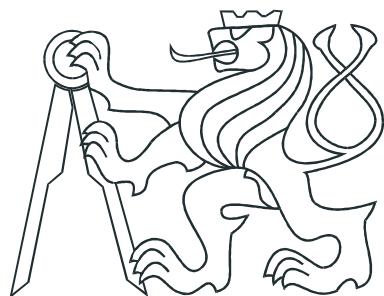


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řízení ventilace tunelu Blanka

Praha, 2012

Autor: Jan Šulc

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 10.5.2012

Eduard Jan
podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se podíleli na tvorbě této práce, ať už přímo nebo nepřímo. Děkuji především vedoucímu diplomové práce Ing. Lukáši Ferklovi PhD., který se mi po celou dobu tvorby diplomové práce ochotně věnoval a dal mi cenné rady a připomínky.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Satra spol. s r.o., a to především Ing. Janu Pořízkovi, se kterým jsem práci po celou dobu její tvorby konzultoval. Můj velký dík patří také Pavlovi Tomáškovi, který mi výrazně pomohl s dynamickým dopravním i emisním modelem, na kterém bylo možno algoritmus řízení ventilace otestovat.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem algoritmu provozního větrání tunelu Blanka. V práci je podrobně popsán matematický model tunelu. Tento model posloužil k naprogramování simulátoru vzduchotechniky. Na simulátoru byly otestovány kritické situace, které mohou v tunelu během provozu nastat. Simulátor dále posloužil k návrhu optimalizačního řídicího algoritmu provozního větrání.

Simulátor může být po úpravě využit i při řízení ventilace jiných silničních tunelů.

Abstract

The diploma thesis is focused on the design of the service ventilation in Blanka tunnel. The mathematical model of Blanka tunnel is particular described in this thesis. This model was used to program the air conditioning simulator. The critical situations, which can occur during the tunnel operation, were tested on the simulator. The simulator was finally used for the design of the optimization algorithm of the service ventilation.

This simulator can be used after conversion during the realization of future tunnels.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Šulc**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Řízení ventilace tunelu Blanka**

Pokyny pro vypracování:

1. Sestavte detailní 1D model vzduchotechniky pro silniční automobilový tunel Blanka.
2. Navrhněte vícerozměrnou energeticky optimální regulaci provozní ventilace tunelu.
3. Simulacemi prokážte funkčnost navržené regulace.

Seznam odborné literatury:

- [1] Idelchik, I. E. Handbook of Hydraulic Resistance. Begell House, 2001.
[2] TP 154 - Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací. Technický předpis ministerstva dopravy ČR.

Vedoucí: Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2012/2013

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 26. 1. 2012

Obsah

1	Úvod	1
2	Základní údaje o tunelu	3
2.1	Členění stavby	3
2.2	Historie výstavby	4
2.3	Parametry a geometrie tunelu	5
2.4	Technologické vybavení tunelu	7
3	Systém větrání tunelu	9
3.1	Úvod	9
3.2	Prvky vzduchotechnického systému	10
3.2.1	Měření fyzikálních veličin	10
3.2.1.1	Měření rychlosti a směru proudění	10
3.2.1.2	Měření oxidů dusíku a opacity	11
3.2.1.3	Vyhodnocování charakteru a stupně dopravy	12
3.2.2	Akční členy	12
3.2.2.1	Proudové ventilátory	12
3.2.2.2	Axiální ventilátory ve strojovnách vzduchotechniky . . .	14
3.2.2.3	Uzavírací klapky	15
3.3	Požadavky na provozní větrání tunelu	16
3.3.1	Situace v místě mimoúrovňové křižovatky Malovanka	18
4	Simulátor vzduchotechniky	21
4.1	Účel simulace	21
4.2	Struktura simulátoru	22
4.3	Dopravní model	23
4.3.1	Statistické dopravní údaje	23

4.3.2	Statický model dopravy	24
4.3.3	Dynamický model dopravy	25
4.4	Model proudění	27
4.4.1	Síly působící v tunelu	27
4.4.2	Aerodynamické schéma	36
4.5	Emisní model	37
4.5.1	Ustálená verze výpočtu emisí	38
4.5.2	Dynamická verze výpočtu emisí	40
5	Řízení ventilace	43
5.1	Algoritmus řízení ventilace	43
5.2	Formulace optimalizační úlohy	45
5.2.1	Proměnné optimalizace	46
5.2.2	Ztrátová funkce	47
5.2.3	Omezení	48
5.2.4	Zjednodušení Bernoulliho rovnic	48
5.3	Rozvrhování ventilátorů	51
6	Výsledky simulací	53
6.1	První scénář	53
6.2	Druhý scénář	58
7	Závěr	69
Literatura		
A	Parametry úseků tunelu Blanka	I
B	Umístění proudových ventilátorů v tunelu Blanka	II
C	Schématické znázornění provozního větrání	III
D	Předpokládaná denní průjezdnost vozidel	IV
E	Podíl automobilů v jednotlivých kategoriích emisní normy EURO	V
F	Obsah přiloženého CD	VI

Kapitola 1

Úvod

Městský okruh v Praze je jedním z nejdůležitějších dopravních tahů v České republice. Jeho jihovýchodní částí projede denně přes 100 000 vozidel. Hlavní funkcí Městského okruhu v Praze je ochrana historického jádra města, zapsaného na seznam kulturního a historického dědictví UNESCO a umožnění regulace automobilové dopravy v centrální části města. Celková délka okruhu je 32,1 km, z toho pouze více než polovina je v provozu. Po dokončení Městského okruhu bude jeho celá třetina vedena v tunelech. V současné době jsou na Městském okruhu v provozu tři tunely - Strahovský tunel, tunel Mrázovka a Zlíchovský tunel. Všechny tunely byly navrženy z důvodu značně členitého terénu, na kterém se Praha rozkládá a především z požadavků ochrany životního prostředí. Nejí- nak tomu bude i v případě tunelu Blanka. Budovaná trasa tunelu prochází urbanizo- vaným prostředím střední části města na hranicích historického jádra Prahy a prostorem chráněné přírodní památky Královská obora–Stromovka. Tunel Blanka se po dokončení stane nejdelším tunelem okruhu a největším tunelovým komplexem v České republice. Rozsah stavby je mimořádný, o čemž svědčí i délka přípravy stavby, množství investic, výluky městské hromadné dopravy, uzavírky nadzemní dopravy a také mediální kauzy.

Kapitola 2

Základní údaje o tunelu

2.1 Členění stavby

Tunel Blanka bude součástí Městského okruhu v Praze. Jeho trasa je vedena v jeho severozápadní části v katastrálních územích Prahy 6, 7 a 8, viz obr. 2.1. Stavba je rozdělena na tři souvislé úseky, které na sebe navazují v mimoúrovňových křižovatkách [19]:

- **Tunelový úsek Brusnice**

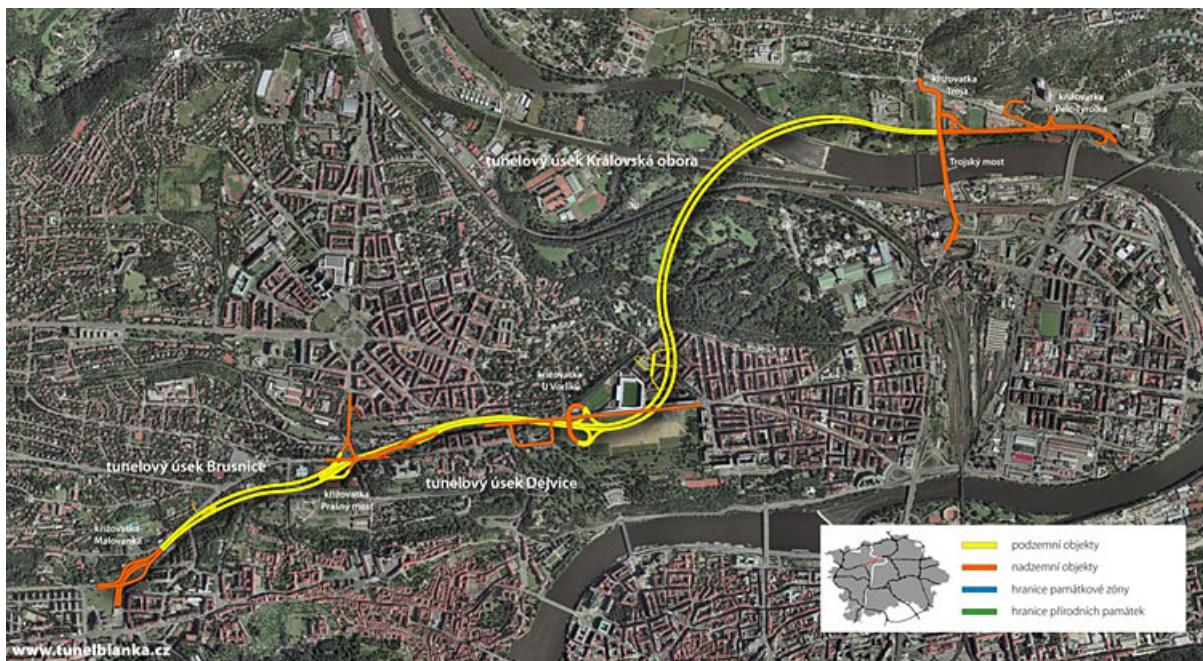
Začíná za severním portálem Strahovského tunelu rozsáhlou mimoúrovňovou křižovatkou Malovanka. Dále vede v hloubených tunelech ulicí Patočkova a za křižovatkou s ulicí Myslbekova vstupuje trasa do raženého úseku. Celý úsek pak končí před křižovatkou Prašný most. Celková délka úseku je 1,4 km, z toho je 550 m ražených tunelů.

- **Tunelový úsek Dejvice**

Za křižovatkou Prašný most navazuje na úsek Brusnice a pokračuje v celé délce hloubenými tunely třídou Milady Horákové a končí mimoúrovňovou křižovatkou U Vorlíků na letenské pláni. Celková délka úseku je 1 km a úsek neobsahuje žadné ražené tunely.

- **Tunelový úsek Královská obora**

Tunel dále pokračuje nejprve krátkým hloubeným tunelem pod zástavbou na Letné. Na tento úsek dále navazuje dlouhý, více než dvoukilometrový ražený úsek pod Stromovkou a Vltavou a poté hloubený úsek až k portálu v Tróji. Celková délka úseku je 3,09 km, z toho je 2,23 km ražených.



Obrázek 2.1: Přehledová mapa vedení trasy tunelu Blanka v městských částech Prahy [19]

2.2 Historie výstavby

V roce 2003 bylo vydáno územní rozhodnutí a o rok později se zahájilo s ražbou průzkumné štoly v úseku Královská obora, která měla sloužit pro podrobný geotechnický průzkum před samotnou ražbou tunelu.

Stavba byla zahájena ke konci roku 2007 hloubením úseku Brusnice. Ražený úsek Královská obora byl úspěšně dokončen v únoru roku 2010. V dubnu roku 2011 byl proražen jižní tubus a v červenci roku 2011 severní tubus úseku Brusnice. Stavba si vyžádala množství dopravních uzavírek a výluk městské hromadné dopravy. Díky špatnému geologickému podloží došlo během výstavby k celkem třem propadům půdy, které vzbudily v široké veřejnosti velkou kritiku. V květnu a říjnu 2008 se tunel propadl v pražské Stromovce a v létě 2010 v areálu Ministerstva kultury. Při těchto událostech nebyl naštěstí nikdo zraněn. Na druhé straně provázejí výstavbu tunelu i radostnější události. V květnu roku 2011 byly na staveništi objeveny archeologické nálezy z dob Přemyslovců. Jednalo se asi o dvacet hrobek, ve kterých byly zřejmě pochováni lidé žijící tehdy na Pražském hradě. Stavba se díky těmto a dalším událostem znatelně zpozdila

a původní plánovaný termín dokončení, prosinec roku 2012, musel být o více než rok posunut. Nyní se plánuje termín otevření na duben roku 2014. Dokončovací stavební práce na povrchu vč. zatravňování budou však probíhat až do roku 2016.



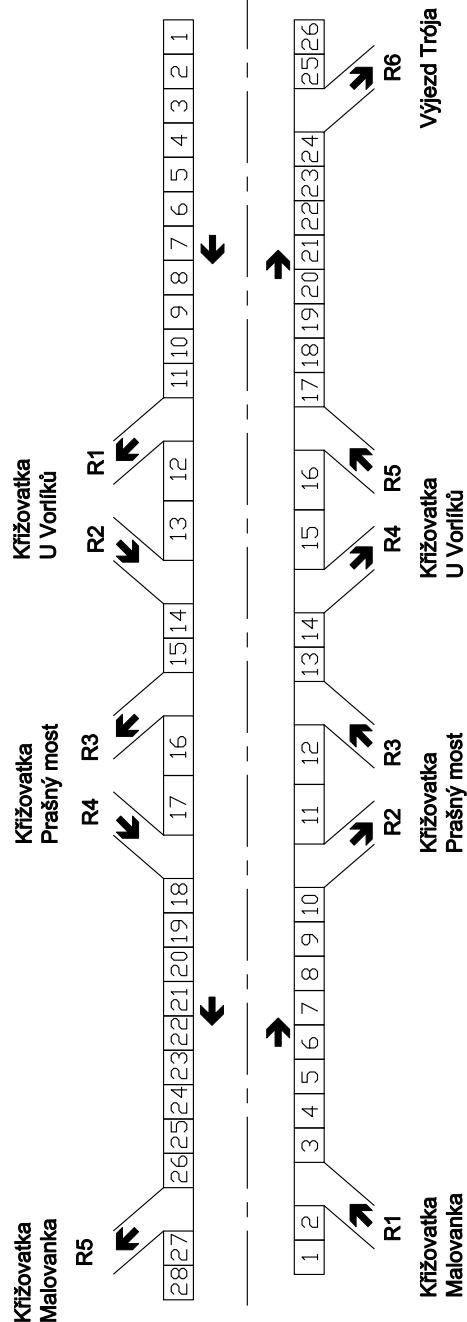
Obrázek 2.2: Prorážka severního tubusu tunelového úseku Brusnice,
duben 2011 [19]

2.3 Parametry a geometrie tunelu

Tunel Blanka je navržen jako dvoutubusový městský tunel. V severním i jižním tunelovém tubusu se nachází celkem 3 mimoúrovňové křižovatky: U Voráků, Prašný most a Malovanka. Jižní tubus navíc obsahuje ještě výjezdovou rampu v Trójci. Návrhová rychlosť jízdy je v hlavní trase 70 km/h a na výjezdových a příjezdových rampách křižovatek 50 km/h. Celková délka tunelů hlavní trasy je 5502 m v severním tubusu a 5489 m v jižním tubusu. Délka hloubených tunelových ramp je v severním tubusu dohromady 449 metrů a v jižním tubusu 700 metrů. Hlavní trasa tubusu je navržena jako dvou, resp. třípruhová. Šířka jízdních pruhů je ve všech místech tunelu 3,5 metru a maximální sklon vozovky je 5%. Tunel Blanka lze rozdělit na několik úseků, ve kterých se nemění průřez, průměr, počet pruhů a sklon vozovky. Jednoduché schéma tunelu Blanka s těmito úseky

je uvedeno na obr. 2.3. Detailní parametry jednotlivých úseků lze najít v příloze A.

SEVERNÍ TUNELOVÝ TUBUS



JIŽNÍ TUNELOVÝ TUBUS

Obrázek 2.3: Schéma úseků tunelu Blanka, šipky označují směr jízdy vozidel

2.4 Technologické vybavení tunelu

Tunel Blanka, jako každý jiný silniční tunel, musí být podle různých norem vybaven technologiemi, které zajišťují maximální bezpečnost provozu. Jedná se zejména o technické podmínky TP 98 – Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací [6] a podobnou evropskou směrnici 2004/54/EC [2]. Podle TP 98 musí být tunely vybaveny především **tunelovými hláskami systému SOS**. Hlásky nouzového volání jsou základním prvkem bezpečnostního systému a slouží k navázání nouzové a případně i provozní komunikace s dispečerem tunelu. Kromě verbálního spojení zároveň umožňují spojení s dispečerem prostřednictvím poplachových tlačítek. V tunelu Blanka se počítá s jejich provedením ve formě kabin SOS a jejich počet je nastaven na 23 v každém tunelovém tubusu.

Další z technologií zajišťujících bezpečnost provozu v tunelu je **videodohled**. Kamery systémy neustále kontrolují tunel po celé jeho délce, s pomocí čidel pro měření kouře jsou schopny zachytit jakýkoli požár. Kamery v tunelu také kontrolují nejvyšší povolenou rychlosť vozidel a nejmenší povolenou vzdálenost mezi vozidly. V případě volání z SOS hlásky v tunelu se na obrazovce dispečera automaticky objeví obraz snímající daný úsek tunelu.

Tunel Blanka bude dále vybaven také **proměnnými dopravními značkami (PDZ)**. Tyto značky budou rozmištěny po celé délce tunelu a budou řidiče informovat o maximální povolené rychlosti v tunelu, o uzavírkách jízdních pruhů nebo o dopravním stavu okolních komunikací.

Osvětlení je další nezbytnou součástí silničních tunelů. Osvětlení pomáhá řidičům zvyknout si na šeré podmínky v tunelu a zlepšuje akomodaci oka řidiče při výjezdu z tunelu.

Kromě výše uvedených technologií bude tunel Blanka vybaven poměrně rozsáhlým a složitým systémem **vzduchotechniky**, která musí zajistit bezpečnost v případě požáru, ale také odvětrávat zplodiny produkované automobily při běžném provozu.

Návrh řízení vzduchotechniky v tunelu Blanka je hlavní náplní této práce a jsou mu věnovány následující kapitoly.

Kapitola 3

Systém větrání tunelu

3.1 Úvod

Význam tunelu z hlediska dopravy v Praze a předpokládaná vysoká intenzita provozu předurčily požadavky na vysokou spolehlivost navržených technologických systémů s minimálními nároky na údržbu, včetně minimalizace provozních nákladů, a to zejména nákladů na elektrickou energii. Spotřebu elektrické energie silničních tunelů ovlivňuje zejména systém osvětlení a větrání [19]. Z tohoto důvodu byla věnována velká pozornost právě návrhu systému provozního větrání. Tato práce řeší pouze problematiku provozního větrání. Hlavním úkolem provozního větrání je udržení koncentrací škodlivin ve vzduchu v tunelu pod limitními hodnotami.

Každý automobil jedoucí tunelem produkuje z výfuku zplodiny při spalování benzínu nebo nafty. V největším množství dochází k uvolňování oxidu dusnatého (NO), oxidu dusičitého (NO_2), oxidu uhelnatého (CO) a pevných částic. Pevné částice ovlivňují úroveň viditelnosti v tunelu. Opacita je pak dána převrácenou hodnotou viditelnosti, tedy čím vyšší je opacita, tím horší je viditelnost v tunelu. K opacitě v tunelu přispívají částice primární prašnosti (PM10), v průměru menší než $10\mu\text{m}$, které vznikají při nedokonalém spalování. Opacita v tunelu však rapidně roste vlivem sekundární prašnosti. Tou se rozumí pevné částice, které jsou vlivem pohybu vozidla obrušovány z pneumatik a brzdových destiček a navíc také prach vzdutý z povrchu vozovky vlivem turbulentního proudění.

V tunelu Blanka je provozní větrání realizováno jako kombinace podélného a příčného větrání. Podélné větrání je způsob, kdy je za pomoci proudových ventilátorů zvyšována rychlosť proudění v podélném směru v tunelu, a tím dochází k naředění zplodin ve vzduchu. Příčné větrání je způsob, kdy jsou zplodiny za pomoci axiálních ventilátorů

ve strojovnách vzduchotechniky odsávány pryč z tunelu a rozptýleny ve vyšších úrovních atmosféry nad povrchem.

Při běžném provozu jsou tunely provětrávány podélně působením pístového efektu projíždějících vozidel nebo přirozeným pohybem vzduchu. Při nárůstu koncentrace oxidů dusíku, oxidu uhelnatého nebo zvýšení opacity nad limitní hodnoty je znečištěný vzduch z tunelu odváděn strojovnami mimo tunel v součinnosti s přirozeným, případně nuceným přívodem čerstvého vzduchu vjezdovými portály nebo strojovnami.

3.2 Prvky vzduchotechnického systému

3.2.1 Měření fyzikálních veličin

Měření fyzikálních veličin v tunelu poskytuje důležitou zpětnou vazbu pro regulaci provozního větrání. Pro potřeby řízení provozního větrání tunelu se měří a vyhodnocuje:

- střední rychlosť proudění v tunelu,
- koncentrace oxidů dusíku uvnitř i vně tunelu¹,
- míra viditelnosti v tunelu (opacita),
- charakter a stupeň dopravy

Umístění jednotlivých senzorů v tunelu Blanka je uvedeno v příloze A.

3.2.1.1 Měření rychlosti a směru proudění

V tunelu budou pro měření rychlosti proudění použity ultrazvukové senzory. Senzory jsou v tunelu rozmístěny v každém vzduchotechnickém úseku² tak, aby poskytly informaci o rychlosti proudění v každém místě tunelového tělesa. Senzory fungují na principu vysílače a přijímače [3]. Jeden ultrazvukový signál je vyslán ve směru proudění a druhý proti směru proudění vzduchu. Z doby, za kterou dorazí signál od vysílače k přijímači, lze vypočítat střední hodnotu proudění vzduchu. Díky dvěma vyslaným signálům je možno

¹V tunelu Blanka se budou měřit pouze koncentrace oxidů dusíku, neboť během provozního větrání se nepředpokládá s překročením limitní hodnoty CO.

²Vzduchotechnickým úsekem je myšlena buď rampa nebo souvislý úsek mezi křižovatkami, příp. strojovnami vzduchotechniky

získat informaci o směru proudění a výsledná rychlosť navíc nezávisí na rychlosti vyslaných ultrazvukových vln, která může kolísat v důsledku změny teploty v tunelu. Senzory pracují s přesností 0,1 m/s s měřicím rozsahem od -20 do 20 m/s. Spojnice mezi vysílačem a přijímačem svírá s osou tunelu úhel mezi 30 a 60°.



Obrázek 3.1: Ultrazvukový senzor rychlosti proudění [3]

3.2.1.2 Měření oxidů dusíku a opacity

Koncentrace oxidů dusíku NO a NO₂ se měří dohromady, což se souhrnně označuje NO_x.

Měření koncentrace oxidů dusíku bude probíhat jednak uvnitř tunelu a pak také vně tunelu, v místě mimoúrovňové křížovatky Malovanka. Vnitřní senzory pracují na principu tzv. diferenční optické absorpcní spektroskopie [4], kdy vysílač vyšle světelný signál, který se odrazí od reflektoru. Molekuly oxidu dusíku absorbují světelnou energii na vlnové délce, která odpovídá druhu plynu. Spektra NO a NO₂ jsou vyhodnocována v rozsahu 200 až 400 nm, tedy v infračervené oblasti.

Měření opacity v tunelu probíhá stejným principem. Pevné částice ovlivňující opacitu jsou vyhodnocovány v rozsahu 320 a 1000 nm, se zaměřením na vlnovou délku 560 nm. Jedná se tedy o viditelné světlo.



Obrázek 3.2: Vysílač a reflektor pro měření koncentrace oxidů dusíku a opacity [4]

Venkovní senzory pro měření oxidů dusíku, umístěné v MÚK Malovanka, pracují na jiném principu. Jedná se o chemiluminiscenční metodu [16]. Analyzovaný vzduch v blízkosti senzoru se nechá oxidovat ozonem. Oxidací je emitováno žlutozelené světlo. Díky intenzitě emitovaného záření je možné stanovení okamžitých koncentrací oxidu dusnatého, popř. směsi oxidu dusnatého a dusičitého v ovzduší (NO_x).

3.2.1.3 Vyhodnocování charakteru a stupně dopravy

Pro algoritmus řízení ventilace je dále nutná informace o charakteru a zejména počtu vozidel, které tunelem projíždějí. Pro informaci o počtu vozidel budou mezi každým výjezdem a nájezdem v tunelu zabetonovány pod vozovkou indukční smyčky. Kamerový systém navíc dokáže zjistit rychlosť jízdy vozidel a aktuální skladbu dopravy v tunelu.

3.2.2 Akční členy

3.2.2.1 Proudové ventilátory

Proudové ventilátory, tzv. „jet fans“, slouží k regulaci podélného proudění, a tím i k regulaci koncentrace zplodin v tunelu. Proudové ventilátory jsou v tunelu umístěny u stropu vždy po dvojicích nebo po trojicích. V tunelu Blanka je navrženo celkem 88 ks proudových ventilátorů, z toho 46 v severním tubusu a 42 v jižním tubusu.

Základními parametry proudových ventilátorů jsou:

- Objemový průtok vzduchu Q [m^3/s],

- Statický tah [N],
- Jmenovité otáčky [min^{-1}],
- Průměr oběžného kola [mm],
- Dopravní tlak [Pa],
- Příkon [kW].

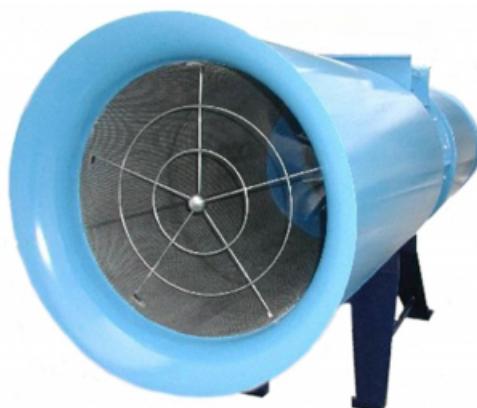
V tunelu Blanka je uvažováno se třemi typy proudových ventilátorů, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce 3.1. Podrobná tabulka rozmístění proudových ventilátorů, včetně jejich typů, je uvedena v příloze B.

typ	průtok [m^3/s]	statický tah [N]	otáčky [min^{-1}]	průměr [mm]	příkon [kW]
APWR 1250	34,5	1075	1470	1250	30
APWR 1000	27,4	1075	1480	1000	45
APWR 630	8,5	300	2940	600	8

Tabulka 3.1: Parametry proudových ventilátorů v tunelu Blanka

Některé ventilátory mají plynule regulovatelné otáčky za pomoci frekvenčních měničů. Ostatní ventilátory jsou spouštěny pomocí soft-startérů a mohou běžet pouze na jmenovité otáčky. Všechny ventilátory v tunelu jsou plynule reversibilní, tzn. že mohou měnit směr otáčení motoru, a tím brzdit rychlosť proudění v tunelu. Rozběh ventilátoru na jmenovité otáčky musí být uskutečněn nejpozději do 30 sekund.

Všechny proudové ventilátory v tunelu jsou vybaveny senzory pro indikaci směru chodu ventilátoru, senzory pro diagnostiku chodu ventilátoru (odtržení ventilátoru, teplota vinutí motoru, vibrace, apod.) a také tlumiči hluku. Všechny ventilátory jsou napájeny střídavým trojfázovým napětím 400 V.



Obrázek 3.3: Proudový ventilátor [17]

3.2.2.2 Axiální ventilátory ve strojovnách vzduchotechniky

Příčné větrání je realizováno pomocí strojoven vzduchotechniky. Ve strojovnách jsou umístěny axiální ventilátory, které mají za úkol odvádět, resp. přivádět vzduch do tunelu. Odvodem vzduchu z tunelu dochází také k odvodu nežádoucích zplodin a přivodem vzduchu do tunelu dojde k naředění zplodin, a tím i ke snížení jejich koncentrací.

V jižním tubusu tunelu Blanka jsou k dispozici tři strojovny – Střešovice, Letná a Trója. V severním tubusu pak pouze strojovny Střešovice a Letná. V tunelu je k dispozici ještě převodní strojovna Malovanka, viz. kapitola 3.3, jejímž hlavním úkolem je zvýšení účinnosti omezování výfuku znečištěného vzduchu z portálu tunelu do oblasti MÚK Malovanka při běžném provozu.

Strojovny vzduchotechniky jsou vybaveny axiálními rovnotlakými ventilátory o průměru oběžného kola od 2,5 do 3,15 m. Ve srovnání s proudovými ventilátory jsou výrazně větší a mají i větší výkon. Lopatky oběžného kola mají pevně nastavený úhel natočení.



Obrázek 3.4: Axiální ventilátor [1]

U odvodních strojoven jsou otáčky ventilátorů plynule regulovatelné pomocí měniče kmitočtu, přičemž se počítá s paralelním během všech axiálních ventilátorů. U přívodních ventilátorů nelze měnit otáčky. Množství přiváděného vzduchu lze měnit pouze počtem spuštěných ventilátorů. V tabulkách 3.2 a 3.3 jsou uvedeny využitelné kapacity jednotlivých strojoven vč. počtu axiálních ventilátorů.

strojovna	tubus	max. průtok [m³/s]	max. příkon [kW]	počet ventilátorů
Trója	jižní	300	420	3
Letná	severní	325	700	3
Letná	jižní	325	675	3
Střešovice	severní	390	510	3
Střešovice	jižní	300	505	2

Tabulka 3.2: Využitelné kapacity odvodních strojoven

strojovna	tubus	max. průtok [m³/s]	max. příkon [kW]	počet ventilátorů
Trója	jižní	150	130	1
Letná	severní	320	300	3
Letná	jižní	220	180	2
Střešovice	severní	110	82	1
Střešovice	jižní	270	235	2

Tabulka 3.3: Využitelné kapacity přívodních strojoven

3.2.2.3 Uzavírací klapky

Pro potřeby provozního větrání tunelu jsou v dělicí příčce mezi tubusy zřízeny dvě uzavírací klapky. V případě provozního větrání slouží k převodu vzduchu ze severního do jižního tubusu, a tím i k regulaci koncentrace zplodin v tunelu. V případě požáru slouží klapky k zabránění šíření kouře do druhého tubusu. Jedná se o nerezové ocelové konstrukce se servopohony, viz obr. 3.5.

Klapka s označením BV-SU 0.1 je umístěna mezi úseky 23 a 24 severního tubusu, resp. mezi úseky 4 a 5 jižního tubusu. Ve skutečnosti je tato klapka složena ze dvou částí oddelených betonovou příčkou mezi tubusy. Obě části jsou obdélníkového tvaru a mají rozměr 3950 mm na délku a 4660 mm na výšku. Tato klapka bude použita při I. stupni ochrany, viz kapitola 3.3.

Druhá klapka má označení BV-SU 0.2 a nachází se mezi úseky 24 a 25 v severním tubusu, resp. mezi úseky 1 a 2 jižního tubusu. Jedná se o soustavu tří klapek, vzájemně oddelených betonovou příčkou mezi tubusy. Všechny tři části jsou rovněž obdélníkového tvaru a mají rozměr 4200 mm na délku a 4400 mm na výšku. Tato klapka bude použita při II. stupni ochrany, viz kapitola 3.3.



Obrázek 3.5: Soustava uzavíratelných klapiek sloužících pro převod vzduchu mezi tubusy [1].

3.3 Požadavky na provozní větrání tunelu

Provozní větrání musí:

- zajistit nepřekročení limitů NO₂, NO a CO v tunelu,
- zajistit dobrou viditelnost, tedy minimalizovat opacitu v tunelu,
- minimalizovat výnos zplodin z portálů Malovanka severního tunelu a z ramp U Vorlíků a na Prašném mostě v obou tubusech,
- zajistit co nejmenší příkon elektrické energie.

Limitní hodnoty škodlivin v tunelu, uvedené v tabulce 3.4, byly stanoveny na základě doporučení světové silniční asociace PIARC [14], pak podle CETU [5] tak, aby byly v souladu s příslušnými právními předpisy ČR (NV č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci a nařízení č. 597/2006 Sb. o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší).

veličina ³	NPK	PEL
oxid uhelnatý	70 ppm	-
oxidy dusíku	10 mg/m ³	-
oxid dusičitý	1000 µg/m ³	0,4 ppm (820 µg/m ³)
opacita	0,005 m ⁻¹	-

Tabulka 3.4: Limitní hodnoty koncentrací škodlivin

Čerstvý vzduch bude nasáván primárně portály a rampami. Výnos z portálů Malovanka severního tunelu bude minimalizován pomocí axiálních ventilátorů strojoven Letná, Střešovice a Malovanka a proudových ventilátorů v tunelech. Kromě přirozeného proudění, kdy je tunel provětráván převážně působením pístového efektu vozidel, bude větrání provozováno ve dvou stupních:

- **I. stupeň ochrany - s přirozeným převodem znečištěného vzduchu do jižního tubusu**

Během prvního stupně ochrany provozního větrání bude minimalizován výnos zplodin z portálů Malovanka severního tubusu pomocí strojovny Střešovice a případně proudových ventilátorů v úsecích 21-23 severního tubusu. Vzduch ze severního tubusu bude přirozeně převáděn převodní klapkou BV-SU 0.1 do jižního tubusu, viz obr. C.2, příloha C.

I. stupeň ochrany je ekonomicky a energeticky výhodnější než II. stupeň ochrany, avšak nedokáže poskytnout plnou ochranu výjezdových portálů, a to především portálů Malovanka, před výnosem zplodin.

- **II. stupeň ochrany - s nuceným převodem znečištěného vzduchu do jižního tubusu**

Během druhého stupně ochrany provozního větrání bude minimalizován výnos zplodin z portálů Malovanka severního tubusu pomocí strojovny Letná a Střešovice vč. proudových ventilátorů v celém severním tunelu. Vzduch ze severního tubusu bude částečně přirozeně a částečně nuceně převáděn klapkou BV-SU 0.2 do jižního tubusu a strojovna Malovanka bude navíc nuceně převádět vzduch z páteřního tunelu Městského okruhu (úsek 27) a z rampy R5 severního tubusu do rampy R1

³NPK - nejvyšší přípustná koncentrace, PEL - přípustný expoziční limit. Během 15 minut nesmí dojít k překročení průměrné hodnoty koncentrace po celé délce tunelu.

jižního tubusu, viz obr. C.3, příloha C. V ideálním případě jsou portály na Malovance, tedy úsek 28 a rampa R5 v severním tubusu a úsek 1 a rampa R1 jižního tubusu, uvedeny do podtlaku, a tudíž je jimi nasáván vzduch. Situace v místě MÚK Malovanka je detailněji popsána v kapitole 3.3.1.

V tomto stupni ochrany bude navíc minimalizován také výnos zplodin ze všech paralelních výjezdových ramp po celé délce severního a jižního tunelového tubusu.

Toto jsou však jen obecné požadavky na provozní větrání. O tom, jaké akční členy (proudové ventilátory a strojovny), budou během obou stupňů ochrany spuštěny, rozhodne řídicí algoritmus, který je podrobně popsán v kapitole 5.1.

Regulace bude plně automatická se zpětnou vazbou od měření koncentrací a rychlostí proudění v tunelu. Řídicí algoritmus bude důkladně otestován na simulačním modelu, viz kapitola 4.

3.3.1 Situace v místě mimoúrovňové křižovatky Malovanka

Minimalizace výnosu zplodin v oblasti MÚK Malovanka v rámci II. stupně ochrany je nejsložitějším procesem z hlediska provozního větrání. Navržené stavebně technologické opatření, které má zajistit minimalizaci výnosu zplodin do oblasti MÚK Malovanka, představuje převodní strojovna vzduchotechniky a uzavíratelné klapky v dělicí příčce mezi severním a jižním tubusem.

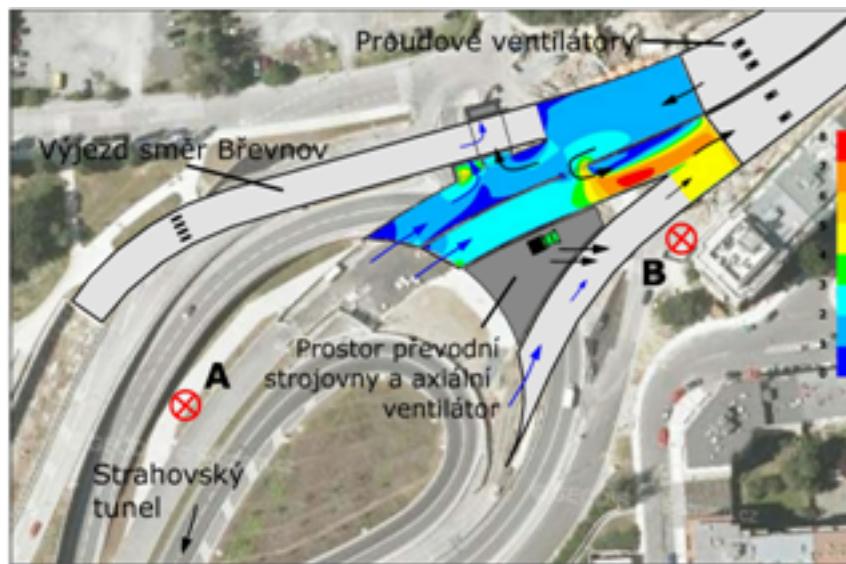
Ideální provozní stav demonstruje obrázek 3.6. Při dostatečné intenzitě provozu dochází vlivem pístového účinku k nasávání vzduchu vjezdovými portály Malovanka jižního tubusu. Při nízké hustotě provozu může být ke splnění této podmínky využito nucené regulace proudění pomocí proudových ventilátorů v tunelu. Nasávání vzduchu výjezdovými portály bude zaručeno využitím převodní strojovny Malovanka, odvodní strojovny Střešovice a také brzdného účinku proudových ventilátorů v tunelu [15].

V místech označených písmeny A a B jsou umístěny odběry kontinuálního měření imisí oxidů dusíku. Z těchto dvou odběrů bude kontinuálně probíhat vyhodnocení měření znečištění, na základě kterého bude spuštěn systém provozního větrání v daném stupni ochrany. Míra znečištění okolí, která bude rozhodující pro spuštění provozního větrání tunelu Blanka, bude sledována pomocí odběru vzorku v referenčním místě B, které je navíc zatíženo také znečištěním pozadí způsobeným jinými zdroji (především doprava na okolních komunikacích) než jsou portály tunelu. Míra znečištění způsobená vlivem vyfukovaného vzduchu z portálu je sledována pomocí odběru A v kombinaci s měřením

3.3. POŽADAVKY NA PROVOZNÍ VĚTRÁNÍ TUNELU

19

koncentrace uvnitř tunelu.



Obrázek 3.6: Situace v místě MÚK Malovanka, šipky označují směr proudění vzduchu [15]

Kapitola 4

Simulátor vzduchotechniky

4.1 Účel simulace

Výsledkem diplomové práce je simulátor vzduchotechniky tunelového komplexu Blanka. Účelem simulátoru je podat podklady pro stanovení strategie řízení chodu provozního větrání. Simulátor bude navíc použit pro testování algoritmu regulace a řízení ještě před dokončením a uvedením stavby tunelu Blanka do provozu. Simulátor byl naprogramován ve výpočetním programu MATLAB, který dokáže velmi rychle a efektivně celý problém vzduchotechniky řešit. Simulací je možné:

- stanovit průtoky v jednotlivých úsecích tunelového tělesa při různých dopravních scénářích,
- stanovit koncentrace škodlivin NO_x , CO a opacity při různé skladbě a intenzitě dopravy,
- zjistit účinky jednotlivých akčních členů, t.j. proudových ventilátorů, vzduchotechnických strojoven a uzavíracích klapek mezi tubusy,
- stanovit, kdy nestačí pístový účinek vozidel pro odvětrání škodlivin,
- otestovat minimalizaci výnosu zplodin ze severního tubusu a ochranu portálů při I. a II. stupni ochrany provozního větrání, více viz kapitola 3.3.

Simulátor byl vytvořen ve dvou provedeních - **statickém** a **dynamickém**.

Statická, tež ustálená verze simulátoru, slouží k co nejrychlejšímu a pohodlnému ověření různých tunelových scénářů, které mohou nastat. V této verzi je vždy na základě vstupních dat (skladba a intenzita dopravy, nastavení ventilátorů a strojoven) vypočten

vždy jen jeden krok simulace. Nepočítá se tedy s vývojem proudění, emisí i dopravní situace v čase.

Naopak dynamická verze simulátoru slouží k otestování scénářů v tunelu během delšího časového horizontu, jako např. jeden den. Dynamická verze tedy uvažuje vývoj systému v čase.

4.2 Struktura simulátoru

Simulátor lze reprezentovat jako vstupně-výstupní systém. Součástí tohoto systému jsou tři na sobě závislé modely:

1. dopravní model

vstupy:

intenzita dopravy na portálech

skladba dopravy

výstupy:

ekvivalentní počet vozidel, viz kapitola 4.3.2

rychlost jízdy vozidel

2. model proudění

vstupy:

ekvivalentní počet vozidel

skladba dopravy

rychlost jízdy vozidel

nastavení ventilátorů a strojoven

stupeň ochrany provozního větrání

výstupy:

rychlost a směr proudění

3. model emisí

vstupy:

ekvivalentní počet vozidel
skladba dopravy
rychlosť jízdy vozidel
rychlosť a směr proudění
koncentrace škodlivin vně tunelu
stupeň ochrany provozního větrání

výstupy:

koncentrace škodlivin v tunelu
míra opacity v tunelu

4.3 Dopravní model

4.3.1 Statistické dopravní údaje

Údaje o dopravě jsou vstupními daty jak pro model proudění, tak pro model emisí. Typů automobilů, které mohou tunelem projet je celá řada, od osobních automobilů přes autobusy až po motocykl. Z hlediska počtu vozidel, které tunelem projedou jsou však nejdůležitější osobní automobily s benzínovým a dieselovým motorem a lehké a těžké nákladní automobily. Podle emisního modelu společnosti Atem s.r.o. bylo v Praze pro rok 2012 počítáno s následujícím rozdělením dopravních typů:

- Osobní benzínové automobily – 52 %
- Osobní dieselové automobily – 40 %
- Lehké nákladní automobily – 5 %
- Těžké nákladní automobily – 3 %

Pro dynamický model dopravy je nutná znalost denní časové variance automobilů a celkové denní průjezdnosti vozidel na všech portálech tunelu. Všechny tyto informace jsou přehledně uvedeny v příloze D.

Z hlediska zplodin je dále důležité rozdělení podle emisní normy EURO. V současnosti známe pět druhů této emisní kategorie:

- PRE EURO¹ do roku 1992
- EURO 1 od r. 1992
- EURO 2 od r. 1996
- EURO 3 od r. 2000
- EURO 4 od r. 2005
- EURO 5 od r. 2009²

Graf procentuálního rozdělení jednotlivých typů vozidel podle emisní normy EURO je pro Městský okruh v Praze uveden v příloze E.

4.3.2 Statický model dopravy

Ve statické verzi simulátoru je vypočítáván tzv. **ekvivalentní počet vozidel**. Ekvivalentní počet vozidel definuje okamžitý počet vozidel v danou chvíli v daném úseku tunelu. Jeho výpočet je založen na znalosti rychlosti jízdy vozidel a intenzity dopravy v jednotlivých úsecích tunelu:

$$N = \frac{I \cdot L}{v \cdot 1000} \quad (4.1)$$

kde:

- N – ekvivalentní počet vozidel [-],
 I – hodinová intenzita vozidel v úseku [voz/h],
 L – délka úseku tunelu [m],
 v – rychlosť jízdy vozidel [km/h].

Ekvivalentní počet vozidel je vstupní hodnotou pro pístový účinek vozidel, viz rovnice (4.9) a pro statický výpočet zplodin v tunelu, viz kapitola 4.5.1.

¹Do kategorie PRE EURO spadají také vozidla, která nesplňují technický stav.

²Vozidla s emisní normou EURO 6 přijdou na trh až v roce 2014.

4.3.3 Dynamický model dopravy

Dynamický model dopravy byl vytvořen v programovacím jazyku JAVA. Model byl naprogramován na základě tzv. **mikromodelu**. Základem mikromodelu je myšlenka, že všechny automobily, které projíždějí tunelem jsou uchovávány v paměti. Mikromodelu existuje celá řada, pro tunel Blanka byl použit model IDM (Intelligent–Driver–Model), který je detailně popsán v [18].

Každý automobil je reprezentován jako objekt, který má následující vlastnosti:

- pozice v tunelu, na které se nachází,
- okamžitá rychlosť,
- číslo pruhu, ve kterém se nachází.

Rychlosť automobilu v tunelu je definována pomocí diference jeho polohy v čase:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Zrychlení řidiče pak závisí na jeho rychlosti a vzdálenosti od nejbližšího automobilu vpředu:

$$acc = \frac{\Delta v}{\Delta t} = a \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

kde:

$$s^* = s_0 + \min \left(0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right) \quad (4.4)$$

kde:

- x je aktuální pozice automobilu [m],
- v je okamžitá rychlosť automobilu [m/s],
- acc je aktuální zrychlení automobilu [m/s²],
- s je okamžitá vzdálenost automobilu od nejbližšího automobilu vpředu [m],
- s^* je požadovaná vzdálenost automobilu od nejbližšího automobilu vpředu [m].

Ostatní symboly v rovnicích (4.3) a (4.4) jsou konstanty, které respektují reálný provoz v tunelu. Konstanty byly pro tunel Blanka zvoleny podle [18] a jsou uvedeny v tabulce 4.1. Celý model pak pracuje tak, že z rovnice (4.3) nejprve analyticky vypočte hodnotu zrychlení a posléze numericky rychlosť každého automobilu v následujícím kroku. Z rovnice (4.2) pak vypočítá jeho následující aktuální pozici. Časový krok výpočtu dopravního modelu byl zvolen 0,1 sekundy.

konstanta	význam	hodnota os. automobily	hodnota nákl. automobily
a	maximální možné zrychlení automobilů	0,3 m/s ²	0,3 m/s ²
b	maximální možné zpomalení automobilů	3 m/s ²	2 m/s ²
v ₀	maximální povolená rychlosť automobilů	70 km/h	70 km/h
s ₀	minimální možná vzdáenosť mezi automobily	2 m	2 m
T	bezpečná doba průjezdu mezi automobily	1,5 s	1,7 s
δ	koeficient zrychlení	4	4

Tabulka 4.1: Zvolené konstanty dopravního mikromodelu

Aby celý model fungoval, je ještě nutné definovat podmínky pro přejízdění mezi pruhy, např. při přejízdění pomalejších vozidel nebo při odbočování na křižovatkách. Tyto podmínky definuje např. Lane-Change Model MOBIL, který je popsán v [12].

Ke změně pruhu automobilu dojde tehdy, pokud jsou splněny dvě podmínky. První z nich říká, že potencionální zpomalení automobilu, které je v pruhu vedle, musí být bezpečné, t.j. automobil, který odbočí do jiného pruhu, nesmí „příliš“ ohrozit řidiče, který v tomto pruhu jede.

$$acc'(B') > -b_{\text{safe}} \quad (4.5)$$

A druhá podmínka říká, že ke změně pruhu dojde tehdy, pokud je to pro daný automobil výhodné:

$$acc'(M') - acc(M) > p \cdot [acc(B) + acc(B') - acc'(B) - acc'(B')] + a_{\text{thr}} \quad (4.6)$$

kde:

- b_{safe} – konstanta určující bezpečné zpomalení řidiče jedoucího ve vedlejším pruhu,
- $acc'(M')$ – potencionální zrychlení vozidla po změně pruhu,
- $acc(M)$ – aktuální zrychlení vozidla,
- $acc(B)$ – aktuální zrychlení vozidla za sebou,
- $acc(B')$ – aktuální zrychlení vozidla ve vedlejším pruhu,
- $acc'(B)$ – potencionální zrychlení vozidla za sebou,
- $acc'(B')$ – potencionální zrychlení vozidla ve vedlejším pruhu.

Výraz na levé straně kritéria (4.6) je vlastně zisk vozidla v podobě zrychlení, způsobený změnou pruhu. Výraz v závorce na pravé straně kritéria bere ohled na aktuální a potencionální zrychlení vozidla za sebou a vozidla ve vedlejším pruhu. Čím bude potencionální

zrychlení vozidla za sebou větší, tím jednodušeji dojde ke splnění kritéria a automobil se vlastně bude snažit uhnout, a tím umožnit průjezd rychlejšího automobilu jedoucího za sebou. Čím bude menší zrychlení automobilu ve vedlejším pruhu, tím dojde k naplnění kritéria také snázeji, protože automobil bude mít více odvahy do vedlejšího pruhu vjet.

Konstanty p a a_{thr} slouží k naledění celého modelu. Konstanta p je tzv. politeness factor, který vlastně reprezentuje chování řidiče. Pokud:

- $p > 1$, pak se jedná o velmi altruistické chování, kdy vozidla zbytečně neriskují a do vedlejšího pruhu přejedou jen sporadycky a snaží se více pouštět rychlejší automobily jedoucí za sebou.
- $p \in (0; 0,5)$ odpovídá realistickému chování běžného provozu.
- $p = 0$, čistě egoistické chování, automobily přejíždějí mezi pruhy častěji, než odpovídá běžnému provozu a méně se ohlíží na automobily jedoucí za sebou.
- $p < 0$, zákeřné škodolibé chování, automobily přejíždějí mezi pruhy extrémně často a to tak, aby záměrně jinému automobilu vjely do cesty.

Pro simulační model se hodnota p pro každý automobil náhodně mění v rozsahu $p \in (0; 0,5)$.

Konstanta a_{thr} představuje jakýsi práh zrychlení, od kterého může dojít ke změně pruhu. Tím je možné zavést do mikromodelu jakousi hysterezi.

4.4 Model proudění

4.4.1 Síly působící v tunelu

Proudění nestlačitelné tekutiny v trubici nejlépe popisuje parciální diferenciální Navier-Stokesova rovnice. Navierova-Stokesova rovnice je analyticky řešitelná jen v několika málo případech jednoduchých toků. Jen sestavení těchto rovnic vč. okrajových podmínek pro celý tunelový komplex Blanka by bylo prací na mnoho let. Z tohoto důvodu byl pro popis proudění zvolen jednodušší způsob, a sice popis jednorozměrného proudění pomocí Bernoulliho rovnic. Odvození Bernoulliho rovnice lze najít v mnoha dostupných zdrojích, např. [11]. Zápis Bernoulliho rovnice může být následující:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konst.} \quad (4.7)$$

Součet tlaku a kinetické energie tekutiny vztažené na jednotku objemu je ve všech místech trubice konstantní. Bernoulliho rovnice platí i pro obecný tunel, ten má totiž tvar trubice a tekutinou proudící v trubici je vzduch.

V tunelech se uplatňuje mnoho vlivů, které zvyšují celkový tlak v tunelu (tlakový zisk). Jedná se o pístový efekt projíždějících vozidel, účinek proudových ventilátorů a příčně napojených strojoven, výškové převýšení portálů a vliv síly větru na portály. Převýšení portálů tunelu Blanka je však nevýznamné, tlaková změna způsobená tímto efektem je relativně malá ve srovnání s jinými tlakovými změnami, proto jsme se rozhodli ji zanedbat. Taktéž byl zanedbán vliv větru na portály tunelu, který je v městské aglomeraci poměrně nevýznamný vzhledem k ostatním dominantnějším účinkům.

Na straně druhé vznikají v tunelech tlakové ztráty způsobené především třením vzduchu a místními odpory, mezi které řadíme ztráty vstupem a výstupem a ztráty způsobené geometrií tunelu, jako je změna průřezu nebo dělení či spojování proudů za křižovatkami (rampami).

Statický a dynamický model proudění v simulátoru vzduchotechniky se příliš neliší. Při nestacionárním (dynamickém) proudění je nutno část energie vynaložit na urychlení tekutiny a Bernoulliho rovnice je rozšířena o člen lokálního zpoždění (setrvačnou energii).

Po zahrnutí těchto vlivů lze rovnici (4.7) přepsat na tvar:

$$\Delta p_{PE} + \Delta p_{JF} - \Delta p_{FRIC} - \Delta p_Z - \Delta p_{LOC} = \text{konst.} \quad (4.8)$$

kde:

Δp_{PE} je pístový efekt projíždějících vozidel,

Δp_{JF} je tlakový zisk (či ztráta) způsobena proudovými ventilátory,

Δp_{FRIC} jsou tlakové ztráty třením,

Δp_Z jsou tlakové ztráty způsobené místními odpory,

Δp_{LOC} značí lokální zpoždění tekutiny.

Pojďme se nyní podívat, co jednotlivé členy rovnice (4.8) fyzikálně reprezentují a jak je lze vypočítat:

Pístový efekt projíždějících vozidel – Δp_{PE} :

Automobily uvádějí vzduch v tunelu do pohybu. Pokud je jejich rychlosť vyšší než rychlosť

proudění ($v > u$), pak pístový účinek vyjadřuje tlakový zisk a člen Δp_{PE} je kladný. Pokud dojde k situaci, kdy je rychlosť vozidel nižší než rychlosť proudění, např. za kongesce, pak pístový účinek snižuje celkový tlak v tunelu a jedná se o tlakovou ztrátu. Simulátor postihuje situace při proudění ve směru jedoucích aut, kdy je počítáno s relativní rychlostí ($v-u$) a také při proudění proti jedoucím autům, kdy je relativní rychlosť ($v+u$).

Tuto skutečnost lze vyjádřit matematickým vztahem:

$$\Delta p_{PE} = \text{sgn}(v - u) \cdot \frac{(N \cdot C_v \cdot A_v)_{PC} + (N \cdot C_v \cdot A_v)_{LT} + (N \cdot C_v \cdot A_v)_{HT}}{A_T} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot (v - u)^2 \quad (4.9)$$

kde

v – rychlosť jízdy vozidel [m/s],

u – rychlosť proudění v tunelu [m/s], kladná pokud vzduch proudí ve směru jedoucích automobilů, záporná při proudění proti jedoucím automobilům,

N – ekvivalentní počet vozidel [-], viz kapitola 4.3.2,

$C_v A_v$ – účinná čelní plocha vozidel [m^2], bylo počítáno s následujícími účinnými čelními plochami vozidel:

0,7 m^2 pro osobní (PC), 2,4 m^2 pro lehké nákladní (LT) a 5,6 m^2 pro těžké nákladní automobily (HT). Uvedené účinné plochy vozidel platí pro rychlosti jízdy $v=70$ km/h a vyšší a při nižších rychlostech se zmenší [8]. Závislost součinitele odporu C_v na rychlosti automobilů v [km/h] lze approximovat vztahem:

$$C_v \approx 2 \cdot 10^{-5} v^2 + 0,004v + 0,474 \quad (4.10)$$

ρ – hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$], bylo uvažováno s hustotou vzduchu 1,23 $kg \cdot m^{-3}$,

A_T – průřez tunelu v jeho daném místě [m^2]

Tlakový účinek způsobený proudovými ventilátory – Δp_{JF} :

Tlakový příspěvek vyvolaný tahem proudového ventilátoru v závislosti na otáčkách a rychlosti proudění vzduchu v tunelu se vyjádří jako:

$$\Delta p_{JF} = \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}^2}{n_{ref}^2 A_{JF} A_T} n \cdot |n| + \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}}{n_{ref} A_T} n \cdot u \quad (4.11)$$

kde:

η_{JF} – účinnost přeměny tahu na tlak [-]. Zahrnuje v sobě korekci umístění vlivu proudových ventilátorů v tunelu. Např. v literatuře [13] lze najít přesný postup pro výpočet korekce účinnosti přeměny tahu na tlak pro proudové ventilátory. Ze zkušenosti bylo počítáno s hodnotou $\eta_{JF}=0,8$ pro všechny proudové ventilátory v tunelu,

n – otáčky ventilátoru, kladné pokud ventilátor podporuje rychlosť proudění ve směru jízdy vozidel, záporná pokud rychlosť proudění brzdí. Výraz $|n|$ respektuje brzdný chod ventilátoru, kdy je celkový tlak v úseku vlivem spuštění ventilátoru snižován,

n_{REF} – jmenovité otáčky proudového ventilátoru,

Q_{REF} – jmenovitý průtok proudového ventilátorem,

A_{JF} – účinná plocha oběžného kola ventilátoru.

Konkrétní parametry proudových ventilátorů v tunelu Blanka, vč. jmenovitých otáček, průtoků a účinných ploch oběžného kola jsou uvedeny v tabulce 3.1 v kapitole 3.2.2.1.

Tlaková ztráta způsobená třením vzduchu – Δp_{FRIC} :

Stěny v tunelu kladou proudícímu vzduchu odpor, a to se projeví na snížení celkového tlaku v úseku tunelu. Tlakovou ztrátu třením lze vypočítat pomocí vztahu:

$$\Delta p_{FRIC} = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \quad (4.12)$$

kde:

λ – součinitel tření [-], pro jeho výpočet byl zvolen vztah podle Swameeho, který upravil prof. Hemzal [9]:

$$\lambda = \frac{1,318}{\left[\ln \left(\frac{\epsilon}{3,7D_h} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4.13)$$

kde:

ϵ – relativní drsnost [m], bylo počítáno s hodnotou $\epsilon=0,015$ m,

D_h – hydraulický průměr tunelu [m],

Re – Reynoldsovo číslo [-], podobnostní číslo, které udává, zda je proudění laminární nebo turbulentní. Reynoldsovo číslo závisí na rychlosti proudění a na viskozitě dle vzorce:

$$Re = \frac{u \cdot D_h}{\nu} \quad (4.14)$$

ν – viskozita vzduchu, bylo uvažováno s hodnotou $\nu = 15,07 \cdot 10^{-6}$ Pa · s.

Tlaková ztráta způsobená místními odpory – Δp_Z :

Obecně lze tyto ztráty vyjádřit vztahem:

$$\Delta p_Z = \sum_i \zeta_i \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \quad (4.15)$$

kde:

ζ_i – součinitel tlakové ztráty.

První ztrátou, kterou řadíme ke ztrátě místními odpory, je ztráta vlivem vstupu a výstupu proudu vzduchu z portálů tunelového tělesa.

- **Ztráty vstupem a výstupem**

Velikost tlakové ztráty způsobené vstupem proudu vzduchu do tunelového tělesa lze vypočítat jako:

$$\Delta p_{in} = \frac{1}{2} \rho \cdot \zeta_{in} \cdot u^2 \quad (4.16)$$

a tlakovou ztrátu způsobenou výstupem proudu vzduchu z tunelového tělesa:

$$\Delta p_{out} = \frac{1}{2} \rho \cdot \zeta_{out} \cdot u^2 \quad (4.17)$$

kde:

$$\zeta_{in} = 0,5,$$

$$\zeta_{out} = 1$$

Dalším z faktorů, které způsobují tlakovou ztrátu místními odpory, je změna průřezu tunelového tělesa.

- **Zúžení**

$$\zeta_i = \frac{\Delta p}{\rho u_0^2/2} = C_r \cdot \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^{0,75} \quad (4.18)$$

kde:

C_r – Koeficient tvaru přechodu byl zvolen 0,5 jako nejnepříznivější možný případ přechodu.

- **Rozšíření**

$$\zeta_i = \frac{\Delta p}{\rho u_0^2/2} = \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2 \quad (4.19)$$

index „0“ přísluší vždy k menšímu průřezu ze dvou, a to jak u náhlého zúžení, tak u náhlého rozšíření.

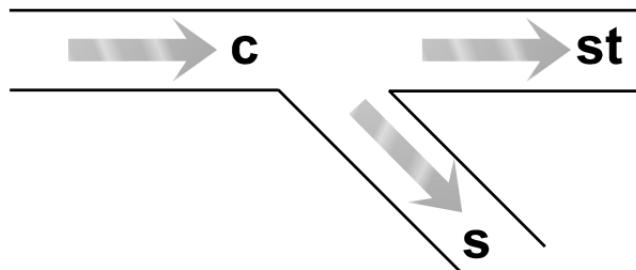
Ke ztrátě místními odpory dochází také v důsledku rozdělení a spojení proudů v tunelové křižovatce. Tlakové ztráty při dělení nebo spojení proudů se uplatní vždy v přímé větvi – Δp_{st} a boční větvi – Δp_s . Tyto tlakové ztráty jsou ale vždy vztaženy k rychlosti ve společném úseku z hlediska směru toku:

$$\Delta p_{st} = \frac{1}{2} \rho \cdot \zeta_{c,st} \cdot u_c^2 \quad (4.20)$$

$$\Delta p_s = \frac{1}{2} \rho \cdot \zeta_{c,s} \cdot u_c^2 \quad (4.21)$$

Pro jednoduchou křižovatku na obr. 4.1 lze různými kombinacemi směru proudění v jednotlivých větvích dosáhnout celkem šesti případů buď spojování nebo dělení proudů. V simulačním modelu proudění jsou všechny tyto případy zohledněny. Za dostatečně přesné byly shledány a ověřeny analytické závislosti pro výpočet tlakových ztrát publikované I.E. Idělcíkem v 60. a 70. letech minulého století. Vzorce pro výpočet těchto tlakových ztrát lze nalézt např. v [10].

- **Dělení proudů pod úhlem 0-90°**



Obrázek 4.1: Dělení proudů pod úhlem 0-90°

$$\zeta_{c,s} = B' \cdot \left(1 + \left(\frac{u_s}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{u_s}{u_c} \cos \alpha \right) - K'_s \left(\frac{u_s}{u_c} \right)^2 \quad (4.22)$$

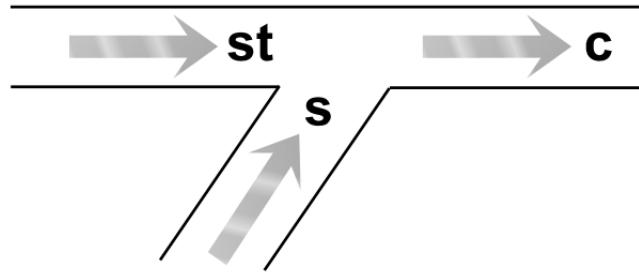
Pokud platí, že $A_s + A_{st} > A_c$ a $A_{st} = A_c$ ³

$$\zeta_{c,st} = \tau_{st} \left(\frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 \quad (4.23)$$

Pokud platí, že $A_s + A_{st} = A_c$ a úhel odbočky je 15-60°⁴

$$\zeta_{c,st} = 0,9786 \left(\frac{u_{st}}{u_c} \right)^3 - 0,8393 \left(\frac{u_{st}}{u_c} \right)^2 - 1,141 \left(\frac{u_{st}}{u_c} \right) + 0,9332 \quad (4.24)$$

- **Spojování proudů pod úhlem 0-90°**



Obrázek 4.2: Spojování proudů pod úhlem 0-90°

$$\zeta_{c,s} = B \cdot \left(1 + \left(\frac{u_s}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_{st}}{A_c} \left(\frac{u_{st}}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_s}{A_c} \left(\frac{u_s}{u_c} \right)^2 \cos \alpha \right) \quad (4.25)$$

Pokud platí, že $A_s + A_{st} > A_c$ a $A_{st} = A_c$

$$\zeta_{c,st} = 1 - \left(1 - \frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 - \left(1,4 - \frac{Q_s}{Q_c} \right) \left(\frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 \sin \alpha - 2K'_{st} \frac{A_c}{A_s} \frac{Q_s}{Q_c} \cos \alpha \quad (4.26)$$

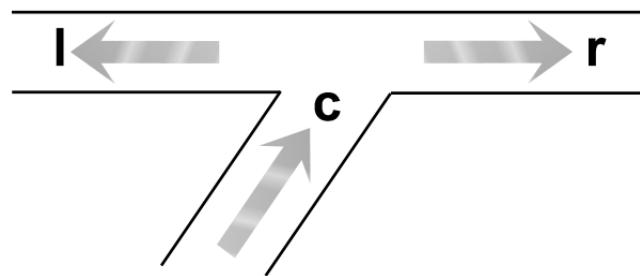
A pokud platí, že $A_s + A_{st} = A_c$

$$\zeta_{c,st} = 1 + \left(\frac{u_{st}}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_{st}}{A_c} \left(\frac{u_{st}}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_s}{A_c} \left(\frac{u_s}{u_c} \right)^2 \cos \alpha + K''_{st} \quad (4.27)$$

³Tato podmínka není obvykle splněna, průřez tunelu se za křižovatkou skokově mění. Přibližně lze však tento vztah pro určení tlakové ztráty použít.

⁴Poznamenejme, že případ $A_s + A_{st} = A_c$ se uplatní jen u rampy 5 (výjezd Malovanka) severního tunelového tubusu.

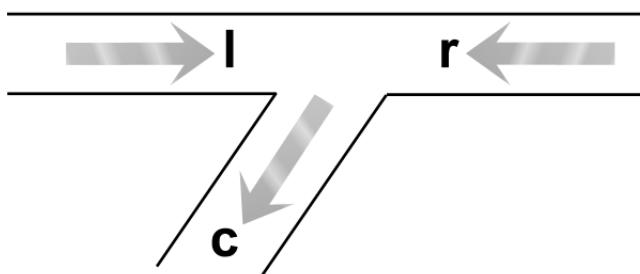
- „T“ rozbočka



Obrázek 4.3: Rozbočka typu „T“

$$\zeta_{c,i} = 1 + k \left(\frac{u_s}{u_c} \right)^2 \quad (4.28)$$

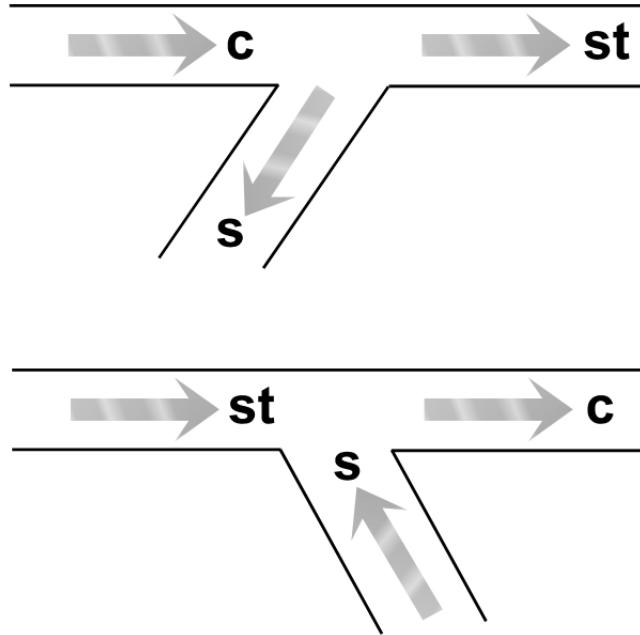
- „T“ spojení



Obrázek 4.4: Spojení typu „T“

$$\zeta_{c,i} = 1 + \left(\frac{A_c}{A_s} \right)^2 + 3 \left(\frac{A_c}{A_s} \right)^2 \cdot \left(\left(\frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 - \frac{Q_s}{Q_c} \right) \quad (4.29)$$

- Dělení a spojování proudů pod úhlem větším než 90°



Obrázek 4.5: Dělení a spojování proudů pod úhlem větším než 90°

Tento případ se uplatní v případech, kdy vzduch na tunelových rampách proudí proti jedoucím vozidlům. I když v současné době neznáme analytické vztahy pro výpočet těchto tlakových ztrát, byly pro jejich výpočet použity vzorce (4.22), (4.23), (4.25) a (4.26), kde úhel odbočení či spojení byl uvažován větší než 90° .

Indexy s, st a c podle obrázků 4.1 a 4.2 vždy značí:

- s - boční větev,
- st - přímou větev,
- c - společnou větev,
- i - pravou nebo levou větev při „T“ spojení či rozdelení.

Koefficienty B , B' , K_{st}' , K_{st}'' , τ a k jsou funkcií $f(A_s/A_c, Q_s/Q_c, \alpha)$, přičemž jejich konkrétní hodnoty lze nalézt v uvedené literatuře [10].

Tlaková ztráta způsobená lokálním zpožděním vzduchu – Δp_{LOC} :

V dynamické verzi simulátoru, kdy se proudění vyvíjí v čase, je uvažováno ještě s lokálním zpožděním tekutiny, které vlastně reprezentuje přechodový děj. Lokální zpoždění tekutiny

se označuje a_t a obecně je definováno jako:

$$a_t = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.30)$$

Tlakovou ztrátu způsobenou lokálním zpožděním můžeme uvažovat jako:

$$dp = \frac{dF}{dS} \quad (4.31)$$

podle druhého Newtonova pohybového zákona lze sílu působící v tunelu rozepsat jako:

$$dp = \frac{dm \frac{\partial u}{\partial t}}{dS} = \frac{\rho dV \frac{\partial u}{\partial t}}{dS} = \rho dl \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.32)$$

integrací levé i pravé strany rovnice (4.32) dostáváme:

$$p = \rho \cdot \int_0^L \frac{\partial u}{\partial t} dl \quad (4.33)$$

Protože jsme tunel rozdělili na mnoho úseků s konstantní délkou, průřezem i stoupáním, je lokální zpoždění tekutiny po celé délce úseku konstantní, a tudíž lze vztah (4.33) napsat jako:

$$\Delta p_{LOC} = \rho \cdot L \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.34)$$

4.4.2 Aerodynamické schéma

V tunelu Blanka se nacházejí pouze jednoduché křižovatky, výjezdové a příjezdové rampy, viz obr. 2.3.

Každou takovou tunelovou křižovatku lze z hlediska proudění popsat pomocí jedné rovnice kontinuity a dvou pohybových Bernoulliho rovnic. V soustavě těchto úseků, které na sebe navazují a tvoří sériově-paralelní síť musí platit podmínka kontinuity a podmínka rovnosti tlaků v rozbočkách. Analogicky lze na to pohlížet pomocí Kirchhoffových zákonů, které jsou důvěrně známy z elektrotechniky. První Kirchhoffův zákon říká, že součet proudů, které vtékají a vytékají z uzlového bodu musí být roven nule. Zde budeme analogicky místo proudu uvažovat objemový průtok. Druhý Kirchhoffův zákon platí pro uzavřenou smyčku. Součet napětí na spotřebičích a zdrojích v jednoduché smyčce musí být roven nule. V hydrodynamickém názvosloví je napětí analogií tlaku. Matematicky lze Kirchhoffovy zákony pro hydrodynamiku formulovat následovně:

$$1. \sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (4.35)$$

$$2. \sum_{i=1}^n p_i = 0 \quad (4.36)$$

Pro jednoduchost můžeme ukázat, jak by vypadal matematický popis proudění pro křížovatku zobrazenou na obr. 4.1. Pro dělení proudů platí rovnice kontinuity (první Kirchhoffův zákon):

$$Q_c = Q_{st} + Q_s \quad (4.37)$$

Po vyjádření pomocí rychlosti proudění:

$$A_c u_c = A_{st} u_{st} + A_s u_s \quad (4.38)$$

Dále platí dvě Bernoulliho rovnice, protože v ustáleném stavu musí být tlaky v rovnováze (druhý Kirchhoffův zákon):

$$\Delta p_c + \Delta p_{st} = 0 \quad (4.39)$$

$$\Delta p_c + \Delta p_s = 0 \quad (4.40)$$

Výrazy Δp_c , Δp_{st} a Δp_s lze rozepsat se všemi tlakovými příspěvky podle rovnice (4.8). Tím vznikne nelineární soustava tří rovnic se třemi neznámými – rychlostmi proudění v jednotlivých úsecích.

Celý tunel Blanka lze tedy pomocí těchto rovnic popsat. Soustava rovnic se řeší v programu MATLAB, kde lze s výhodou použít funkci *fsolve*, která řeší soustavu numericky, např. pomocí algoritmu *Levenberg-Marquardt*. Zapsání těchto rovnic do textového souboru programu MATLAB by však bylo velice zdlouhavé a mohlo by zapříčinit mnoho chyb způsobených nepozorností a nepřehledností zdrojového kódu. Pro ulehčení práce jsem vytvořil automatický generátor soustavy rovnic, který lze v budoucnu využít při práci na jiných tunelech⁵.

4.5 Emisní model

Produkce emisí automobilu závisí na tzv. **emisním faktoru**. Emisní faktor škodliviny je veličina udávaná v jednotce g/km, jejíž hodnota závisí na typu automobilu, emisní normě

⁵Generátor je schopen vygenerovat rovnice pro silniční tunely podobné tunelu Blanka, tedy tunelu s výjezdovými a příjezdovými rampami a převodními klapkami mezi tubusy.

EURO, rychlosti jízdy automobilu a sklonu vozovky. Koncentrace škodlivin pak závisí na emisním faktoru a objemovém průtoku v tunelu.

Emisní faktory byly vypočteny pomocí programu MEFA 06, který je vyvíjen pod záštitou firmy Atem spol. s r.o.

4.5.1 Ustálená verze výpočtu emisí

Algoritmus ustálené (statické) verze výpočtu emisí probíhá v několika krocích:

1. Výpočet emisního faktoru na základě interpolace dat
2. Výpočet vlastní emise v každém úseku tunelu
3. Výpočet kumulované emise na konci každého úseku tunelu
4. Výpočet koncentrací zplodin na konci každého úseku tunelu

Program MEFA 06 poskytuje emisní faktory⁶ pro mnoho druhů škodlivin, které se uvolňují při spalování. Pro nás jsou nejdůležitější hodnoty NO_x , CO a primární prašnosti (PM10). Program MEFA 06 bohužel nezohledňuje výpočet sekundární prašnosti. Existuje empirický výpočet sekundární prašnosti, viz rovnice (4.42), který byl v tomto případě použit [21]. Z programu MEFA 06 byly pro výše uvedené škodliviny vypočteny hodnoty emisních faktorů pro osobní, lehká a těžká nákladní vozidla, pro rychlosti jízdy vozidel od 5 do 70 km/h s krokem 5 km/h a pro sklon vozovky od -7 do 7 procent v hodnotách celých čísel. Rychlosť jízdy vozidel i sklon vozovky se může v těchto intervalech různě měnit. Data, ze kterých se emisní faktor počítá, je tedy nejprve nutno interpolovat podle dat, která byla z programu MEFA 06 stažena. Použita byla lineární interpolace.

Pro každý úsek je dále nutné vypočítat vlastní emisi automobilů, která je přispěvkem k celkové (kumulované) emisi. Vlastní produkce emisí se vypočítá:

1. Pro oxidy dusíku a oxid uhelnatý

$$E_{\text{NO}_x, \text{CO}} = \sum_{\text{types}} N_{ekv} \cdot Q_{\text{NO}_x, \text{CO}} \cdot v \quad (4.41)$$

⁶Simulační model vzhledem k absenci v programu MEFA 06 neuvažuje emisní faktory kategorie EURO 5, avšak lze jej o ně dál rozšířit.

2. Pro opacitu

$$E_{PM} = \sum_{types} (N_{ekv} \cdot Q_{PM10} \cdot v) + k \cdot (sL)^{0,91} \cdot W^{1,02} \cdot I \cdot \frac{L}{1000} \quad (4.42)$$

$E_{NOx,CO}$ – vlastní produkce NO_x a CO v daném úseku [g/h],

E_{PM} – vlastní produkce prašnosti v daném úseku [g/h],

N_{ekv} – ekvivalentní počet vozidel jednotlivých typů automobilů [-],

$Q_{NOx,CO}$ – emisní faktor pro oxidy dusíku a oxid uhelnatý [g/km],

Q_{PM10} – emisní faktor primární prašnosti [g/km],

W – průměrná váha všech vozidel v úseku [tuny],

I – hodinová intenzita vozidel v úseku [voz/h],

L – délka úseku [m],

v – průměrná rychlosť všech vozidel [km/h].

Sumy v rovnicích (4.41) a (4.42) probíhají přes všechny uvažované druhy automobilů včetně kategorií EUR0. Konstanty k a sL v rovnici (4.42) závisí na ročním období, hustotě provozu a velikosti uvažovaných částic sekundární prašnosti. Jejich konkrétní hodnoty lze najít v literatuře [21].

Vlivem proudění vzduchu v tunelu se pohybují i zplodiny a podle směru proudění se kumulují na portálech tunelu.

Ustálené koncentrace zplodin jsou potom vypočteny právě z hodnot kumulované emise na konci každého úseku, kde je tato emise nejvyšší. Koncentrace zplodin se vypočítá:

1. Pro oxidy dusíku [mg/m^3]

$$C_{NOx} = \frac{\frac{E_{cum}}{3,6}}{Q} \quad (4.43)$$

2. Pro oxid uhelnatý [ppm]

$$C_{CO} = \frac{\frac{E_{cum}}{3600}}{Q \cdot \rho_{CO}} \quad (4.44)$$

3. Pro opacitu [m^{-1}]

$$C_{OP} = \frac{\frac{E_{cum} \cdot 4,7}{3600}}{Q} \quad (4.45)$$

E_{cum} – kumulovaná emise škodliviny na konci daného úseku [g/h],

ρ_{CO} – hustota oxidu uhelnatého, uvažována hodnota $\rho_{CO} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ g/cm³,

Q – objemový průtok vzduchu v daném úseku tunelu [m^3/s].

4.5.2 Dynamická verze výpočtu emisí

Dynamická verze výpočtu emisí byla naprogramována v jazyce JAVA. Výpočet emisí probíhá v pěti krocích:

1. Výpočet emisního faktoru pro každý automobil v tunelu
2. Integrace hmotnostního toku emisí v čase
3. Pohyb zplodin v tunelu vlivem proudění
4. Difuze zplodin
5. Výpočet koncentrací zplodin

Na rozdíl od statické verze simulátoru je v dynamické verzi počítán emisní faktor pro každý automobil v tunelu. Z emisních faktorů je možné vypočítat hmotnostní tok zplodin:

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = E_{car} \cdot v_{car} \quad (4.46)$$

kde:

Δm je přírůstek hmotnosti zplodin za časový krok v daném místě tunelu [g],

Δt je časový krok, který byl v simulaci zvolen 0,1 sekundy,

E_{car} je emisní faktor automobilu [g/m],

v_{car} je rychlosť automobilu [m/s].

Z rovnice (4.46) je možné vypočítat přírůstek hmotnosti zplodin Δm CO, NO_x nebo primární prašnosti.

Difuzi a pohyb zplodin tunelem nejlépe popisuje parciální diferenciální rovnice druhého řádu [7]:

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} + u \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = \mathcal{D} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} + R \quad (4.47)$$

kde:

$p(x, t)$ funkce vzdálenosti a času, značí koncentraci zplodin [g/m³],

u je rychlosť proudění [m/s],

\mathcal{D} je difuzní koeficient [m⁻²s⁻¹],

R znamená produkci emisí automobily [gm⁻³s⁻¹].

Po mnoha pokusech se nám však nepodařilo tuto rovnici díky numerické stabilitě implementovat. Rovnici by šlo použít pouze v případě jemnějšího vzorkování než 1 metr v prostoru a 0,1 sekundy v čase. Při použití jemnějšího vzorkování by se však rapidně zvýšil výpočetní čas simulace. Proto jsme od tohoto řešení opustili a rozhodli se celý problém vyřešit ekvivalentním způsobem.

Pohyb zplodin v tunelu je dán jednoduchým vztahem:

$$\Delta l = u \Delta t \quad (4.48)$$

kde:

Δl je hodnota v metrech, o kterou se posunou zplodiny vlivem proudění vzduchu u za daný časový okamžik Δt .

Difuze představuje samovolný pohyb a rozpouštění zplodin, které není způsobeno prouděním vzduchu v tunelu. Difuze byla nahrazena jednoduchým průměrováním hodnot zplodin v prostoru, která zajistí náhodné rozpouštění a jejich následný samovolný pohyb v tunelu.

Na závěr jsou v každém kroku výpočtu emisí vypočteny koncentrace zplodin v každém místě tunelu. Koncentrace zplodin se vypočítají dle následujících vztahů:

1. Pro oxid dusíku [mg/m³]

$$C_{NOx} = \frac{\frac{m}{1000}}{V} \quad (4.49)$$

2. Pro oxid uhelnatý [ppm]

$$C_{CO} = \frac{m}{V \rho_{CO}} \quad (4.50)$$

3. Pro opacitu [m⁻¹]

$$C_{OP} = \frac{m \cdot 4,7}{V} \quad (4.51)$$

přičemž:

$$V = A \cdot \Delta x \quad (4.52)$$

kde:

m – kumulovaná emise škodliviny v daném místě tunelu [g],

A – průřez tunelu v jeho daném místě [m^2],

Δx – prostorový krok [m], počítáno s hodnotou 1 metr,

V – elementární objem v tunelu v jeho daném místě [m^3]⁷

Poznámka: V ustáleném stavu se dynamický výpočet blíží statickému výpočtu zplodin.

⁷Jelikož byl ale prostorový krok Δx zvolen jako 1 metr, stačí v tomto případě místo elementárního objemu uvažovat průřez v daném místě tunelu.

Kapitola 5

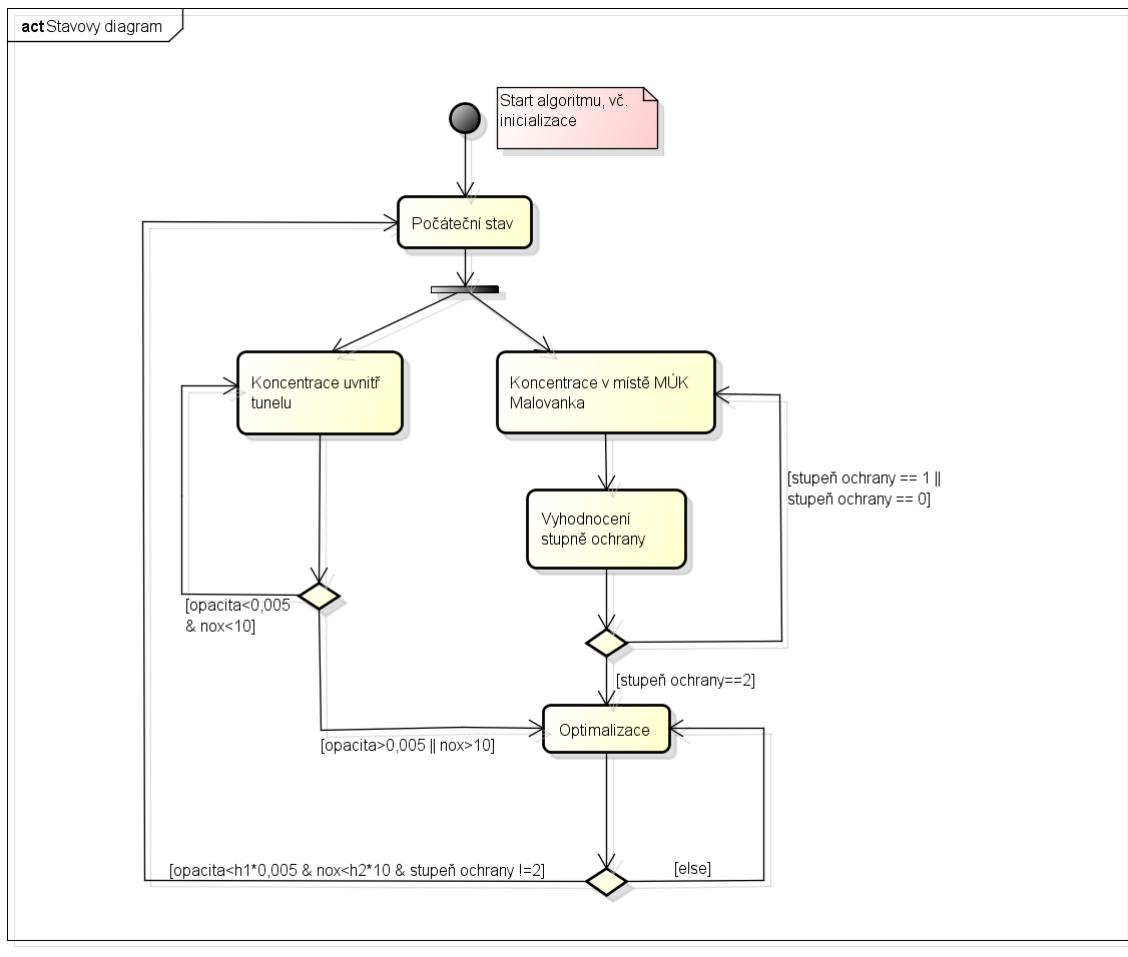
Řízení ventilace

5.1 Algoritmus řízení ventilace

Řídicí algoritmus provozního větrání bude spuštěn na základě požadavků uvedených v kapitole 3.3. Stavový diagram algoritmu řízení je uveden na obr. 5.1.

Po inicializaci algoritmu se běh algoritmu rozdělí do dvou paralelních větví. V první větvi se neustále měří koncentrace oxidů dusíku a opacity na daných místech tunelu, viz příloha A. Pokud dojde k překročení limitních hodnot, viz tabulka 3.4 v kapitole 3.3, bude zahájena optimalizace, která by měla zaručit nalezení akčního zásahu, tedy nastavení otáček ventilátorů a průtoků přívodních a odvodních strojoven, který minimalizuje celkový výkon všech zařízení, při dodržení omezení, které je dáno směrem rychlosti proudění a limitními hodnotami zplodin v tunelu.

Optimalizace bude probíhat na statickém modelu proudění i emisí, které jsou popsány v kapitolách 4.4 a 4.5. Statický model emisí byl vybrán především z toho důvodu, že pro jeho použití není nutná přesná znalost polohy a rychlosti jednotlivých automobilů v tunelu. Tuto informaci totiž při běžném provozu není možné v žádném případě získat. Optimalizace bude dále probíhat zpětnovazebně s aktualizací akčního zásahu po 10-30 minutách a to tak dlouho, dokud nedojde ke snížení koncentrací škodlivin na vypínací hodnoty. Tyto hodnoty lze nastavovat parametry, které jsou ve schématu označeny h1 a h2, avšak počítá se, že vypínací hodnota koncentrace bude 75% hodnoty spínací.



Obrázek 5.1: Stavový diagram algoritmu provozního větrání

Matematický model proudění založený na Bernoulliho rovnicích je jen přibližným popisem reálného proudění vzduchu v tunelu. Vlivem teploty, vlhkosti, turbulencí proudění, nepřesné znalosti tlakových účinků ventilátorů a dalších vlivů se budou reálné hodnoty průtoků v tunelu lišit od hodnot vypočtených simulací. Z tohoto důvodu je nutné použít zpětnovazební řízení. Zpětná vazba bude realizována tak, že referenční hodnoty rychlostí proudění a koncentrací zplodin budou upravovány na základě reálných měření

$$u_{REF} = K \cdot (u_m - u_{REF}) \quad (5.1)$$

kde:

u_m naměřená hodnota rychlosti proudění,

u_{REF} referenční hodnota rychlosti proudění,

K konstanta, kterou se regulátor nalaďí.

Doba 15-30 minut pro aktualizaci akčního zásahu byla vybrána proto, aby nedocházelo k tomu, že ventilátory se budou často zapínat a vypínat, čímž by došlo k jejich rychlému opotřebení. Po spuštění ventilátorů a strojoven navíc trvá nějakou dobu, než se zplodiny odvětrají a koncentrace a rychlosti proudění se ustálí na nějaké hodnotě. To je další důvod proč po výpočtu optimálního akčního zásahu několik minut počkat a pak spustit optimalizaci znovu s již upravenými referenčními hodnotami rychlosti proudění a koncentrací zplodin.

Ve druhé větvi algoritmu ve stavovém diagramu 5.1 bude neustále kontrolována koncentrace oxidů dusíku vně tunelu, v místě MÚK Malovanka. Hodnota této koncentrace bude rozhodovat o spuštění provozního větrání v daném stupni ochrany. Během zkušební doby provozu, která je nastavena na jeden rok po uvedení stavby do provozu, budou zjištěny hodnoty koncentrací, podle kterých se zapne daný stupeň ochrany. Předpokládá se však, že plná ochrana portálů, tzn. II. stupeň ochrany, bude zapnuta během špičkového provozu automobilů, kdy dochází k největšímu výnosu zplodin. Pokud je spuštěn druhý stupeň ochrany, regulační algoritmus přejde znovu do stavu optimalizace, neboť je nutné regulovat směr proudění na výjezdových rampách a na portálech MÚK Malovanka.

Při I. stupni ochrany nebo přirozeném proudění (ve schématu značeno jako stupeň ochrany 0) dojde ke spuštění optimalizace jen tehdy, pokud nastane požadavek na snížení koncentrací škodlivin pod limitní hodnoty.

5.2 Formulace optimalizační úlohy

Pro řízení ventilace provozního větrání byl zvolen optimalizační algoritmus. Cílem algoritmu je minimalizovat ztrátovou funkci při dodržení určitých omezení. Obecně lze optimalizační problém definovat jako

$$u = \arg(\min f(x)) \quad (5.2)$$

s omezením

$$c(x) \leq 0 \quad (5.3)$$

kde:

u je optimální akční zásah,

x je vektor proměnných, obecně diskrétních i spojitých,

$f(x)$ je obecně nelineární ztrátová funkce,

$c(x)$ je obecně nelineární omezení ve tvaru rovnosti, popř. nerovnosti.

V současnosti jsou dobře známy a prověřeny metody hledání minima lineární ztrátové funkce (lineární programování) nebo kvadratické ztrátové funkce (kvadratické programování) s lineárními omezeními. Minimum obecné nelineární funkce vůbec nemusí existovat nebo je k jeho nalezení třeba dlouhý výpočetní čas.

Náš optimalizační problém skýtá mnoho problémů. Ztrátová funkce je nelineární, některé proměnné optimalizace jsou diskrétní, jiné spojité a omezení je kvadratické a hyperbolické. Z toho důvodu bylo potřeba model značně zjednodušit, viz dále, což vedlo k dobrým výsledkům a rychlému výpočetnímu času optimalizace.

Optimalizace se pak provádí v programu MATLAB pomocí funkce *fmincon*, která je součástí optimalizačního balíčku a umožňuje zadat jednak nelineární ztrátovou funkci a také nelineární omezení.

5.2.1 Proměnné optimalizace

Do algoritmu vstupuje několik proměnných, přes které probíhá optimalizace:

1. rychlosti proudění v jednotlivých vzduchotechnických úsecích
2. počet spuštěných ventilátorů ve vzduchotechnických úsecích
3. průtoky strojovnami

V tunelu budou instalovány jednak ventilátory, které mají měnitelné otáčky a pak také ventilátory s neměnnými otáčkami. Ventilátory s proměnnými otáčkami můžeme z hlediska optimalizace považovat za spojitou proměnnou, naopak ventilátory s pevnými otáčkami můžeme považovat za diskrétní proměnnou. Tento fakt celou optimalizaci značně komplikuje, neboť software určený pro diskrétní nebo kombinovanou optimalizaci je po finanční stránce velmi nákladný a uživatelsky špatně přístupný.

V tomto případě je však možno využít trik, kterým se vyhneme diskrétní optimalizaci. V každém vzduchotechnickém useku se nachází vždy několik ventilátorů, z toho vždy jeden je s frekvenčním měničem, a má tedy měnitelné otáčky. Jako spojitou proměnnou tedy můžeme vzít nikoli otáčky jednotlivých ventilátorů ale počet spuštěných ventilátorů ve vzduchotechnickém úseku.

Horší je situace v případě přívodních strojoven, jejichž axiální ventilátory nemají měnitelné otáčky a průtok strojovnou lze měnit jen počtem spuštěných ventilátorů. Jedná se tedy opět o diskrétní proměnnou, která nabývá celočíselných hodnot průtoku, které dokážou poskytnout 0, 1, 2 až n možných spuštěných ventilátorů. Pokud z optimalizace např. vyjde, že přívodní strojovna má poskytnout průtok, jehož hodnota je mezi tím, co dokáže poskytnout jeden a dva axiální ventilátory, pak je optimalizace spuštěna znova, ale s již zafixovanou touto proměnnou, nejdříve s hodnotou průtoku, který poskytne jeden ventilátor a poté s hodnotou průtoku, který poskytnou dva axiální ventilátory.

5.2.2 Ztrátová funkce

V našem případě je ztrátovou funkcí myšlen výkon všech akčních členů v tunelu, tedy proudových ventilátorů a axiálních ventilátorů ve strojovnách vzduchotechniky.

$$f(x) = \sum P(x) \quad (5.4)$$

Elektrické výkony ventilátorů se soft-startéry, tedy ventilátorů s neměnnými otáčkami jsou známy, viz tabulka 3.1, kapitola 3.2.2.1. I když ve skutečnosti závisí výkon ventilátoru na otáčkách se třetí mocninou, pro zjednodušení modelu můžeme závislost výkonu na počtu spuštěných ventilátorů ve vzduchotechnickém úseku přiblížit jako:

$$P = P_0 \cdot x \quad (5.5)$$

přičemž:

P_0 je výkon při jmenovitých otáčkách [kW],

x je počet spuštěných ventilátorů [-].

Výkon odvodní strojovny obecně závisí na třetí mocnině průtoku, který strojovnou protéká. Během simulace bylo ověřeno, že je možné v optimalizaci tuto nelineární závislost použít, což přibližuje výsledek realitě. Ztrátová funkce pro odvodní strojovny je definována jako:

$$P = aQ^3 + bQ^2 + cQ \quad (5.6)$$

kde:

P je celkový výkon strojovny [kW],

Q je aktuální průtok strojovnou při paralelním běhu všech axiálních ventilátorů [m^3/s].

a, b, c jsou konstanty, které jsou dány výrobními parametry axiálních ventilátorů.

Výkon přívodních strojoven je lineární, neboť závisí pouze na průtoku, který poskytne daný počet spuštěných axiálních ventilátorů.

$$P = \frac{P_0}{Q_{\max}} \cdot Q \quad (5.7)$$

přičemž:

P_0 je výkon při spuštění jednoho axiálního ventilátoru [kW],

Q_0 je průtok, který strojovna poskytuje [m^3/s],

Q je aktuální průtok strojovnou při spuštění daného počtu axiálních ventilátorů [m^3/s].

5.2.3 Omezení

Omezení je jednak dáno maximálním rozsahem optimalizovaných veličin, tedy minimální a maximální možnou rychlostí proudění ve vzduchotechnických úsecích, maximálním možným počtem spuštěných ventilátorů a maximálními průtoky, které jsou schopny strojovny poskytnout.

Omezení je však dáno také matematickým modelem proudění, tedy rovnicemi kontinuity, Bernoulliho rovnicemi a nerovnicemi popisující ustálené koncentrace zplodin v závislosti na rychlosti proudění.

Rovnice kontinuity jsou vlastně lineární omezení ve tvaru rovnosti, což optimalizaci nepřidělává žádné problémy. Bernoulliho rovnice jsou obecně nelineární omezení ve tvaru rovnosti, viz kapitola 4.4.1, které není možné bez zjednodušení pro optimalizaci použít, více v kapitole 5.2.4. Nelineární nerovnice popisující omezení na koncentrace zplodin v tunelu s hyperbolickou závislostí na rychlosti proudění bylo možné použít, což výrazně usnadnilo řešení celého problému.

5.2.4 Zjednodušení Bernoulliho rovnic

Bernoulliho rovnice byly zjednodušeny. V rovnici se vyskytuje řada kvadratických členů, které byly zlinearizovány v pracovním bodě. Jako příklad můžeme ukázat linearizaci

tlakové ztráty způsobené výstupem proudu vzduchu z tunelového tělesa. Tuto tlakovou ztrátu, uvedenou v kapitole 4.4.1, lze vypočítat jako:

$$\Delta p_{out} = \frac{1}{2} \rho \cdot \zeta_{out} \cdot u^2 \quad (5.8)$$

Linearizací se myslí nalezení tečny ke grafu funkce v pracovním bodě u_p . Lineární tečná závislost bude tedy ve tvaru:

$$\Delta p_{lin} = \frac{d\Delta p_{out}}{du}(u_p) \cdot u + B \quad (5.9)$$

kde první člen rovnice (5.9) je směrnice tečny ke grafu funkce a druhý člen (v rovnici značen B) je úsek, který vytíná tečna na svislé ose. Tento člen se spočítá z rovnosti funkcí (5.8) a (5.9) v pracovním bodě u_p . Pro případ tlakové ztráty způsobené výstupem proudu vzduchu z tunelového tělesa bude po výpočtu vypadat linearizovaná závislost takto:

$$\Delta p_{lin} = \rho \zeta_{out} u_p \cdot u + B \quad (5.10)$$

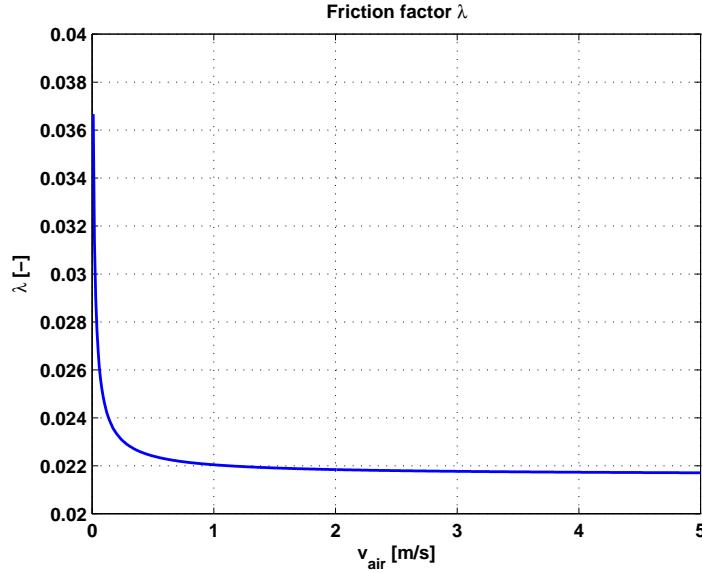
Pracovní bod rychlosti proudění v jednotlivých vzduchotechnických úsecích bude v řídicím algoritmu průběžně aktualizován podle aktuální naměřené hodnoty v tunelu.

Komplikaci však způsobují však i další nelineární členy, které byly vhodným způsobem zjednodušeny:

- **Výpočet součinitele tření λ**

Výpočet součinitele tření závisí na rychlosti proudění nelineárně, viz rovnice 4.13.

Podle grafu na obr. 5.2, součinitel tření λ ostře roste pro hodnoty rychlosti proudění blížící se nule. Pro hodnoty rychlosti proudění větší než cca 0,5 m/s je součinitel tření přibližně konstantní a je roven 0,022. Nízké rychlosti proudění v tunelu jsou pro většinu případů nežádoucí, navíc chyba způsobená nepřesnou hodnotou součinitele tření, nemá na celkovou rychlosť proudění v daném úseku tunelu téměř žádný vliv. Součinitel tření se v řídicím algoritmu před každou optimalizací přepočítá podle vzorce 5.2, kde za rychlosť proudění je vzat pracovní bod, ve kterém se systém linearizuje. Tím došlo k výraznému zjednodušení modelu.



Obrázek 5.2: Závislost součinitele tření na rychlosti proudění

- **Výpočet tlakového účinku proudových ventilátorů**

Tlakový účinek způsobený spuštěním proudového ventilátoru lze v závislosti na otáčkách vyjádřit podle rovnice 4.11, uvedené v kapitole 4.4.

Místo otáček ventilátoru však můžeme jako proměnnou vzít počet spuštěných ventilátorů v daném vzduchotechnickém úseku. Tlakový účinek jednoho ventilátoru při spuštění na jmenovité otáčky lze vyjádřit tak, že do rovnice (4.11) dosadíme za $n \cdot |n|$ výraz n_{ref}^2 a dostaneme:

$$\Delta p_{JF} = \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}^2}{A_{JF} A_T} + \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}}{A_T} \cdot u \quad (5.11)$$

Pro N spuštěných ventilátorů tedy bude platit:

$$\Delta p_{JF} = \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}^2}{A_{JF} A_T} N + \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}}{A_T} N \cdot u \quad (5.12)$$

První člen na pravé straně rovnice (5.12) je lineární, druhý člen obsahuje součin dvou proměnných, počtu spuštěných ventilátorů a rychlosti proudění v úseku $N \cdot u$. Systém byl linearizován v pracovním bodě, proto můžeme v rovnici místo proměnné u napsat konstantu u_p , která reprezentuje pracovní bod rychlosti proudění:

$$\Delta p_{JF} = \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}^2}{A_{JF} A_T} N + \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref} u_p}{A_T} N \quad (5.13)$$

Tím jsme dostali lineární závislost tlakového účinku na počtu spuštěných ventilátorů a zároveň se tím efektně vyřeší problém s ventilátory, které nemají proměnné otáčky a představují tak diskrétní proměnné.

Protože druhý člen pravé strany rovnice (5.12) má po dosazení jednotlivých konstant mnohem menší hodnotu než první člen rovnice, bude ve výsledku odchylka od skutečné nelineární tlakové ztráty naprostě minimální.

Výsledné zjednodušení s sebou nese i přidání jednoho problému. Zatímco v rovnici (4.11) je výrazem $|n|$ ošetřen případ, kdy ventilátor běží v reversním směru a brzdí rychlosť proudění, tak v rovnici (5.13) takovýto podobný výraz chybí. V optimalizaci je proto nutno jako omezení zadávat také směr otáčení motoru ventilátoru.

- **Tlakové ztráty vlivem dělení, resp. spojování proudů**

Tlakové ztráty vlivem dělení nebo spojování proudů vzduchu v tunelovém tělese představují pro optimalizační úlohu nejkomplikovanější nelinearity. Vzorce pro výpočet těchto tlakových ztrát jsou uvedeny v kapitole 4.4.1.

Součinitel místní tlakové ztráty ζ je v optimalizaci nejprve vypočten pomocí vztahů (4.22), (4.23), (4.25), resp. (4.26), kde za rychlosťi proudění byly dosazeny rychlosťi proudění v pracovních bodech. Celá rovnice pro tlakovou ztráту místními odpory je pak zlinearizována v pracovním bodě podobně jako jiné členy Bernoulliho rovnice.

Nutno říci, že chyba způsobená výpočtem ζ v pracovním bodě rychlosťi proudění má největší vliv na odchylku od hodnoty rychlosťi proudění počítanou nelineárním modelem.

5.3 Rozvrhování ventilátorů

Rozvrhování ventilátorů v tunelu během provozního větrání hraje velmi důležitou roli. Pokud je střídání ventilátorů prováděno efektivně, pak dochází k rovnoměrnému opotřebení všech ventilátorů v tunelu, což ve výsledku může ušetřit mnoho nákladů na údržbu.

U odvodních axiálních ventilátorů strojoven není nutné rozvrhování provádět, neboť se při spuštění počítá s paralelním během všech ventilátorů ve strojovně. Rozvrhování bude tedy realizováno jen pro přívodní ventilátory strojoven a skupiny ventilátorů ve vzduchotechnických úsecích. Výsledek optimalizace dává počet spuštěných ventilátorů ve strojovnách a vzduchotechnických úsecích. Výběr spuštěných axialních ventilátorů

v přívodních strojovnách a proudových ventilátorů ve vzduchotechnických úsecích probíhá přes penalizační funkci, která vychází z [20]:

$$P(n) = K_1 \cdot T_{total} + K_2 \cdot (T_{last} - T_{actual})^2 \quad (5.14)$$

kde:

T_{total} – poslední celková doba provozu ventilátoru [min],

T_{last} – čas posledního vypnutí ventilátoru [min],

T_{actual} – aktuální čas [min].

Konstanty K_1 a K_2 se naladí na simulačním modelu řízení, a to ještě před uvedením tunelu do provozu. Penalizační funkce (5.14) je po každém kroku optimalizace spočtena pro každý axiální ventilátor v přívodní strojovně a pro každý proudový ventilátor v daném vzduchotechnickém úseku. Následně je vybrán ten ventilátor, jehož penalizační funkce nabývá nejmenší hodnoty. První člen v penalizační funkci váží to, jak dlouho ventilátor naposledy běžel a druhý člen váží naopak to, jak dlouho nebyl daný ventilátor spuštěn.

Kapitola 6

Výsledky simulací

Na závěr přichází asi nejzajímavější a nejdůležitější kapitola diplomové práce – ověření navržené regulace. V tunelu může během provozu nastat mnoho situací, které dokáže simulátor otestovat. Jedná se především o zvýšenou intenzitu dopravy, rozdílnou skladbu vozidel, možné uzavírky jednotlivých tunelových úseků a výjezdových a příjezdových ramp.

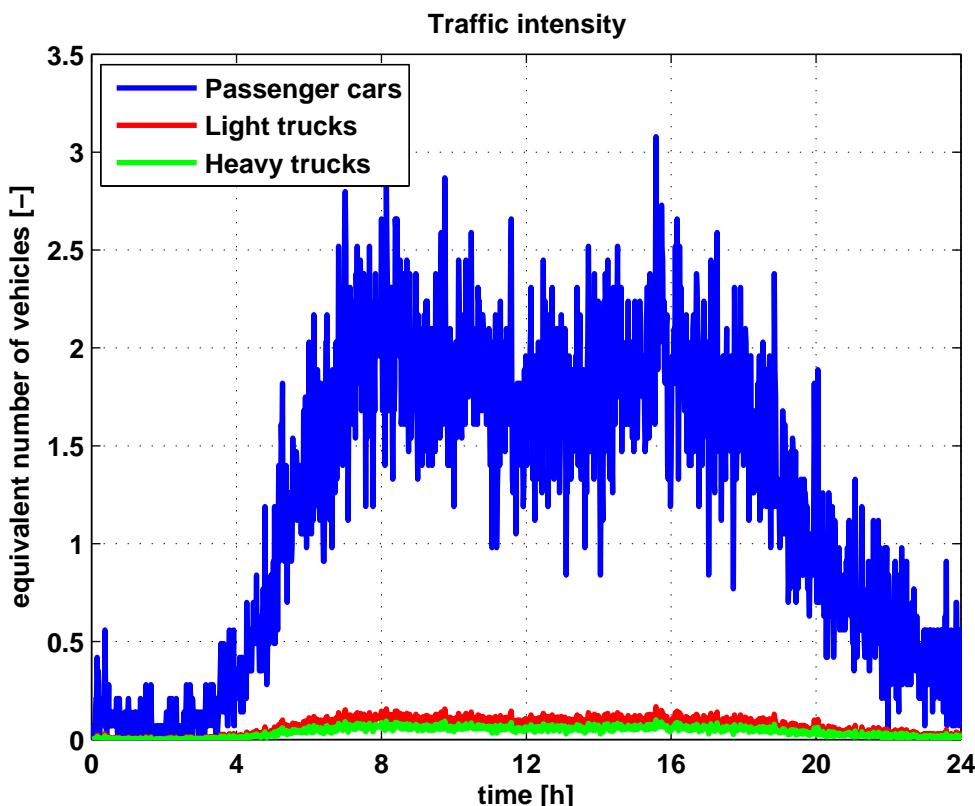
Pro ukázkou některých výsledků simulací byly vybrány dva scénáře, které jednak ověřují funkčnost navržené regulace a také se během reálného provozu budou vyskytovat nejčastěji. Oba scénáře mají stejnou vstupní intenzitu dopravy na portálech během dne. Intenzita dopravy na portálech tunelu byla nastavena podle předpokládané denní průjezdnosti vozidel během pracovního dne, stejně jako v příloze D. Maximální povolená rychlosť jízdy vozidel byla pro páteřní úseky nastavena na 70 km/h a pro výjezdové a příjezdové rampy 50 km/h. Oba scénáře byly odsimulovány po dobu celého dne, tedy 24 hodin.

6.1 První scénář

První scénář je ukázkou přirozeného proudění vzduchu v tunelu. Automatická regulace je tedy vypnuta. Na grafu 6.1 je vykreslena dopravní situace v úseku 24 v severním tunelovém tubusu, viz obr. 2.3. Jedná se o ekvivalentní počet vozidel, což značí vlastně aktuální počet automobilů v danou chvíli v daném úseku tunelu.

Na grafu je patrná typická denní intenzita vozidel, tzv. „dopravní velbloud“, se dvěma špičkami během dne, první cca kolem osmé hodiny ranní a druhá cca kolem šestnácté

hodiny odpolední.



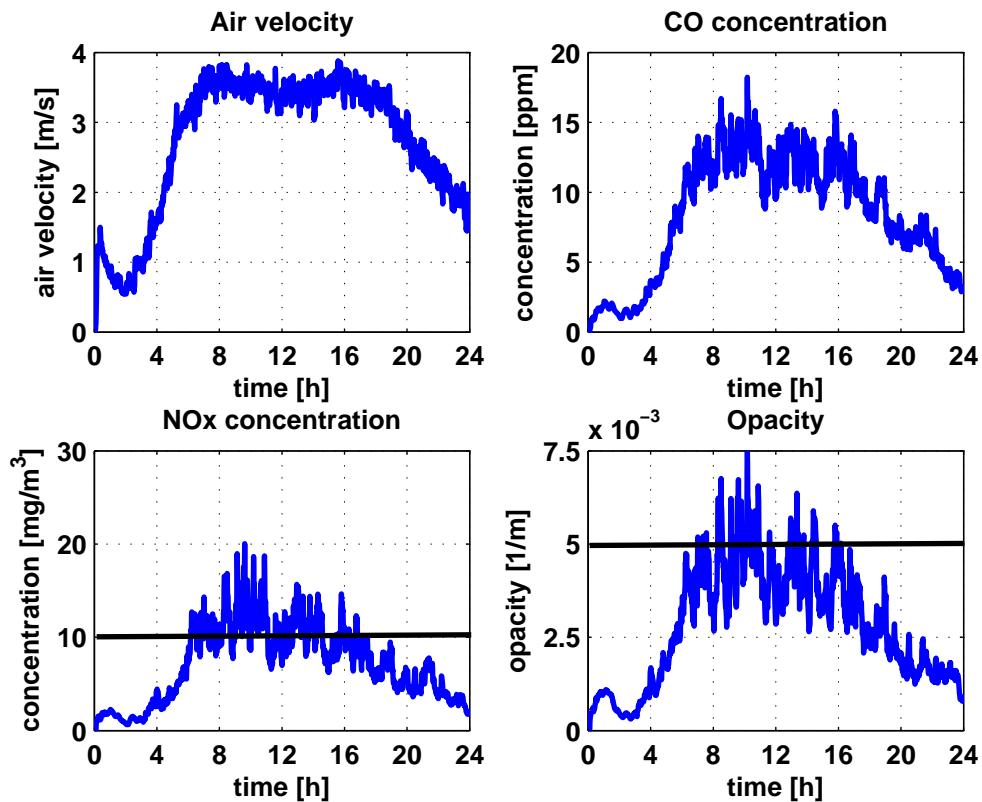
Obrázek 6.1: Denní intenzita vozidel v tunelu, úseku 24 severního tubusu.

Úsek 24 byl vybrán z toho důvodu, že se v něm nachází současně čidla pro měření oxidů dusíku a čidlo pro měření opacity. Navíc v úsecích za strojovnou Střešovice, mezi které patří i úsek 24, se během dne předpokládá nejvyšší výnos zplodin v celém tunelu, protože se v těchto úsecích počítá se zvýšenou kumulací zplodin vlivem proudění vzduchu.

Na grafu na obrázku 6.2 je uveden časový vývoj zplodin a rychlosti proudění. Je jasné patrný pístový efekt vozidel, kdy se zvyšující se intenzitou vozidel roste rychlosť proudění v tunelu. Vidíme, že v ranních a večerních hodinách je tubus provětráván působením pístového efektu vozidel. Kolem šesté hodiny ranní dojde k překročení limitních hodnot koncentrace NO_x – 10 mg/m³, přičemž takto nadměrné hodnoty se drží v tunelu až přibližně do sedmnácté hodiny, kdy končí odpolední dopravní špička. Rovněž opacita, která je počítána pouze z primární prašnosti, naroste přes limitní hodnotu $5 \cdot 10^{-3}$ m⁻¹ a drží se nad ní až do konce odpolední špičky.

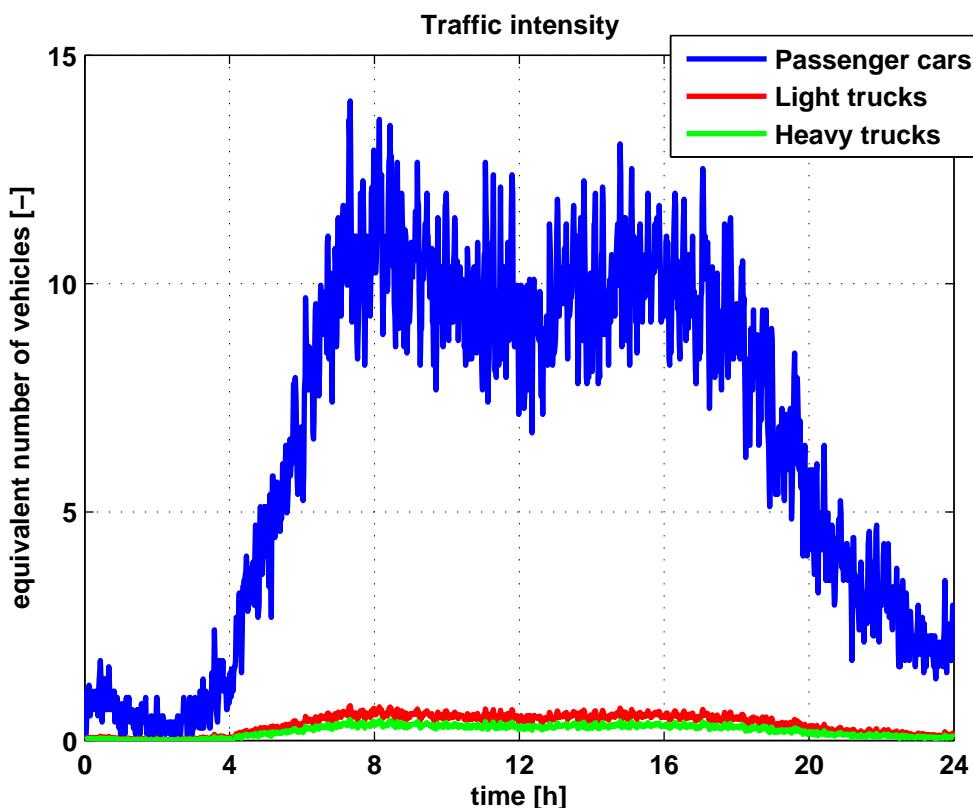
Naopak koncentrace oxidu uhelnatého dosahují po celý den relativně nízkých hodnot vůči limitní hodnotě 70 ppm. V dřívějších letech byly do silničních tunelů nasazovány

výhradně senzory pro měření CO. Díky lépe konstruovaným motorům a zpřísňujícím se normám EURO klesá podíl CO ve výfukových plynech a oxid uhelnatý už zdaleka není takovou hrozbou jako v dřívějších letech. Simulace tento fakt potvrzuje a je jasné důkazem toho, proč bylo rozhodnuto v tunelu Blanka koncentrace CO neměřit.



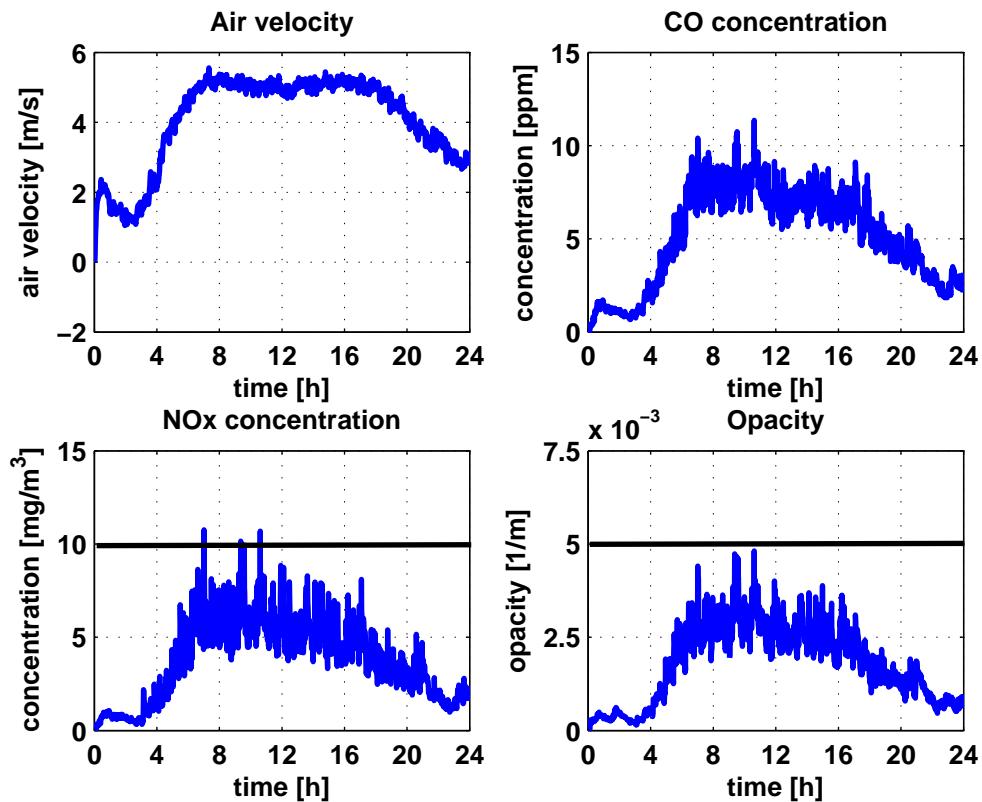
Obrázek 6.2: Časový vývoj fyzikálních veličin v tunelu, úseku 24 severního tubusu.

Situace v jižním tunelovém tubusu je však poměrně odlišná. Časový průběh intenzity opravy je uveden na obr. 6.3. Ekvivalentní počet vozidel během dne je výrazně vyšší než v případě úseku 24 severního tubusu. To je dáno tím, že úsek jižního tubusu je přibližně 4,5x delší než úsek severního tubusu, a tudíž v danou chvíli je v tomto úseku zachyceno více vozidel.



Obrázek 6.3: Denní intenzita vozidel v tunelu, úseku 22 jižního tubusu.

Jiná situace je i v případě vývoje zplodin, jejichž časový průběh je zobrazen na grafu na obr. 6.4.



Obrázek 6.4: Časový vývoj fyzikálních veličin v tunelu, úseku 22 jižního tubusu.

Koncentrace oxidů dusíku NO_x během dne překročí limitní hodnotu 10 mg/m^3 jen dvakrát, a to ještě jen špičkovým překmitem. Tyto překmity jsou způsobeny tím, že v místě měření koncentrace projede nákladní automobil zrovna ve chvíli, kdy je měření vyhodnocováno. Nejinak je tomu u opacity, která se po celý den drží pod limitní hodnotou $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$.

Celkově nižší hodnoty koncentrací zplodin v jižním tubusu jsou způsobeny tím, že jižní tubus má na rozdíl od severního tubusu charakter klesající tunelové trouby. Emisní faktor automobilů, viz kapitola 4.5, závisí na sklonu vozovky, a to se zde jasně ukazuje.

6.2 Druhý scénář

Druhý scénář vystihuje asi nejpravděpodobnější podobu regulace během provozu. Stupeň ochrany provozního větrání bude určován na základě kontinuálního měření imisí oxidu dusíku vně tunelu, viz kapitola 3.3.1. Rozhodovací hodnoty koncentrací však budou určeny až při uvedení tunelu do provozu. Předpokládá se ale, že přirozené proudění vzduchu bez nucené regulace bude spuštěno v nočních hodinách, kdy bude tunelem projíždět málo automobilů a bude docházet k minimálnímu výnosu zplodin v oblasti MÚK Malovanka. Druhý stupeň ochrany bude spuštěn během špičkového provozu a první stupeň ochrany pár hodin před a pár hodin po dopravní špičce.

Pro následující scénář byl stupeň ochrany provozního větrání nastaven během dne následovně:

- 0-3 hod – přirozené proudění
- 3-6 hod – 1. stupeň ochrany
- 6-20 hod – 2. stupeň ochrany
- 20-22 hod – 1. stupeň ochrany
- 22-24 hod – přirozené proudění

Druhý scénář, stejně jako scénář předchozí, má stejné vstupní dopravní údaje, t.j. intenzitu dopravy na portálech a stejnou skladbu vozidel.

Jenom připomeňme, že během druhého stupně ochrany provozního větrání je požadavek na ochranu výjezdových ramp U Vorlíku, na Prašném mostě a Malovance v jižním i severním tubusu před výnosem zplodin z páteřního tubusu. Je tedy snahou přivést tyto rampy do podtlaku tak, aby se jimi nasával vzduch. Na grafech na obrázku 6.6 jsou uvedeny časové průběhy rychlostí proudění na těchto výjezdových rampách. Vidíme, že po dobu, kdy byl spuštěn druhý stupeň ochrany, tedy od 6 do 20 hodin, došlo pomocí automatické regulace k brzdění proudu vzduchu a po většinu času bylo dosaženo nasávání vzduchu výjezdovými portály (na grafech indikováno zápornou rychlostí proudění).

Situace v místě MÚK Malovanka je uvedena na obr. 6.7. Na grafu jsou vykresleny časové závislosti rychlosti proudění na portálech MÚK Malovanka. Na portálech severního tubusu je snaha mít rychlosť proudění během druhého stupně ochrany zápornou, rozdílnou oproti směru jízdy vozidel, protože tím je zaručeno nasávání čerstvého vzduchu portály a zabránění výnosu zplodin.

Na grafu lze vidět, že zatímco v páteřním výjezdovém portálu, úseku 28, se téměř po celou dobu dařilo držet rychlosť proudění v záporných hodnotách, rychlosť proudění na výjezdové rampě Malovanka (značena R5) poměrně kmitá a že nevždy, především během dopravní špičky, se ji podařilo přivést do podtlaku, aby jí byl nasáván vzduch. Důležité ovšem je, že během druhého stupně ochrany došlo k výraznému brzdění rychlosťi proudění, a tím i k minimalizaci výnosu zplodin z této výjezdové rampy. Nežádoucí kmitání rychlosťi proudění je možné potlačit lepším naladěním konstant zpětnovazebního regulátoru.

Na portálech jižního tubusu tedy úseku 1 a rampy R1 je snaha mít rychlosť proudění naopak kladnou, shodnou se směrem jízdy vozidel, neboť tím dochází k nasávání vzduchu. V úseku 1 jižního tubusu byl tento požadavek splněn po celý den. To je dáno hlavně pístovým efektem automobilů, jejichž vysoká intenzita v tomto úseku během dne výrazně podpoří podélnou rychlosť proudění v žádaném směru.

Stejně jako v předchozím scénáři uvedeme také situaci v úseku 24 severního tubusu, ve kterém se nacházejí senzory pro měření koncentrací. Průběhy fyzikálních veličin během dne jsou vykresleny na grafu na obr. 6.8. Vidíme, že během simulace dojde při dopravní špičce mezi osmou hodinou ranní a 16 hodinou odpolední k opakovámu překročení koncentrací zplodin, avšak regulátor si dokáže s danou situací poradit a během několika minut dojde k odvětrání zplodin z daného úseku. V jižním tubusu nebylo během simulace dosaženo limitních hodnot koncentrací zplodin, proto zde tentokrát není graf průběhu fyzikálních veličin uveden.

Odvětrat zplodiny při druhém stupni ochrany je podstatně náročnější než při prvním stupni ochrany nebo při přirozeném proudění, a to jednak z toho důvodu, že při druhém stupni ochrany dochází vlivem brzdného účinku proudových ventilátorů, které mají přispět k ochraně portálů MÚK Malovanka, k poklesu rychlosťi proudění za strojovnou Střešovice a také z toho důvodu, že je zabráněno výnosu zplodin z výjezdových ramp. Eliminace zplodin v tunelu je tedy dosahována pouze odvodními strojovnami Střešovice a Letná a převodní strojovnou Malovanka.

Na grafu na obr. 6.9 je uveden průběh objemového průtoku odvodních strojoven Střešovice a Letná. Převodní strojovna Malovanka běží po celou dobu druhého stupně ochrany provozního větrání, vyjma třech časových intervalů, kdy optimalizátor uvážil, že strojovnu není třeba spouštět. Poprvé nastala tato situace těsně po čtvrté hodině odpolední, podruhé před šestou hodinou večerní a naposledy kolem půl osmé hodiny večerní.

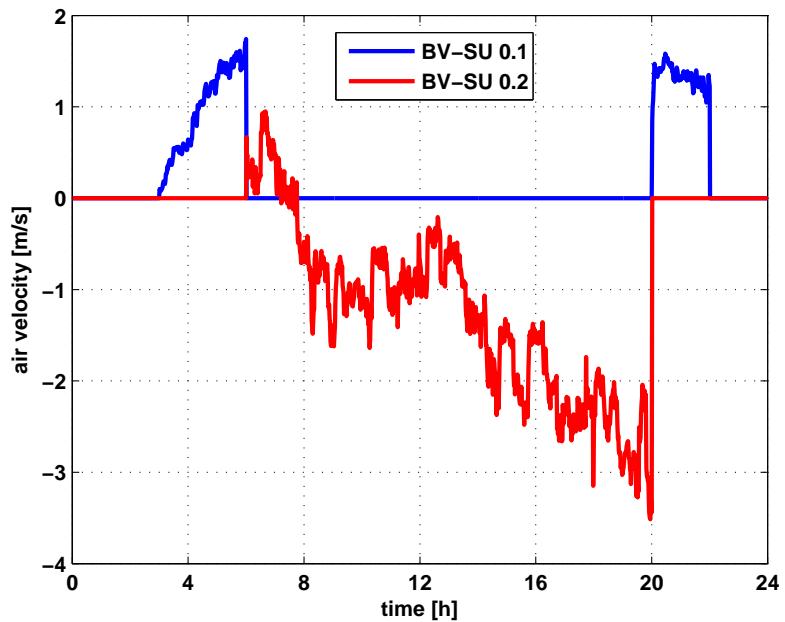
Detail situace mezi čtvrtou hodinou odpolední a osmou hodinou večerní, kdy dochází k vypínání strojovny Malovanka je uveden na obr. 6.11. Inkriminované momenty vypnutí

převodní strojovny Malovanka jsou na grafech označeny červenou barvou. Vypnutí strojovny mělo za následek prudký nárůst rychlosti proudění v úseku 28 severního tubusu a v rampě R1 jižního tubusu. Zjednodušený lineární model, na kterém se provádí optimalizace, v daných okažicích uvážil, že směr proudění na výjezdových portálech Malovanka stačí otočit pouze brzdným účinkem proudových ventilátorů v úseku 21 a rampy R5, což se v případě výjezdové rampy R5 povedlo a v případě úseku 28 nikoli. Zpětnovazební regulace však na tuto událost po několika minutách vždy správně zareaguje a strojovnu Malovanka znova spustí.

Ukazuje se, jak složité je splnit požadavek ochrany v oblasti MÚK Malovanka při současné ochraně výjezdových ramp U Vorlíků a na Prašném mostě. Brzdění proudu vzduchu proti jedoucím vozidlům znamená velký zásah proti přirozené fyzice tunelu a to se odráží i na výsledcích optimalizace, kdy regulátor nemusí najít optimální řešení ale pouze suboptimální, kdy nedokáže dodržet některá omezení na směr rychlosti proudění v daných úsecích tunelu.

Patrný je i vliv proudových ventilátorů na rychlosť proudění v daných úsecích. Jako příklad spouštění proudových ventilátorů během dne jsem vybral ventilátory na výjezdových i příjezdových rampách. Jejich spouštění je vykresleno na grafu na obr. 6.10. Lze vidět, že na výjezdových rampách regulátor správně zapne daný počet ventilátorů v reverzním chodu, aby bylo dosaženo brzdění proudu vzduchu.

Na závěr ukážeme ještě vliv uzavíratelných převodních klapek mezi tubusy BV-SU 0.1 a BV-SU 0.2, které mají za úkol převádět znečištěný vzduch ze severního do jižního tubusu. Průběh rychlosťi proudění oběma převodními klapkami je uveden na grafu na obr. 6.5.

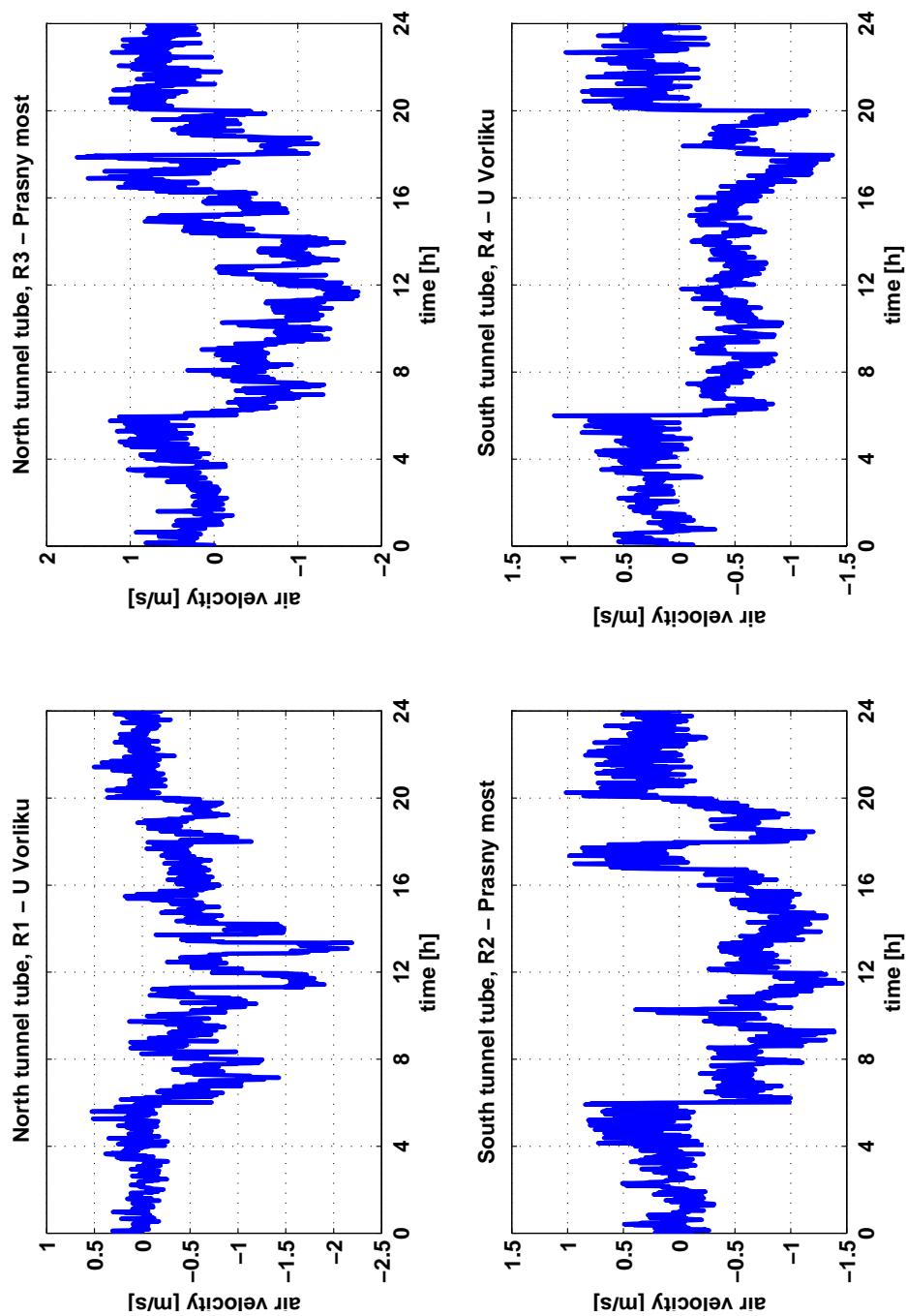


Obrázek 6.5: Časový průběh rychlosti proudění v převodních klapkách BV-SU 0.1 a BV-SU 0.2.

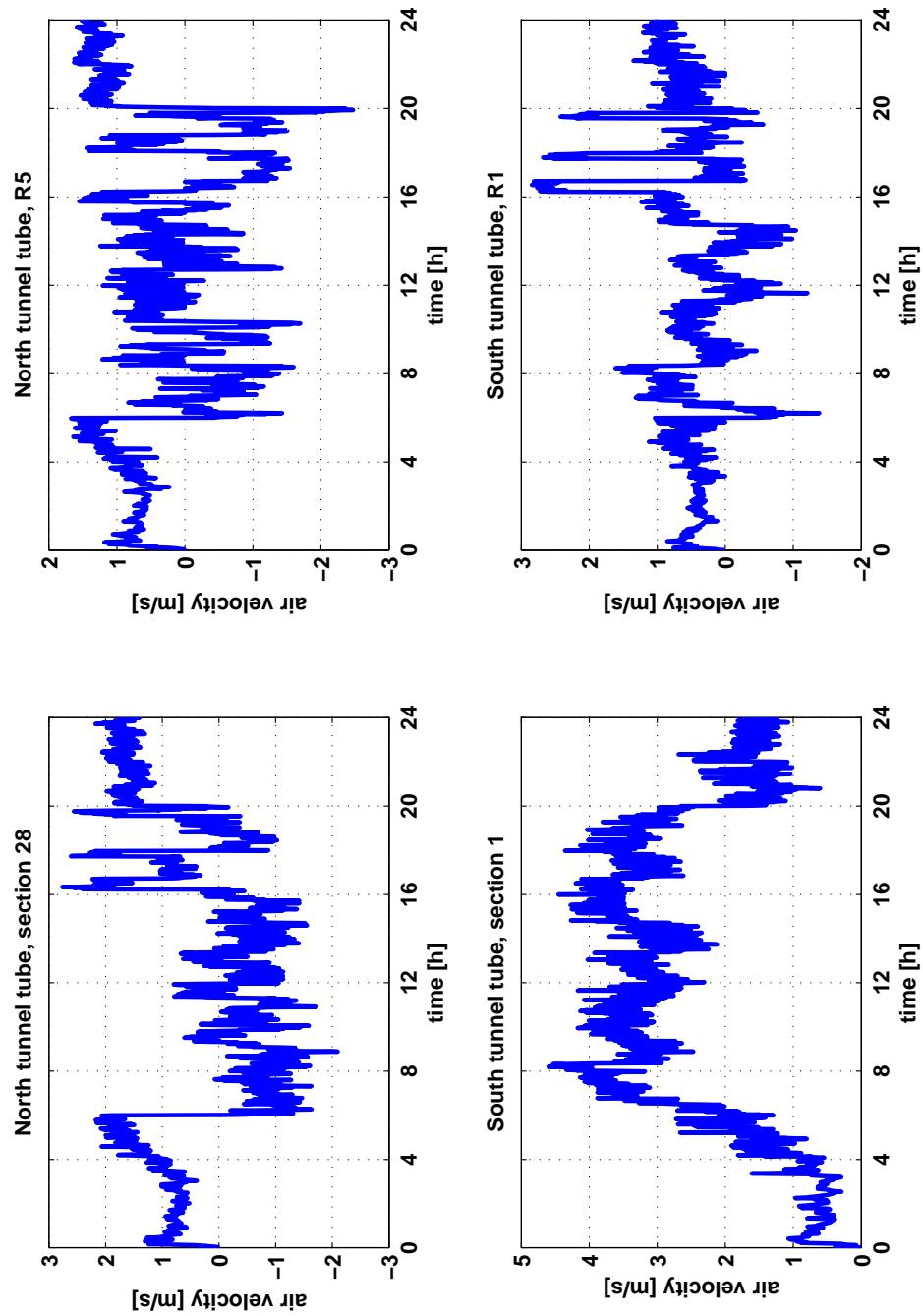
Z grafu lze vidět, že klapka BV-SU 0.1 je otevřena mezi třetí až šestou hodinou ranní a mezi osmou a desátou hodinou večerní při spuštění prvního stupně ochrany a klapka BV-SU 0.2 je otevřena od šesti do dvaceti hodin při druhém stupni ochrany.

Zatímco klapkou BV-SU 0.1 proudí vzduch požadovaným směrem, tedy ze severního do jižního tubusu (rychlosť proudění je kladná), a tím dochází k převodu znečištěného vzduchu do jižního tubusu, klapka BV-SU 0.2 vychází z tohoto hlediska podle simulace kontraproduktivní, neboť rychlosť proudění je záporná a vzduch se naopak převádí z jižního do severního tubusu a to je nežádoucí.

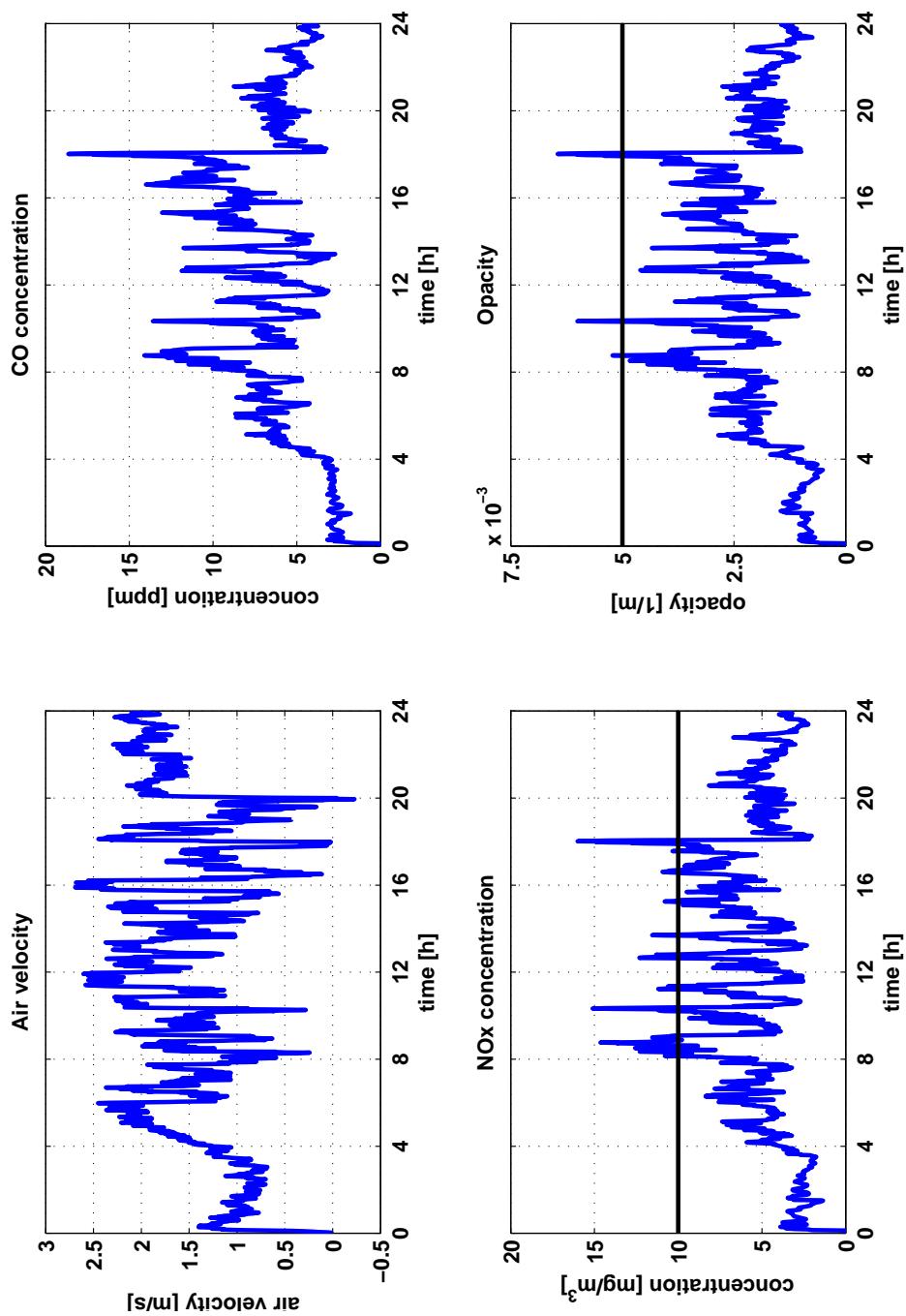
Pokud by tato situace nastávala i během reálného provozu, bylo by výhodnější klapku BV-SU 0.2 při druhém stupni ochrany uzavřít a znečištěný vzduch převádět pouze strojovnou Malovanka.



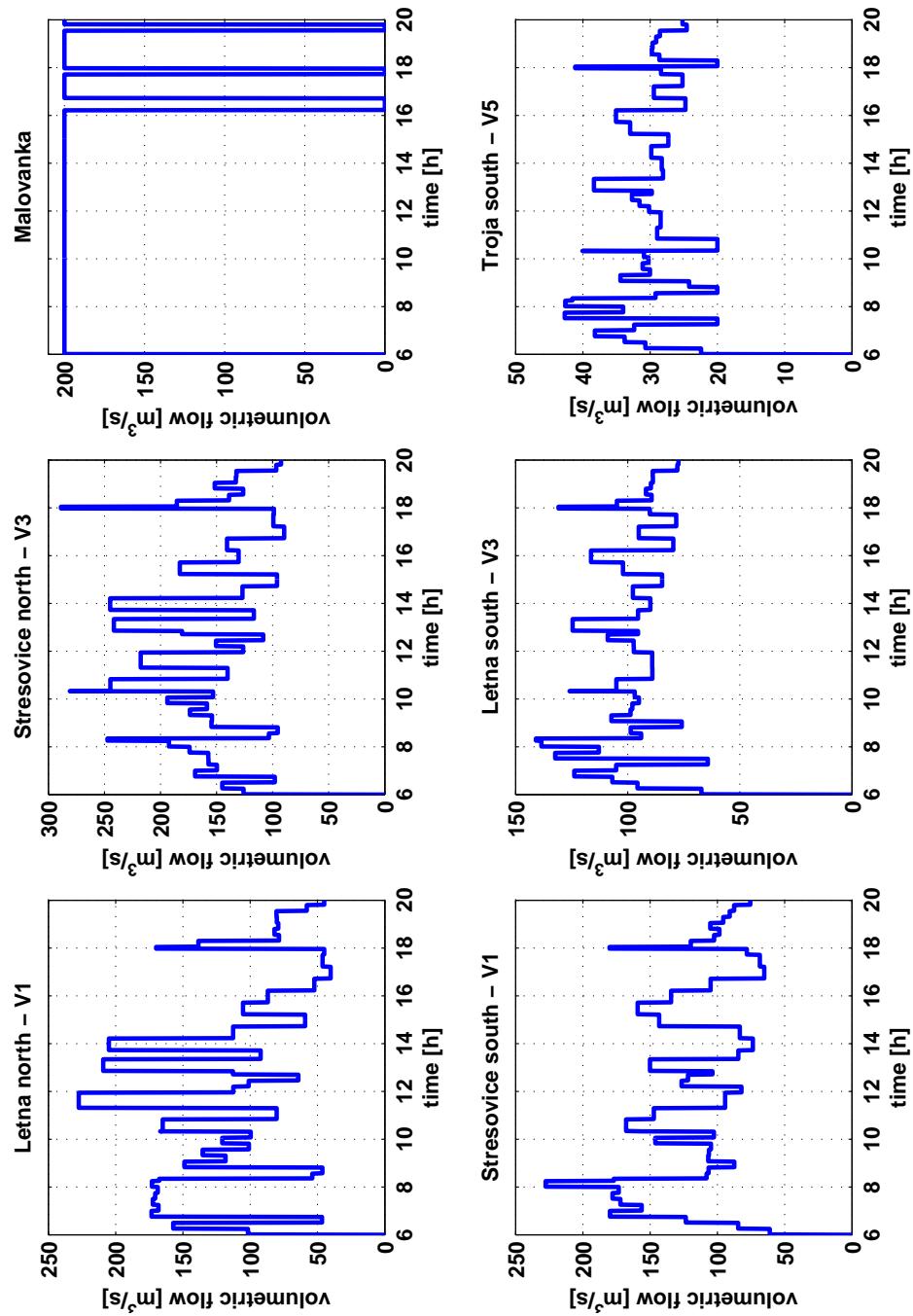
Obrázek 6.6: Časový průběh rychlosti proudění na výjezdových rampách U Vorlíků a na Prašném mostě.



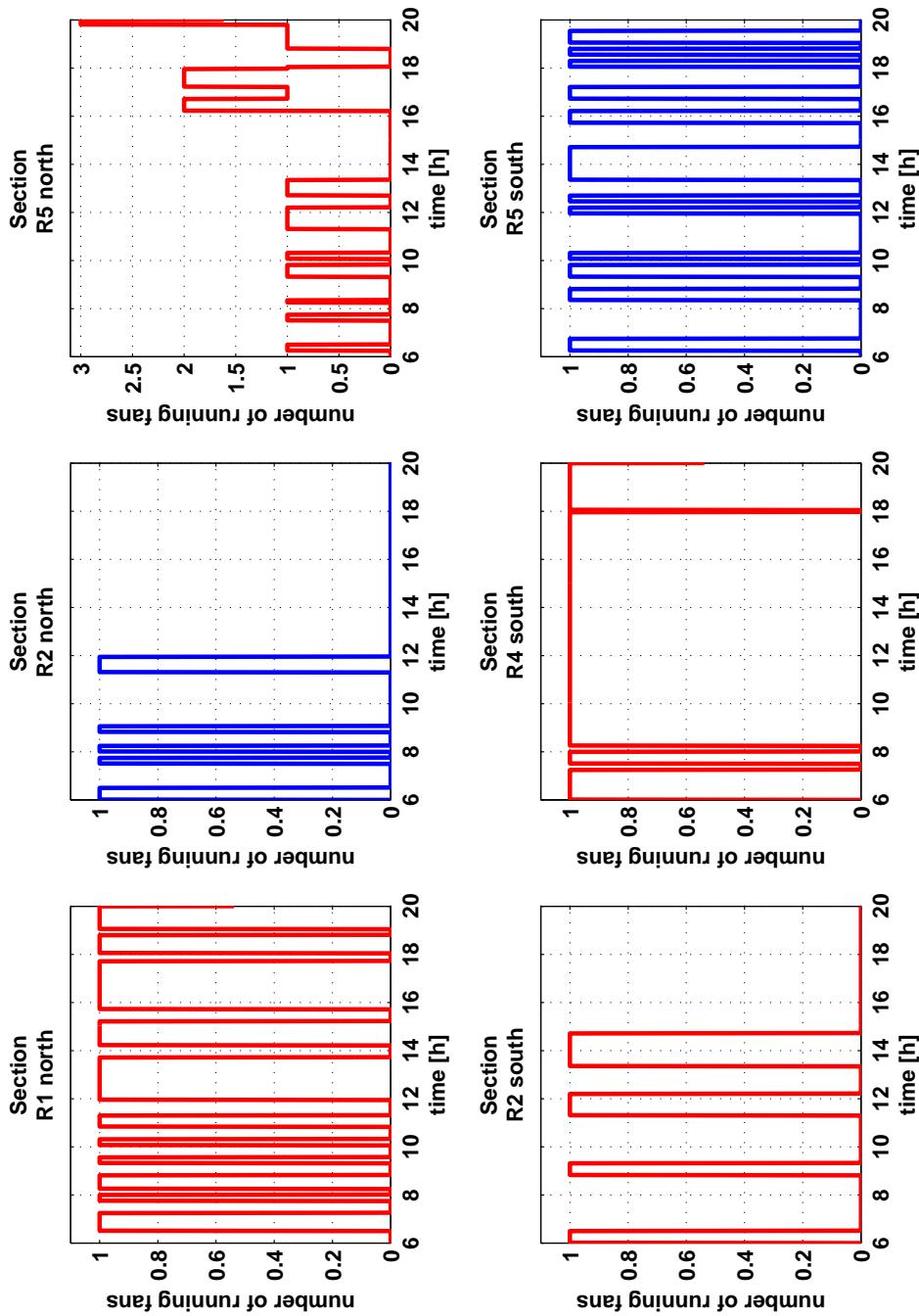
Obrázek 6.7: Časový průběh rychlosti proudění na portálech MÚK Malovanka.



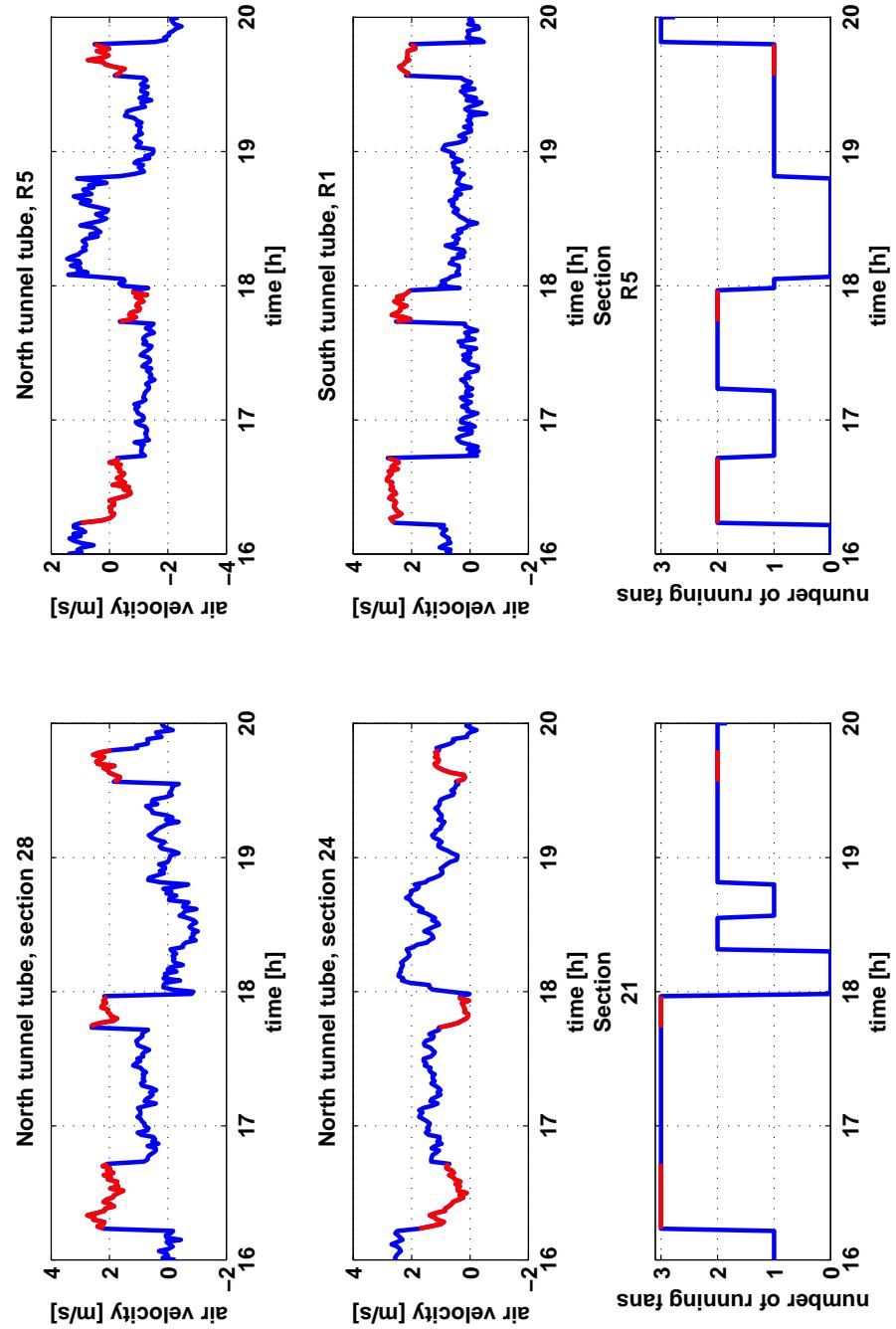
Obrázek 6.8: Časový průběh fyzikálních veličin v úseku 24 severního tubusu při automatické regulaci.



Obrázek 6.9: Časový průběh spouštění vzduchotechnických strojoven v severním tunelu.



Obrázek 6.10: Časový průběh spouštění ventilátorů na rampách v severním a jižním tunelovém tubusu. Modře označen normální chod, červeně označen reversní chod.



Obrázek 6.11: Detailní situace mezi 16. a 20. hodinou, kdy dochází k vypínání strojovny Malovanka.

Kapitola 7

Závěr

Cílem diplomové práce bylo naprogramovat simulátor vzduchotechniky tunelu Blanka. Simulátor byl vytvořen ve dvou verzích - statické a dynamické. Základem obou verzí simulátoru je aerodynamické schéma, tedy soustava algebraických rovnic, která popisuje chování proudění v tunelu při různých dopravních scénářích. Aerodynamické schéma lze s výhodou použít při modelování proudění vzduchu za provozu a lze ho též využít pro tvorbu simulačního trenážéra systému větrání pro modelování neočekávaných situací a jejich následného řešení v praxi.

Simulací byly zjištěny hodnoty podélné rychlosti proudění a průměrné hodnoty koncentrací v tunelu při různých intenzitách dopravy, z čehož vyplynulo, že hodnoty koncentrací CO nedosahují zdaleka takových hodnot, které by mohly překročit povolenou limitní hodnotu. Naopak hodnoty koncentrací NO_x nebo opacity mohou v některých případech, především pak během špičkového provozu, výrazně přesáhnout povolené hodnoty.

Také byl zjištěn vliv účinku proudových ventilátorů a příčně napojených vzduchotechnických strojoven na podélnou rychlosť proudění v tunelu.

Simulátor dále posloužil k návrhu zpětnovazební regulace, která probíhá formou optimalizace. Tím bylo možno otestovat automatickou regulaci, kdy se během dne dynamicky mění intenzita a skladba dopravy podle předpokládaných průběhů a kdy se mění stupeň ochrany provozního větrání, což bude odpovídat reálné situaci během provozu. Simulací byla ověřena funkčnost navržené regulace.

Systém regulace provozního větrání navržený v rámci této diplomové práce bude skutečně nasazen během reálného provozu. Po uvedení tunelu Blanka do provozu, s čímž je počítáno v roce 2014, bude spuštěn rok zkušebního provozu, při kterém se mimo jiné detailně systém řízení ventilace naladí.

Momentálně probíhají jednání s firmou Eltodo EG, a.s., která bude realizovat systém

provozního větrání z hlediska hardwarové části a s firmou Satra, spol. s r.o., která systém větrání tunelu projektuje.

Literatura

- [1] Datový archiv firmy Satra, spol. s r.o.
- [2] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/54/EC ze dne 29.dubna 2004 o minimálních bezpečnostních požadavcích na tunely transevropské silniční sítě*. Brussels, Duben 2004.
- [3] Analyzers and Process Instrumentation. Listopad 2005, prezentace firmy Sick.
- [4] Analyzers and Process Instrumentation, Vicotec 320. Březen 2006, prezentace firmy Sick.
- [5] CETU: Dossier pilote des tunnels équipements. , č. 4.1, Listopad 2003.
- [6] Eltodo EG, a.s.: *Technické vybavení tunelů pozemních komunikací*. Praha, 2004.
- [7] Ferkl, L.: *Simulation and Control of Ventilation in Tunnels*. Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Únor 2007.
- [8] Hemzal, K.: Větrání tunelu Mrázovka - VTT. Technická zpráva, Praha, Listopad 2000.
- [9] Hemzal, K.: Součinitel tření při proudění tekutin – komparace vztahů. *Vytápění, větrání, instalace*, ročník 12, č. 1, Praha 2003: s. 30–32.
- [10] Idelchick: *Handbook Of Hydraulic Resistance*. Begell House, třetí vydání, 2001.
- [11] Ježek, Váradiová, Adamec: *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [12] Martin Treiber: stránky dopravního mikromodelu [online]: The Lane Changing Model MOBIL. [cit. 2011-10-20]. Dostupné na www: <<http://www.vwi.tu-dresden.de/~treiber/MicroApplet/MOBIL.html>>.

LITERATURA

- [13] Meidinger: Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläsen. *Schweizerische Bauzeitung*, ročník 82, č. 28, 1964: s. 489–504.
- [14] PIARC: Pollution par le dioxyde dzote dans les tunnels routiers. , č. 4.1, Září 2000.
- [15] Pořízek, J.: Navržený způsob větrání v tunelu Blanka. 2010: str. 2.
- [16] Projekt CL [online]: Využití chemiluminiscence. [cit. 2012-04-05]. Dostupné na www: <<http://projekt-cl.ujep.cz/pouziticl.html>>.
- [17] Stránky firmy ZVVZ a.s. [online]: Katalogové listy. [cit. 2012-04-02]. Dostupné na <<http://www.zvvz.cz>>.
- [18] stránky serveru Wikipedia [online]: Intelligent driver model. [cit. 2011-10-08]. Dostupné na <<http://www.wikipedia.com>>.
- [19] Tunelový komplex Blanka [online]: Informace o projektu. [cit. 2012-03-31]. Dostupné na www: <<http://www.tunelblanka.cz>>.
- [20] Šulc, J.: *Simulace a řízení ventilace dálničních tunelů*. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Květen 2010.
- [21] US EPA: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. , č. 13.2.1, Listopad 2006: s. 1–15, dostupné na <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/index.html>>.

Příloha A

Parametry úseků tunelu Blanka

úsek	délka [m]	hydraulický průměr [m]	průřez [m^2]	počet pruhů	stoupání [%]	senzory
1	52	60	7,41	2	-2,76	–
2	16	60	7,41	2	-2,76	–
3	85	111,3	9,89	3	-2,76	–
4	31	88,7	8,87	3	-2,76	–
5	129	88,7	8,87	3	-2,76	–
6	37	94	9,79	3	-2,76	–
7	141	94	9,79	3	-5	RP
8	48	101,6	9,79	3	-5	–
9	282	88,6	9,33	3	-5	RP
10	301	88,6	9,33	3	-0,5	OP
11	312	63,6	7,85	2	-0,5	–
12	274	63,6	7,85	2	-3,62	RP, OP
13	142	86	8,71	3	-3,62	–
14	633	86	8,71	3	-0,31	RP, OP
15	52	69,4	7,75	2	-0,31	–
16	52	69,4	7,75	2	-4,88	–
17	91	84,8	8,65	3	-4,88	–
18	443	94,6	9,83	3	-4,88	RP, NOX, OP
19	98	94,6	9,83	2	-4,88	–
20	447	64,5	8,40	2	-4,88	–
21	870	64,5	8,40	2	-0,5	OP
22	366	64,5	8,40	2	3,41	RP, NOX, OP
23	48	61	7,70	2	3,41	–
24	138	101,3	10,84	2	3,41	–
25	224	61,6	7,80	2	4,56	RP
26	155	61,6	7,80	2	1,30	–
R1	78	75,1	8,03	1	-2	RP
R2	115	62,6	7,56	2	4	RP
R3	110	59	7,64	1	-4	RP
R4	177	62,6	7,56	2	4	RP
R5	210	62,2	7,80	1	-4	RP
R6	80	73,8	8,36	2	4	–

Tabulka A.1: Parametry úseků jižního tunelového tubusu

úsek	délka [m]	hydraulický průměr [m]	průřez [m^2]	počet pruhů	stoupání [%]	senzory
1	159	83,7	8,61	3	-1,3	RP
2	224	83,7	8,61	3	-4,56	–
3	137	100	10,23	3	-3,41	–
4	47	59,4	7,57	2	-3,41	–
5	370	62,7	8,22	2	-3,41	–
6	900	62,7	8,22	2	0,5	OP
7	380	62,7	8,22	2	5	RP
8	190	94,6	9,83	3	5	NOX, OP
9	150	94,6	9,83	3	5	–
10	242	94,6	9,83	3	5	–
11	121	85,5	8,70	3	5	RP
12	40	75,7	8,34	2	5	–
13	129	75,7	8,34	2	0,3	RP
14	486	86	8,71	3	0,3	RP, OP
15	161	86	8,71	3	3,62	–
16	304	64,5	7,91	2	3,62	RP
17	334	64,5	7,91	2	0,5	OP
18	278	94,7	9,81	3	0,5	–
19	303	94,7	9,81	3	5	RP, NOX, OP
20	50	94,4	9,32	3	5	–
21	115	93,6	9,78	3	5	–
22	65	93,6	9,78	3	2,80	–
23	128	90,6	8,99	3	2,80	–
24	82	90,6	8,99	3	2,80	RP, NOX, OP
25	47	123,8	10,23	3	2,80	–
26	10	123,8	10,23	2	2,80	–
27	20	60,1	7,42	2	2,80	–
28	37	60,1	7,42	2	2,80	RP
R1	108	70,2	8,26	2	6	RP
R2	83	62	7,85	1	-6	RP
R3	50	61,5	7,66	1	4	RP
R4	75	61,5	7,66	1	-4	RP
R5	143	58,3	7,36	1	4	RP

Tabulka A.2: Parametry úseků severního tunelového tubusu

Poznámka: RP značí měření rychlosti proudění, NOX znamená měření koncentrace oxidů dusíku a OP je měření opacity.

Příloha B

Umístění proudových ventilátorů v tunelu Blanka

úsek	soft-start	frekvenčním měnič	typ
3	2	0	APWR 1250
4	0	0	APWR 1250
5	0	0	APWR 1250
6	0	0	APWR 1250
7	1	1	APWR 1250
8	0	0	–
9	3	0	APWR 1250
10	1	1	APWR 1250
11	2	0	APWR 1250
12	1	1	APWR 1250
13	2	0	APWR 1250
14	3	1	APWR 1250
15	0	0	–
16	2	1	APWR 1000
17	0	0	–
18	3	1	APWR 1250
19	0	0	–
20	2	1	APWR 1250
21	0	0	–
22	2	1	APWR 1250
23	0	0	–
24	1	1	APWR 1250
25	0	0	–
26	2	1	APWR 1250
R1	0	0	–
R2	0	1	APWR 1250
R3	0	0	–
R4	1	1	APWR 1250
R5	1	1	APWR 1250

Tabulka B.1: Umístění proudových ventilátorů v jižním tunelovém tubusu

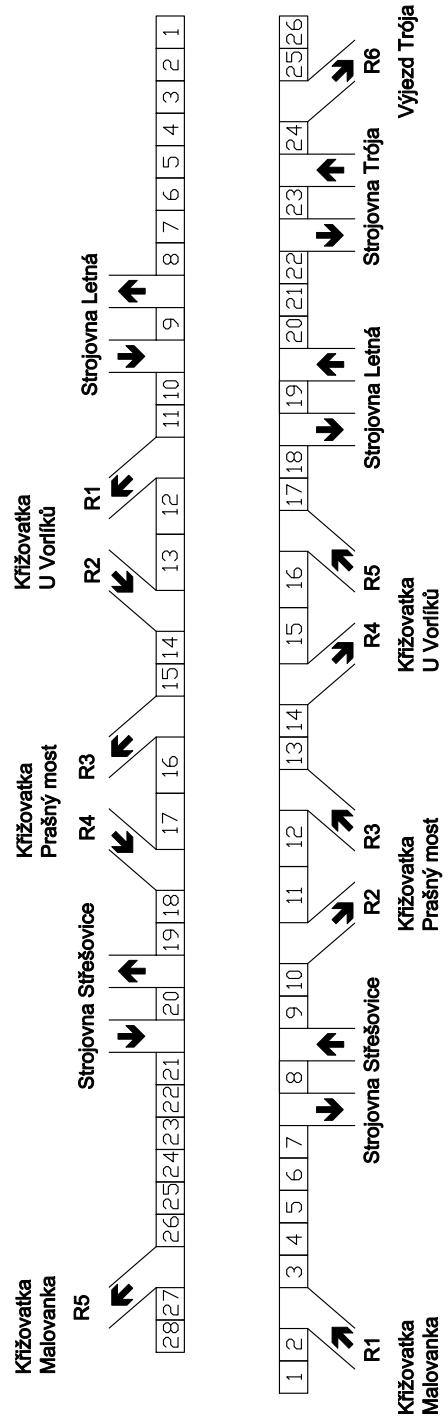
úsek	soft-start	frekvenční měnič	typ
1	3	0	APWR 1250
2	0	0	–
3	1	1	APWR 1250
4	0	0	–
5	2	1	APWR 1250
6	0	0	–
7	0	0	–
8	2	1	APWR 1250
9	2	0	APWR 1250
10	2	1	APWR 1250
11	0	0	–
12	0	0	–
13	2	1	APWR 1250
14	3	1	APWR 1250
15	0	0	–
16	1	1	APWR 1250
17	2	0	APWR 1250
18	2	0	APWR 1250
19	1	1	APWR 1250
20	0	0	–
21	4	0	APWR 1250
22	0	0	–
23	0	0	–
24	0	0	–
25	2	1	APWR 1250
26	0	0	–
27	0	0	–
28	0	0	–
R1	1	1	APWR 1250
R2	1	1	APWR 1250
R3	0	0	–
R4	0	0	–
R5	3	1	APWR 600

Tabulka B.2: Umístění proudových ventilátorů v severním tunelovém tubusu

Příloha C

**Schématické znázornění provozního
větrání**

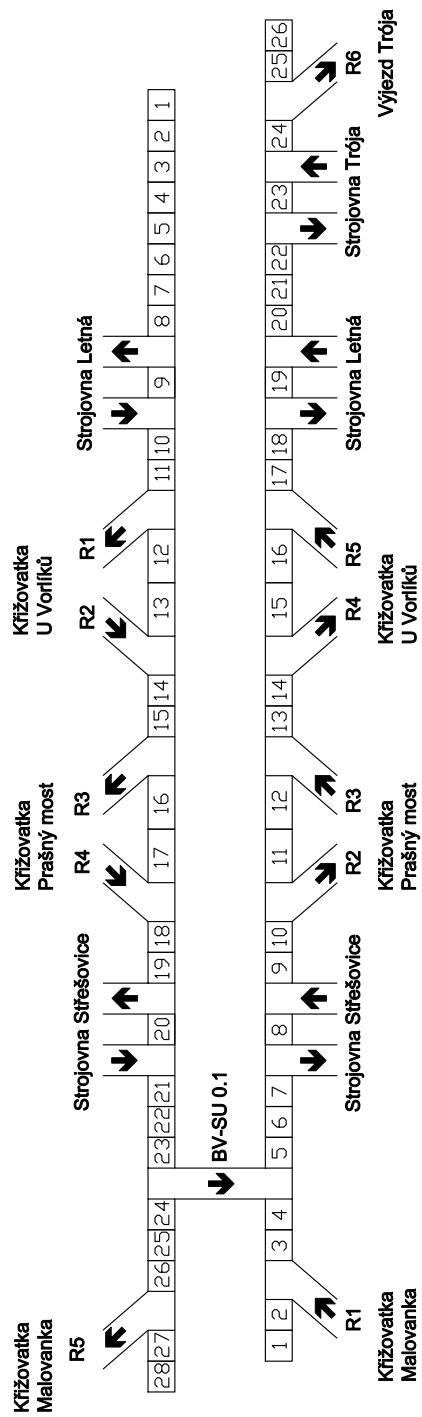
SEVERNÍ TUNELOVÝ TUBUS



JIŽNÍ TUNELOVÝ TUBUS

Obrázek C.1: Schématické znázornění provozního větrání při přirozeném proudění vzduchu. Šipky označují požadovaný směr proudění vzduchu. Není-li šipka ve vzduchotechnickém úseku nakreslena, požadovaný směr proudění vzduchu je stejný jako směr jízdy vozidel.

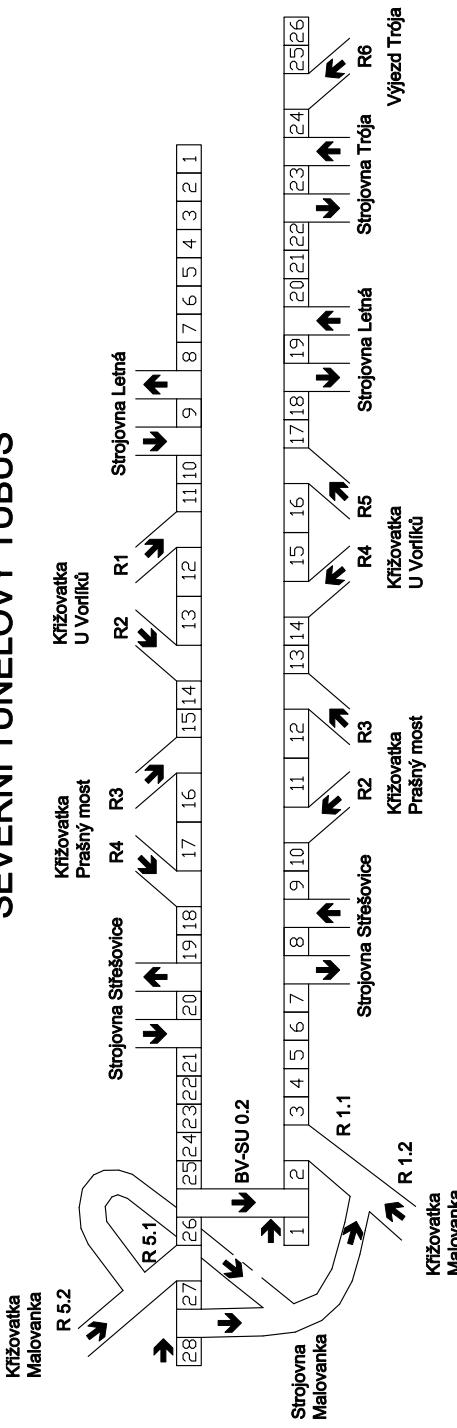
SEVERNÍ TUNELOVÝ TUBUS



JIŽNÍ TUNELOVÝ TUBUS

Obrázek C.2: Schématické znázornění provozního větrání při I. stupni ochrany. Šipky označují požadovaný směr proudění vzduchu. Není-li šipka ve vzduchotechnickém úseku nakreslena, požadovaný směr proudění vzduchu je stejný jako směr jízdy vozidel.

SEVERNÍ TUNELOVÝ TUBUS

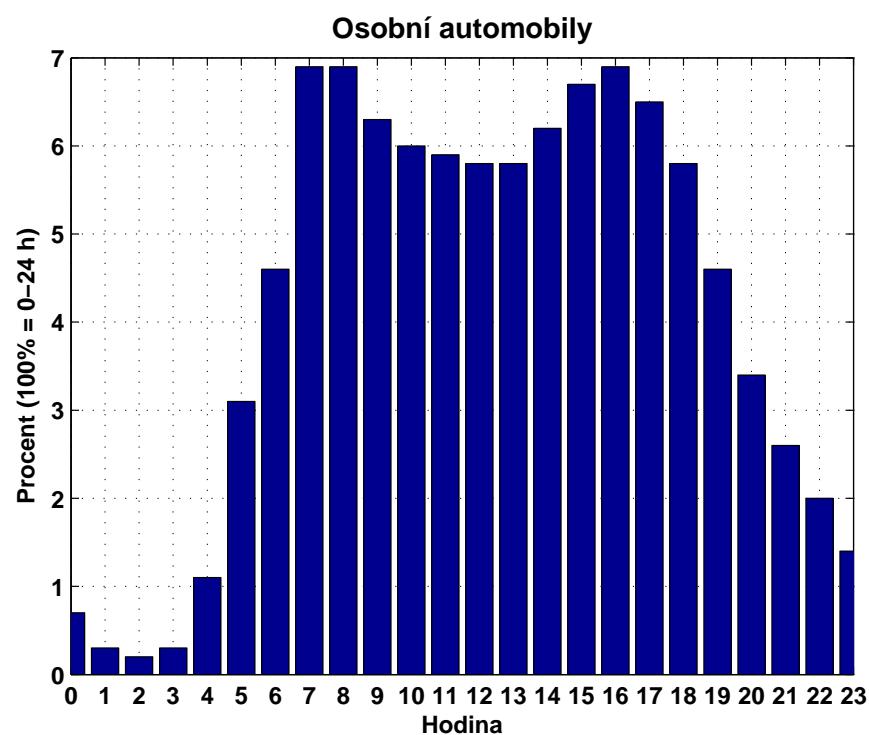


JIŽNÍ TUNELOVÝ TUBUS

Obrázek C.3: Schématické znázornění provozního větrání při II. stupni ochrany. Šipky označují požadovaný směr proudění vzduchu. Není-li šipka ve vzduchotechnickém úseku nakreslena, požadovaný směr proudění vzduchu je stejný jako směr jízdy vozidel.

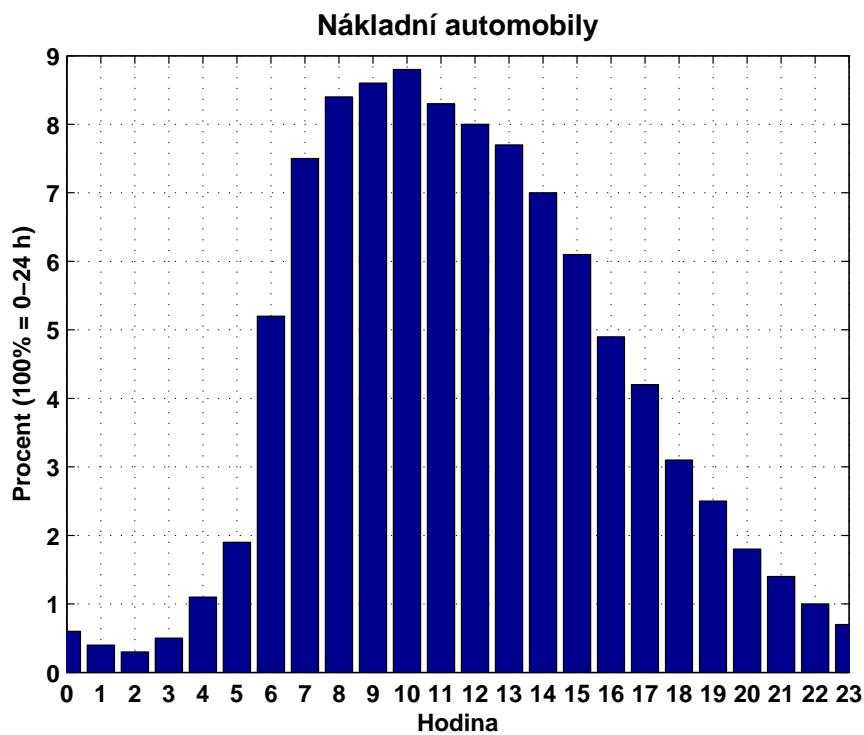
Příloha D

Předpokládaná denní průjezdnost vozidel



Obrázek D.1: Předpokládaná denní variance osobních automobilů v tunelu

Blanka pro rok 2010.



Obrázek D.2: Předpokládaná denní variance nákladních automobilů v tunelu Blanka pro rok 2010.

Předpokládané celkové denní průjezdnosti vozidel na portálech tunelu Blanka jsou uvedeny v tabulce D.1 a D.2.

portál	celková denní průjezdnost
vjezd Trója	18 644
výjezd R1 U Vorlíků	3 100
vjezd R2 U vorlíků	6 500
výjezd R3 Prašný most	5 520
vjezd R4 Prašný most	4 084
výjezd R5 Malovanka	4 203

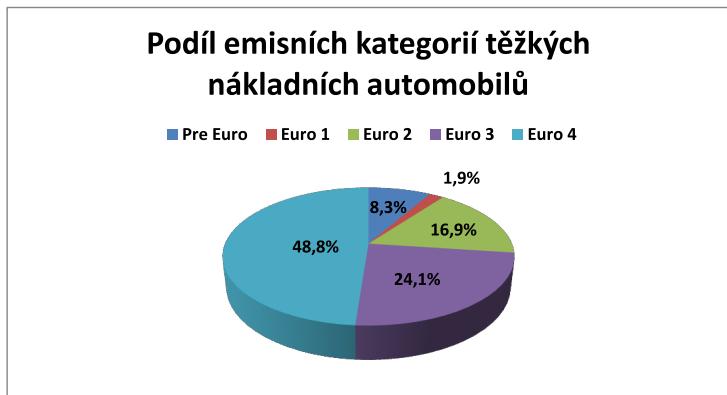
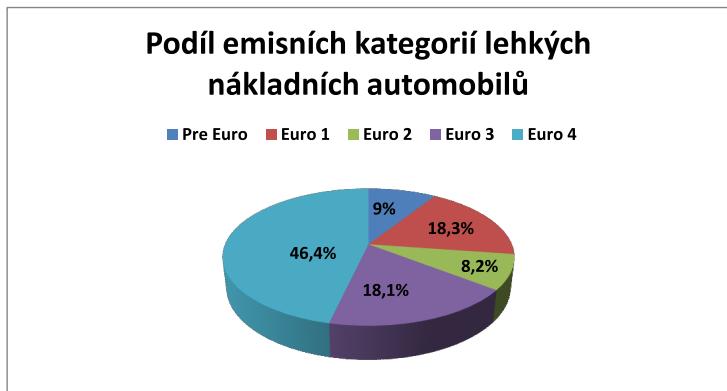
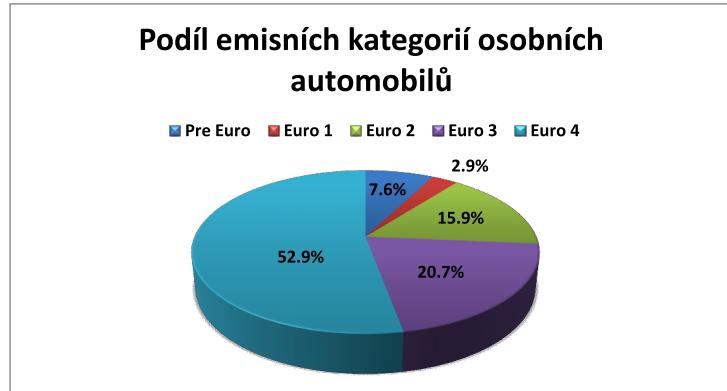
Tabulka D.1: Předpokládané denní průjezdnosti vozidel na portálech severního tubusu.

portál	celková denní průjezdnost
vjezd Malovanka	18 836
vjezd R1 Malovanka	3 058
výjezd R2 Prašný most	5 552
vjezd R3 Prašný most	14 220
výjezd R4 U Vorlíků	3 840
vjezd R5 U Vorlíků	1 092
výjezd R6 Trója	1 218

Tabulka D.2: Předpokládané denní průjezdnosti vozidel na portálech jižního tubusu.

Příloha E

Podíl automobilů v jednotlivých kategoriích emisní normy EURO



Obrázek E.1: Předpokládaný podíl automobilů v jednotlivých kategoriích emisní normy EURO na Městském okruhu v Praze pro rok 2010

Příloha F

Obsah přiloženého CD

- elektronická podoba této práce ve formátu pdf (diplomova_prace.pdf)
- návod k použití uživatelské aplikace (manual.pdf)