi malé intenzitě dopravy, s takto vysokými hodnotami rychlosti, ale je to velmi nepravděpodobné i vzhledem k monitorování tunelu kamerovým systémem.

Reálnější příčinou takto vysoké rychlosti může být změna nebo porucha na proměnné dopravní značce umístěné před vjezdovým portálem tunelu.

Pro naměřenou rychlost vozidel v tunelu vyšší než 110 km/h program varuje operátora rozsvícením oranžového světla, tedy varovným signálem. Operátor zkontroluje situaci a jedná podle předem připravených scénářů.

6.1.3 Nízká hodnota naměřené rychlosti

Pro hodnotu rychlosti vozidel v tunelu nižší než 50 km/h začne nejprve podle potřeby fungovat ventilační systém kvůli snížení vlivu pístového efektu vozidel na vzduch tunelu. Poté systém uvědomí velín tunelu o možnosti vzniku kongescí, které jsou z hlediska bezpečnosti pro tunel velmi rizikové, a také podá varovný signál (oranžové světlo) na displej operátorského pracoviště.

6.2 Reakce programu na vstupní hodnotu intenzity dopravy

Pro reálnou hodnotu intenzity dopravy v intervalu od 0 do 1 200 voz.h⁻¹ pracuje program klasicky. Pro hodnoty intenzity mimo tento interval existují dvě možné situace.

6.2.1 Naměřená intenzita dopravy je příliš nízká

Pro velmi nízkou vstupní hodnotu intenzity program opět varuje obsluhu varovným signálem (oranžové světlo). Velikost dolní hranice intenzity je během dne upravována, změna denního a nočního režimu. Nízká hodnota může být způsobena skutečnými hodnotami v nočních hodinách, kdy intenzita dopravy dosahuje pouze cca 30 voz/hod. Dále může být způsobena kongescí na dálnici v místě před tunelem, kdy auta k tunelu nemohou přijet kvůli nějaké překážce na komunikaci.

6.2.2 Naměřená intenzita dopravy je pro danou rychlost příliš vysoká

V případě, že je intenzita dopravy v závislosti na rychlosti vozidel příliš vysoká a převyšuje tak kapacitu komunikace, uvědomí program obsluhu tunelu chybným signálem (červené světlo). Tato situace může nastat pouze v případě poruchy nebo opravdu velmi rozsáhlé nehody, protože se do prostoru tunelu při rychlosti dopravního proudu 5 km/h, což odpovídá silné kongesci, nemůže fyzicky dostat větší počet vozidel, než který odpovídá právě intenzitě dopravy 1 200 voz.h⁻¹.

6.3 Nejsou k dispozici žádné vstupní hodnoty

Pokud program obdrží ze senzorů vstupní hodnoty rychlosti a intenzity dopravního proudu v intervalu delším než 180 sekund, v nočním režimu delším než 360 sekund, program varuje

operátora oranžovým světlem. Operátor zkontroluje situaci a v případě normálního provozu použije jako vstupní hodnoty pro výpočet data z historického modelu dopravy.

Tuto chybu může způsobit porucha senzorů, poničení propojovacích kabelů nebo výpadek elektřiny, výjimečně reálná situace v nočním provozu.

Závěr

V bakalářské práci se podařilo splnit hlavní cíl, tj. implementaci algoritmů sloužících k ovládání ventilace silničního tunelu. Výstupem práce je určení rychlosti proudění vzduchu v silničním tunelu v závislosti na vstupních dopravních veličinách, kterými jsou intenzita a rychlost dopravního proudu. Princip postupu s využitím regresního modelu je uveden v kapitole 4.3. K výpočtu bylo využito fyzikálních principů. Výstupní hodnoty rychlosti proudění vzduchu v tunelu jsou stěžejní pro následné ovládání samotného ventilačního zařízení.

V kapitole 4.2 je model sestaven off-line pomocí výpočtů uvedených v závislosti na různých rychlostech a intenzitách dopravního proudu, koncentrace škodlivin oxidu uhelnatého a opacity. Následně z těchto koncentrací je definováno minimální množství čerstvého vzduchu, který je nutno do tunelu přivést, aby byly nežádoucí škodliviny dostatečně zředěny. Algoritmus řízení ventilace je implementován do prostředí PLC Rockwell Automation v kapitole 5 a lze, díky možnosti zadávání proměnných vstupních dopravních dat, simulovat reálnou situaci proudění vzduchu v silničním tunelu. Jak bylo analyzováno v teoretickém rozboru v kapitole 3, i takto úzká složka celého procesu řízení ventilace, jako je on-line výpočet výsledné rychlosti proudění vzduchu v silničním tunelu, vyžaduje nemalé množství výpočetních vztahů, což je zřejmé z množství rovnic v této práci (viz vztahy (15) až (23)) i množství veličin uvedených v seznamu použitých veličin a jednotek. Složitost problematiky dokazuje také její výzkum v projektu OPTUN, kterým se zabývá mimo jiné Fakulta dopravní.

Algoritmus implementovaného matematického modelu byl vyzkoušen, aniž by na výstupu programu vycházely nevhodné výsledky. Pro případ absence vstupů či jejich zřejmé nesprávnosti je v kapitole 6 rozebrána analýza spolehlivosti. Správnost matematického modelu pro výpočet rychlosti proudění vzduchu v tunelu je zřejmá z grafu modelu na Obr. 17, kde je názorně vidět logaritmická závislost rychlosti proudění vzduchu v tunelu na rychlosti a intenzitě dopravního proudu. Spolehlivost reakce implementovaného modelu v případě poruchy je rozebrána v kapitole 6.

Práce věnovaná problematice ventilačního systému je přínosná díky použitelnosti pro jakýkoli silniční tunel, který je možné podle jeho technických parametrů definovat v matematickém modelu a následně určit jednotlivé (logaritmické) rovnice pro výpočet rychlosti proudění vzduchu v tunelu.

Výsledky bakalářské práce lze dále rozšiřovat, např. směřovat k návrhu kompletního ovládní ventilačního systému tunelu, včetně plynulé regulace všech ventilátorů v závislosti na rychlosti vzduchu v tunelu a to i pro případ vzniku požáru. Také je možné zvolit složitější polopříčný či příčný systém větrání.

Seznam použitých zdrojů

Knihy

- [1] PŘIBYL, Pavel a Jiří Barták. *Tunely na pozemních komunikacích*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2011.
- [2] PŘIBYL, Pavel. *Inteligentní dopravní systémy a dopravní telematika II*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, březen 2007.
- [3] PŘIBYL, Pavel, Aleš Janota a Juraj Spalek. *Analýza a řízení rizik v dopravě: tunely na pozemních komunikacích a železnici*. Praha: BEN, 2008.

Technické podmínky

- [4] TP 154 Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací. Praha: Eltodo EG, 2003.
- [5] ČESKO. MINISTERSTVO DOPRAVY, Odbor pozemních komunikací. *TP 98 - Technologické vybavení tunelů na pozemních komunikacích*. 2004. [cit. 12. 10. 2014]. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%2098.pdf>
- [6] ČESKO. MINISTERSTVO DOPRAVY, Odbor pozemních komunikací. *TP 189 – Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích*. 2012. [cit. 20. 10. 2014]. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP189.pdf>
- [7] ČESKO. TECHNICKÉ NORMY. *ČSN 73 6101 – Projektování silnic a dálnic*. 1994. [cit. 28. 10. 2014]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/PKO/holcner.p/BM01/CSN_736101.pdf

Internetové zdroje

- [8] Intenzity 2012. Ředitelství silnic a dálnic ČR, 2012. [cit. 22. 10. 2014]. Dostupné z: <http://www.ceskedalnice.cz/prilohy/intenzity-2012.pdf>
- [9] PŘIBYL Pavel, Jozef Štefaňák a Juraj Spalek. *Optimalizace provozu ventilace v silničních tunelech*. Praha: ČVUT Fakulta dopravní, 2010. [cit. 28. 10. 2014]. Dostupné z: http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/slovak_control_conference_2010/pdf/50_%20Spalek_Stefanak_Pribyl.pdf

- [10] Sdružení automobilového průmyslu. [cit. 22. 10. 2014]. Dostupné z:
<http://www.autosap.cz/dalsi-informace/pocty-registrovanych-vozidel-vozidel-v-cr-a-dalsi-udaje/#struktS>
- [11] Axiální přetlakové ventilátory APW pro podélné větrání tunelů. ZVVZ MACHINERY, a. s. [cit. 25. 10. 2014]. Dostupné z:
<http://www.zvvz.cz/data/files/1029apw.pdf>
- [12] Tunel. V: Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. Poslední aktualizace 6. 2. 2014 [cit. 8. 4. 2014]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tunel>
- [13] Železniční tunely v Česku. V: Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. Poslední aktualizace 28. 3. 2014 [cit. 8. 4. 2014]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlezni%C4%8Dn%C3%AD_tunely_v_%C4%8Cesku
- [14] Tunely v Česku. V: Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. Poslední aktualizace 28. 3. 2014 [cit. 8. 4. 2014]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Tunely_v_%C4%8Cesku

Seznam obrázků

Obr. 1: Hierarchie řídicích systémů dopravy [1]	16
Obr. 2: Hierarchie řídicích systémů[1]	17
Obr. 3: Závislost rychlosti vzduchu na rychlosti vozidel a intenzitě dopravy [1].....	24
Obr. 4: Podélné větrání s proudovými ventilátory, překresleno z [1]	25
Obr. 5: Podélné větrání se Sacardo injektorem, překresleno z [1]	25
Obr. 6: Tunel s pomocným výfukovým komínem uprostřed tunelu, překresleno z [1]	26
Obr. 7: Polopříčné větrání, čerstvý vzduch je přiváděn vyústky, překresleno z [1].....	26
Obr. 8: Polopříčné větrání, čerstvý vzduch je přiváděn portály, překresleno z [1]	27
Obr. 9: Polopříčné větrání s otevřenými odsávacími klapkami, překresleno z [1]	27
Obr. 10: Polopříčné-příčné větrání, překresleno z [1]	28
Obr. 11: Polopříčné-příčné větrání, překresleno z [1]	28
Obr. 12: Příčné větrání, překresleno z [1]	29
Obr. 13: Příčné větrání, překresleno z [1]	29
Obr. 14: Hybridní model pro odhadování škodlivin [9].....	40
Obr. 15: Výsledky odhadů hybridního modelu a reálného měření oxidu uhelnatého [1]	41
Obr. 16: Závislost rychlosti vzduchu v tunelu na rychlosti vozidel a intenzitě dopravy	52

Seznam příloh

Příloha A - Matematický model (22 stran, Excel, 127 kB)

Příloha B – Program v RSLogix (27 stran, PDF, 82 kB)