

Ing. Jan POŘÍZEK  
SATRA, spol. s r. o.

# Simulace 1-D proudění v portálovém objektu tunelu Blanka

## 1-D Flow Simulation at the Portal Section of Blanka Tunnel

Recenzent  
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

*Součástí mimoúrovňové křižovatky na Malovance, která navazuje na komplex tunelových staveb městského okruhu (MO) v Praze, je stavební řešení výjezdových a vjezdových portálů automobilového tunelu Blanka. Systém větrání tohoto tunelu musí zajistit hygienicky přípustné prostředí uvnitř stavby a maximálně omezit, či přímo zabránit, výnosu exhalací z výjezdových portálů, které vyúsťují v oblasti s bytovou zástavbou. Bylo navrženo takové stavební řešení, které při předpokládané dopravní zátěži MO, tyto požadavky zajistí v závislosti na hospodárném provozu navrženého systému větrání. V tomto příspěvku je stručně popsán způsob větrání řešeného uzlu portálového objektu na Malovance a simulační model jednorozměrného proudění nestlačitelné vazké tekutiny.*

**Klíčová slova:** automobilové tunely, větrání, exhalace

*Structural design of Blanka tunnel exit and entryway portals forms a part of the Malovanka traffic interchange as a continuation of the tunnel structures complex of the city by-pass road system (MO). Ventilation system of this tunnel has to ensure the sanitarly admissible atmosphere inside the structure and to restrict as much as possible, or directly prevent the exhalations from leaving the exit portals into the housing area. A structure form was designed that ensures, under the anticipated MO traffic loading, that these requirements in were met dependence on economical operation of the designed ventilation system. In this contribution, the way of Malovanka junction portal section design based on a simulation model of one-dimensional ventilation flow of an incompressible viscous fluid is shortly described.*

**Key words:** car tunnels, ventilation, exhalations

## ÚVOD

Tunel Blanka je součástí staveb MO v Praze, jehož navržená koncepce spadá již do 90. let minulého století. Hlavním účelem tohoto okruhu je ochrana historického jádra města, zajištění vnitroměstských dopravních vztahů a umožnění regulace dopravy v centrální části města. Celková délka okruhu je cca 33 km. Z hlediska značně členitého terénu, na kterém se Praha rozkládá, uchování historicky založeného urbanismu Prahy a především **požadavků ochrany životního prostředí** jsou pro umístění dopravních staveb v řadě úseků komunikační sítě jediným možným řešením tunely.

Po dokončení MO bude jeho celá 1/3 vedena v tunelech. Tunel Blanka se po dokončení, se svými 5ti km, stane nejdelším tunelem MO. Jedním z kritických uzlů tohoto složitěho tunelového komplexu je soubor stavebních objektů vjezdových a výjezdových portálů v jižní části, které jsou součástí mimoúrovňové křižovatky Malovanka viz obr. 1. Tato křižovatka bezprostředně navazuje na již provozovaný Strahovský tunel.

## POPIS ZPŮSOBU VĚTRÁNÍ

Systém větrání za běžného provozu nebo při vzniku požáru je shodný pro celý tunel Blanka i pro hloubené tunely navazující stavby Strahovského tunelu. Provozní větrání je navrženo jako podélné se třemi příčně napojenými strojnami pro přívod čerstvého a odvod znečištěného vzduchu, které zároveň slouží pro odvod tepla a kouře. V dalším textu se budeme věnovat pouze systému větrání při provozu. Systém větrání portálového objektu Malovanka je navržen tak, aby v co nejvyšší možné míře omezil výnos kumulovaných polutantů z tunelu do prostoru před výjezdními portály.

Zajistit takovýto požadavek ochrany výjezdních portálů proti výnosu je obecně velmi složité a v konečné fázi i velice nákladné. Během základního procesu, při návrhu větrání, dojde ke stanovení potřebného průtoku čerstvého vzduchu, nutného k naředění emitovaných exhalací od projíždějících vozidel na hygienicky přípustnou mez a návrhu potřebného technologického zařízení.

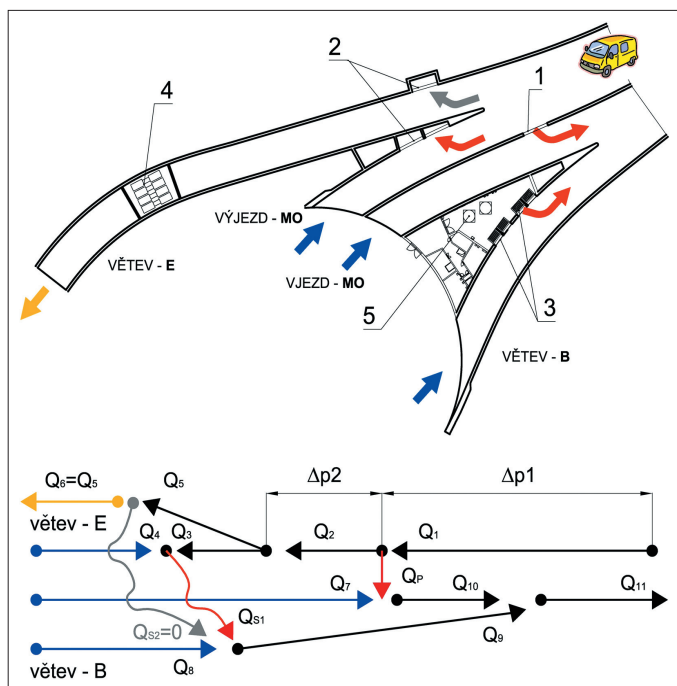


Obr. 1 Model mimoúrovňové křižovatky Malovanka s přehledně viditelnými dvěma výjezdovými a vjezdovými portály (zdroj PUDIS, a.s.)

V tomto případě byl zvolen způsob odvodu vyprodukovaných škodlivin kombinací přirozeného a nuceného převodu znečištěného vzduchu z tunelu před výjezdním portálem do sousedního tunelu v dostatečné vzdálenosti za výjezdovými portály. Jelikož se za běžného provozu díky síle, kterou vyvinou projíždějící vozidla, tunelem dopravuje ohromné množství vzduchu (stovky  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), je výhodné využít brzděného účinku proudových ventilátorů pro snížení rychlosti podélného proudění a tak dosáhnout optimálního průtoku, který bude za minimálních provozních nákladů nuceně odveden. Obdobný způsob ochrany výjezdního portálu proti výnosu exhalací byl již také použit u nedávno zprovozněného tunelu Mrázovka.

Na obr. č. 2 je zobrazeno základní schéma proudění vzduchu v tomto portálovém objektu.

Projíždějící vozidla urychlují vzduch v prostoru tunelu odkud je otvorem ve stěně (pozice 1) část průtoku  $Q_1$ , za vhodných tlakových poměrů, přisává-



Obr. 2 Schéma větrání portálového objektu Malovanka rozděleného na úseky 1 až 11 (označeno průtoky vzduchu  $Q_i$  až  $Q_{11}$ )

na do sousedního tunelu (průtok  $Q_P$ ). Pokud dojde ke zhoršení imisní situace v referenčním místě před výjezdovým portálem, tak se spustí nucený převod ventilátory 5 a nasávaný průtok vzduchu  $Q_{S1}$ ;  $Q_{S2}$  otvory v boční stěně 2. Otvory ve stěně 3 je tento vzduch přiváděn do sousedního tunelu. Proudovými ventilátory 4 lze ovlivňovat tlakové poměry v této paralelně napojené výjezdové větví až do stavu, kdy dojde k nasávání vzduchu tímto portálem  $Q_6$ .

### SIMULACE PROUDĚNÍ

Jelikož je systém větrání v tunelu Blanka navržen tak, aby zabránil výnosu exhalací, zajistil potřebnou kvalitu prostředí uvnitř tunelu a navíc pracoval hospodárně, byla vypracována simulace jednorozměrného stacionárního a nestacionárního proudění vazké nestlačitelné tekutiny pro ověření těchto podmínek. Ovšem samotný matematický model ještě nedává řešiteli informaci v podobě, kterou potřebuje pro vyhodnocení zkoumaného děje. Ta se získá teprve řešením matematického modelu [1]. Díky tomuto matematickému modelu byla ověřena výkonnost a funkčnost navrženého systému větrání.

Pokud je navíc k dispozici nestacionární model soustavy, je možné také řešit dynamiku proudění vzduchu uvnitř tunelu, čili chování tekutiny při sledovaných přechodových změnách. Lze stanovit např. potřebná časová zpoždění, která jsou nezbytně nutná při návrhu logiky řízení a regulace.

### TEORIE

Při průtoku reálné tekutiny trubici konečného průřezu je rychlost  $U(r)$  po průřezu rozložena nerovnoměrně. V tomto případě se počítá se střední rychlostí podle průřezu  $u$ , tj. takovou rychlostí, jež je po celém průřezu konstantní [2]. Soustava vyšetřovaných pohybových rovnic se skládá z rovnice kontinuity a Bernoulliovy rovnice rozšířené o ztráty pro stacionární proudění reálných nestlačitelných tekutin.

Korekční Coriolisův součinitel, který se pro vazké tekutiny v této rovnici vyskytuje, je pro turbulentní proudění  $\kappa \approx 1$ .

Při nestacionárním proudění je nutno část energie vynaložit na urychlení tekutiny a Bernoulliova rovnice bude rozšířena o setrvačnou energii, vyjadřující práci vynaloženou zrychlovacími silami. Odvození pohybové diferenciální rovnice z druhého Newtonova pohybového zákona lze najít v mnoha dostupných zdrojích např. [2]. Při proudění nestlačitelné vazké tekutiny za působení pouze zemské tíže ( $\rho = \text{konst.}$ ) lze tedy psát již upravenou rovnici v integrálním tvaru po dráze  $L$  mezi průřezy 1–2 :

$$gh_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \int_0^L \frac{\delta u}{\delta t} dl + e_{1-2} \quad (1)$$

Vyjádřením a úpravou rovnice ve formě tlaků pro kontrolní oblast mezi místy 1 a 2 v jednom směru dostaneme:

$$\rho g(h_1 - h_2) + (p_1 - p_2) + \frac{1}{2} \rho(u_1^2 - u_2^2) - \rho \int_0^L \frac{\delta u}{\delta t} dl - \Delta p_{z1-2} = 0 \quad (2)$$

Lokální zrychlení (zpoždění) tekutiny  $\frac{\delta u}{\delta t}$  se také označuje  $a_t$ . Nemění-li se průřez potrubí je lokální zrychlení konstantní a po integraci dostaneme setrvačnou energii rovnou  $a_t L$ , kde  $L$  je délka úseku mezi uvažovanými průřezy 1–2.

Mění-li se průřez potrubí, lze zavést tzv. redukovanou délku potrubí  $L_r$ :

$$L_r = \frac{1}{a_{t1}} \int_1^2 a_t dl = A_1 \int_1^2 \frac{dl}{A} \quad (3)$$

vztáženou na průřez 1. Setrvačnou energii lze poté psát ve tvaru  $a_{t1} L_r$ . Redukovaná délka, pro příklad přímého potrubí s přechodem z průřezu  $A_1$  a délky  $L_1$  na průřez  $A_2$  o délce  $L_2$  je rovna:

$$L = L_1 + \frac{a_{t2}}{a_{t1}} L_2 = L_1 + \frac{A_1}{A_2} L_2 \quad (4)$$

Pro nestlačitelné tekutiny platí pro určitý časový okamžik rovnice kontinuity beze změny jako pro stacionární proudění:

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \text{konst.} \quad (5)$$

Při vyšetřování jednorozměrného stacionárního nebo nestacionárního proudění uvnitř tunelu se vymezi kontrolní oblast ohraničená vjezdovými a výjezdovými portály, přičemž v místech portálů dochází k vyrovnání tlakových účinků uvnitř tunelu s atmosférickým tlakem.

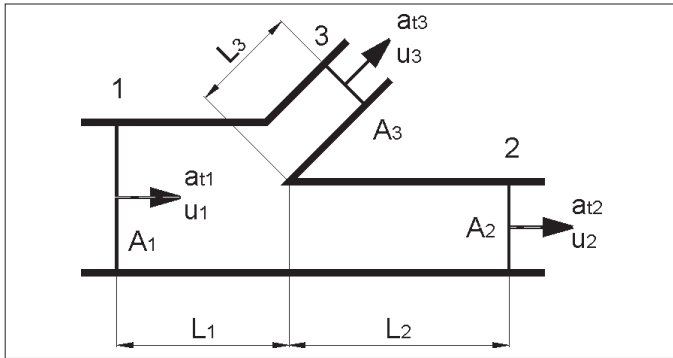
Pokud budeme uvažovat stejné atmosférické tlaky na portálech, tak na základě tohoto principu lze v pohybové rovnici pracovat pouze s celkovými tlakovými zisky (účinky) a ztrátami uvnitř vyšetřované oblasti (na rozdíl od tunelů v horských oblastech, kde může rozdíl atmosférických tlaků před portály dosáhnout až několika stovek Pa). Přepsáním pohybové rovnice (2) do vhodného tvaru:

$$\Delta p_E - \Delta p_z - \Delta p_a = \Delta p = 0 \quad (6)$$

kde

$$\begin{aligned} \Delta p_z &\text{ jsou tlakové ztráty v úseku} \\ \Delta p_a &= \rho \cdot a_t L, \text{ přičemž } \rho = \text{konst. a} \\ \Delta p_E &= \Delta p_{pe} + \Delta p_{JF} + \Delta p_{ch} + \Delta p_{wind} + \Delta p_v \end{aligned} \quad (7)$$

jsou součty rozhodujících energetických zisků uvažovaných v tomto modelu v úsecích navazujících sériově za sebou. Tyto jednotlivé členy rovnice mohou nabývat kladné nebo záporné hodnoty podle toho, jestli proudění ve vyšetřovaném směru podporují nebo naopak brzdí a tím zvyšují přírůstek tlakových ztrát.



Obr. 3 Názorné zobrazení proudění v rozbočce se sériově a paralelně napojenou větví

V soustavě úseků tunelu, které na sebe navazují a tvoří sériově-paralelní síť, musí platit podmínka kontinuity a podmínka rovnosti tlaků v rozbočkách za spojením a před dělením dvou proudů ze společné větve „c“ do přímé „st“ a boční „s“ větve.

$$\Delta p_{st-c} = \Delta p_{s-c} = 0 \quad (8)$$

Pro řešení jednorozměrného nestacionárního proudění v rozbočce, ve které dochází k dělení průtoku do přímé a boční větve dle obr. 3, lze psát soustavu dvou pohybových rovnic a jedné rovnice kontinuity. Převedením diferenciálních rovnic na rovnice diferenční je umožněno řešit proudění v tunelu iteračním postupem. Lokální zrychlení v rovnici  $a_t = \frac{\delta u}{\delta t}$  (2) lze

tedy přepsat do tvaru  $a_t = \frac{\Delta u}{\Delta t}$ . Soustavu rovnic lze tedy po příslušné úpravě rozepsat následovně:

$$(\pm \Delta p_E - \Delta p_z)_1 + (\pm \Delta p_E - \Delta p_z)_2 - L_1 \frac{\Delta u_1}{\Delta t} - L_2 \frac{\Delta u_2}{\Delta t} = 0$$

$$(\pm \Delta p_E - \Delta p_z)_1 + (\pm \Delta p_E - \Delta p_z)_3 - L_1 \frac{\Delta u_1}{\Delta t} - L_3 \frac{\Delta u_3}{\Delta t} = 0$$

$$(u_1 + \Delta u_1)A_1 = (u_2 + \Delta u_2)A_2 + (u_3 + \Delta u_3)A_3 \quad (9)$$

Matematickou úpravou těchto tří na sobě nezávislých rovnic vyjádříme přírůstky rychlosti  $\Delta u_1$ ,  $\Delta u_2$  a  $\Delta u_3$ .

Tímto způsobem lze nalézt a sestavit nezávislé rovnice pro jakýkoliv směr proudění při dodržení zákona zachování hmoty. Jedinou nutnou podmínkou zůstává zachování spojitého řešení součinitele místní tlakové ztráty v místě změny směru proudění.

Numerické řešení hledané rychlosti proudění  $u_1$ ,  $u_2$  a  $u_3$  je pak v čase s krokem  $\Delta t = t_{(j+1)} - t_{(j)}$  kde čas  $t_{(j)} = j \cdot \Delta t$  s krokem  $j$ :

$$u_{i(j+1)} = u_{i(j)} + \Delta u_{i(j)} \quad (10)$$

kde  $i = 1, 2, 3; j = 0, 1, 2, \dots, n$

Řešení stacionárního jednorozměrného proudění je v současné době díky integrovaným numerickým řešitelům v robustních matematických programech typu MATLAB, nebo uživatelsky snadno přístupném softwaru jako je např. Microsoft® Excel velice snadné. Odpadá výběr a programování vhodné numerické metody a veškerá činnost může být proto soustředěna pouze na tvorbu aerodynamického modelu vyšetřovaného proudění. Matematický 1-D model stacionárního proudění v objektu Malovanka byl vytvořen na základě výše popsaného principu, přičemž v rovnici (6) odpadá

člen lokálního zrychlení a soustava nalezených rovnic pro sériově-paralelní řazení úseků dle schématu na obr. 2 může být následující:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 + \Delta p_p + \Delta p_{10} + \Delta p_{11} &= 0 \\ Q_2 &= Q_1 - Q_p = u_2 \cdot A_{T2} \\ \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 &= \Delta p_4 \\ \Delta p_3 &= \Delta p_4 + \Delta p_5 \\ Q_5 &= Q_2 - Q_3 = u_5 \cdot A_{T5} \\ \Delta p_7 + \Delta p_{10} + \Delta p_{11} &= 0 \\ \Delta p_7 + \Delta p_{10} &= \Delta p_9 + \Delta p_8 \\ Q_4 + Q_3 + Q_8 &= Q_9 = u_9 \cdot A_{T9} \\ Q_{10} + Q_9 &= Q_{11} = u_{11} \cdot A_{T11} \\ \Delta p_8 + \Delta p_9 + \Delta p_{11} &= 0 \\ Q_p &= Q_{10} - Q_7 = u_p \cdot A_p \end{aligned} \quad (11)$$

kde rychlosti  $u_i$  až  $u_p$  jsou neznámé a jsou hledaným řešením celé soustavy rovnic.

Algoritmus výpočtu byl napsán v programu Excel a k řešení byl použit iterační postup integrovaný do nástroje „řešitel“, vyvinutý společností Frontline Systems, Inc., který je schopen řešit lineární i nelineární soustavu rovnic se zahrnutím okrajových podmínek. V řešení bylo postupováno podle redukované soustavy rovnic (11) s chybou  $\varepsilon \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ . Pro numerické řešení je výhodné soustavu uvedených 11-ti rovnic redukovat pouze na 6 podmínek rovnosti tlaků a podmínky kontinuity o 5ti neznámých lze integrovat přímo do algoritmu a výpočet tak urychlit.

## PŮSOBÍCÍ SÍLY V TUNELU

K proudění v tunelu dojde tehdy, když na pomyslný vzduchový válec (vnitřní objem tunelového tělesa) začnou působit vnější síly. Předpokládány byly stejné atmosférické tlaky v místech portálů. Převýšení portálů je nevýznamné, proto nebylo počítáno s termickým vztlakem a s působením větru na portál (členy  $\Delta p_{ch}$  a  $\Delta p_{wind}$  v rovnici 7 jsou rovny 0). Rozepsáním do formy celkových tlakových účinků působících v dané oblasti dostaneme při vyšetřování jednorozměrného proudění vztahy pro:

### Pístový efekt

$$\Delta p_{pe} = \frac{(A \cdot c)_{veh}}{A_T} \cdot n_{veh} \cdot \frac{1}{2} \rho (v \pm u)^2 \quad (12)$$

Projíždějící vozidla uvádějí vzduch v tunelu do pohybu. Pokud je rychlost jízdy vozidel vyšší než rychlost proudění v tunelu ( $v \geq u$ ), pak pístový účinek vyjadřuje tlakový zisk a člen  $\Delta p_{pe}$  bude vždy kladný. Za situace, kdy je rychlost vozidel nižší (nebo nulová) než podélná rychlost proudění, vozidla brání proudění vzduchu a člen  $\Delta p_{pe}$  je záporný, neboť zvyšuje celkovou tlakovou ztrátu úseku. V případě, že směr rychlosti podélného proudění  $u$  není shodný se směrem rychlosti projíždějících vozidel  $v$ , je člen v závorce s kladným znaménkem, v opačném případě bude znaménko záporné.

### Tlakový účinek vyvolaný tahem proudových ventilátorů

Základní charakteristika tahu proudového ventilátoru ve volném prostředí vychází z hybnosti proudu ve výstupní rovině ventilátoru [5]:

$$F_{JF} = \rho \cdot Q_{JF} \cdot u_{JF} = \rho \cdot A_{JF} \cdot u_{JF}^2 \quad (13)$$

Rozdíl tlaků vyvozený tahem proudového ventilátoru v proudu vzduchu s rychlostí  $u$  a s hustotou  $\rho$  včetně korekce se vyjádří:

$$\Delta p_{JF} = \eta_{JF} \frac{F_{JF} \cdot \eta_{JF}}{A_T} \left( 1 - \frac{u}{(\pm u_{JF})} \right) \quad (14)$$

Na základě věty o změně hybnosti a orientace tahové síly v souřadném systému kontrolní oblasti [2] lze konstatovat, že pokud proudový ventilátor působí tahem tak, aby podporoval rychlost podélného proudění ve vyšetřovaném směru, pak je znaménko u členu v závorce záporné, v opačném případě, kdy proudový ventilátor brzdí proudění vzduchu je tento člen kladný.

Účinnost přeměny tahu na tlak  $\eta_{JF}$  v sobě zahrnuje korekci vlivu umístění proudových ventilátorů v tunelu.

Např. v literatuře [6] lze nalézt popsání principu působení proudového ventilátoru v prostoru tunelu a jeho odvození.

### Tlak vyvolaný nuceným odvodem vzduchu z tunelu

Velikost podtlaku nebo přetlaku v tunelu vyvolaného činností ventilátorů příčně napojených strojoven, při správně stanovených tlakových ztrátách v pracovním bodě ventilátorů, se pohybuje v desítkách Pascalů. Pokud je tato velikost známa, je výhodné použít vztah popisující charakteristiku ventilátoru:

$$\Delta p_v = C \cdot Q_v^2 \quad (15)$$

kde  $Q_v$  je odváděný nebo přiváděný objemový průtok příčně napojenou strojovnou vzduchotechniky a  $C$  je charakteristika sítě odpovídající nominálnímu průtoku strojovnou při maximálním podtlaku/přetlaku v místě napojení na tunel vůči atmosféře (srovnávací hladina absolutního tlaku při zanedbání atmosférického tlaku uvažovaná v místě portálů).

## HYDRAULICKÉ ZTRÁTY

Mnohdy rozporuplnou částí aerodynamického modelu jsou tlakové ztráty vyšetřované potrubní sítě, kterou v našem případě tvoří sério-parallelní úseky tunelu. Je vždy nutné zvolit nebo najít takové vztahy, které s patřičnou přesností nebo podobností charakterizují geometrii tunelového tělesa.

Celková tlaková ztráta daného úseku tunelového tělesa se stanoví jako součet ztrát způsobených třením a ztrát místními odpory.

$$\Delta p_z = \left( \lambda \frac{L}{D_h} + \sum \zeta_i \right) \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (16)$$

### Ztráty způsobené třením

Implicitní tvar analytického vztahu pro výpočet součinitele tření podle Colebrook-White [7] se obecně považuje za nejpřesnější.

$$\lambda = \frac{1}{\left[ 2 \cdot \log \left( \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right) + \frac{\varepsilon / D_h}{3,7} \right]^2} \quad (17)$$

Jelikož se jedná o řešení soustavy nelineárních obyčejných diferenciálních rovnic, je žádoucí použít vztah ve tvaru explicitním. Byl zvolen vztah podle Swameeho a upravený prof. Hemzalem kde konstanta  $K = 1,318$  [8].

$$\lambda = \frac{K}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_h} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (18)$$

### Ztráty místními odpory

U jednosměrných tunelů bez paralelních úseků napojených na páteřní tunelové těleso se běžně uvažuje se ztrátami vstupem, výstupem, změnami velikosti příčného profilu nebo případně příčným napojením nuceného odvodu/přívodu vzduchu.

U tunelu s paralelně napojenými úseky je aerodynamické schéma doplněno o ztráty rozbočkami při spojování, nebo dělení proudů. Za dostatečně přesné byly shledány a ověřeny analytické závislosti publikované I.E. Idělčíkem v 60. a 70. letech minulého století. Zde použité vztahy dle [7] a [9] jsou uvedeny pro  $\text{Re} > 10^4$ .

Velikost součinitele tlakové ztráty vstupem  $\zeta_{in} = 0,6$  (pro portál, který je v daném okamžiku v podtlaku vůči okolí) a výstupem  $\zeta_{out} = 1,1$  (pro portál, který je v daném okamžiku v přetlaku). Další ztrátové součinitele popisují geometrii větvených tunelů s hloubenými a raženými úseky proměnného průřezu.

### Zúžení

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho \cdot u_0^2 / 2} = C_r \left( 1 - \frac{A_0}{A_2} \right)^{3/4} \quad (19)$$

kde: součinitel tvaru přechodu byl zvolen  $C_r = 0,5$ .

### Rozšíření

Analytické řešení vycházející z Bordova vztahu předpokládá dostatečnou délku přímého potrubí ( $l \approx 10 \div 12D$ ) za náhlým rozšířením

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho \cdot u_0^2 / 2} = \left( 1 - \frac{A_0}{A_2} \right)^2 \quad (20)$$

index „0“ přísluší vždy k menšímu průřezu ze dvou, mezi kterými dochází k přechodu, a to jak u zúžení, tak i u náhlého rozšíření

### Spojení proudů za rozbočkou

V tomto případě je uvažováno s napojením paralelního úseku boční větve (s) pod úhlem  $15^\circ$  na páteřní tunel MO dělený na přímý úsek (st) před spojením a společný úsek (c) za spojením:

Uvedené vztahy platí pro napojení pod úhlem  $\alpha$  v intervalu  $0$  až  $90^\circ$  pro boční větve platí

$$\zeta_{c \cdot s} = B \left[ 1 + \left( \frac{u_s}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_{st}}{A_c} \left( \frac{u_{st}}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_c}{A_s} \left( \frac{u_s}{u_c} \right)^2 \cdot \cos \alpha \right] + K_s \quad (21)$$

pro přímou větve platí v případě že  $A_s + A_{st} > A_c$ ;  $A_{st} = A_c$  tak

$$\zeta_{c \cdot st} = 1 - \left( 1 - \frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 - \left( 1,4 - \frac{Q_s}{Q_c} \right) \left( \frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 \cdot \sin \alpha - 2 \cdot K'_{st} \frac{A_c \cdot Q_s}{A_s \cdot Q_c} \cos \alpha \quad (22)$$

v případě že platí  $A_s + A_{st} = A_c$  tak

$$\zeta_{c \cdot st} = 1 + \left( \frac{u_{st}}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_{st}}{A_c} \left( \frac{u_{st}}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{A_c}{A_s} \left( \frac{u_s}{u_c} \right)^2 \cos \alpha + K''_{st} \quad (23)$$

### Dělení proudů za rozbočkou

Uvedené vztahy platí pro odbočení pod úhlem  $\alpha$  v intervalu  $0$  až  $90^\circ$  pro boční větve platí

$$\zeta_{c \cdot s} = B' \cdot \left[ 1 + \left( \frac{u_s}{u_c} \right)^2 - 2 \frac{u_s}{u_c} \cos \alpha \right] - K'_s \left( \frac{u_s}{u_c} \right)^2 \quad (24)$$

pro přímé napojení platí

$$\zeta_{c-st} = \tau_{st} \left( \frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 \quad (25)$$

**Spojení proudů za podmínky že**

$$A_R = A_L; Q_c = Q_R + Q_L$$

součinitel místní tlakové ztráty v přímém úseku ze strany L (zleva) nebo R (zprava)

$$\zeta_{ic-s} = B \left\{ 1 + \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^2 + 3 \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^2 \cdot \left[ \left( \frac{Q_i}{Q_c} \right)^2 - \left( \frac{Q_i}{Q_c} \right) \right] \right\} \quad (26)$$

kde i = L nebo R.

**Dělení proudů**

$$\zeta_{ic-s} = 1 + k \left( \frac{u_s}{u_c} \right)^2 \quad (27)$$

kde velikost koeficientu k závisí na typu použitého T spoje. Pro zaústění průvodního vzduchovodu do tunelového tělesa byla zvolena velikost k = 0,3.

Koeficienty B, K<sub>s</sub>, K<sub>st</sub>, τ<sub>st</sub> atd. jsou funkcí f (A<sub>s</sub>/A<sub>c</sub>; Q<sub>s</sub>/Q<sub>c</sub>, α, ...), přičemž jejich konkrétní hodnoty lze vyhledat v literatuře [7], [9].

Součinitelé místní tlakové ztráty v přímém směru ζ<sub>c,st</sub> a do odbočky ζ<sub>c,s</sub> jsou vztahy k rychlosti u<sub>c</sub>.

$$\zeta_{c-s} \equiv \frac{\Delta p_s}{\rho \cdot u_c^2 / 2}$$

$$\zeta_{c-st} \equiv \frac{\Delta p_{st}}{\rho \cdot u_c^2 / 2} \quad (28)$$

Pro přepočítání na rychlosti u<sub>s</sub> a u<sub>st</sub> ve větvicích se úsecích platí vztahy

$$\zeta_s = \frac{\Delta p_s}{\rho u_s^2 / 2} = \frac{\zeta_{c-s}}{(u_s / u_c)^2}$$

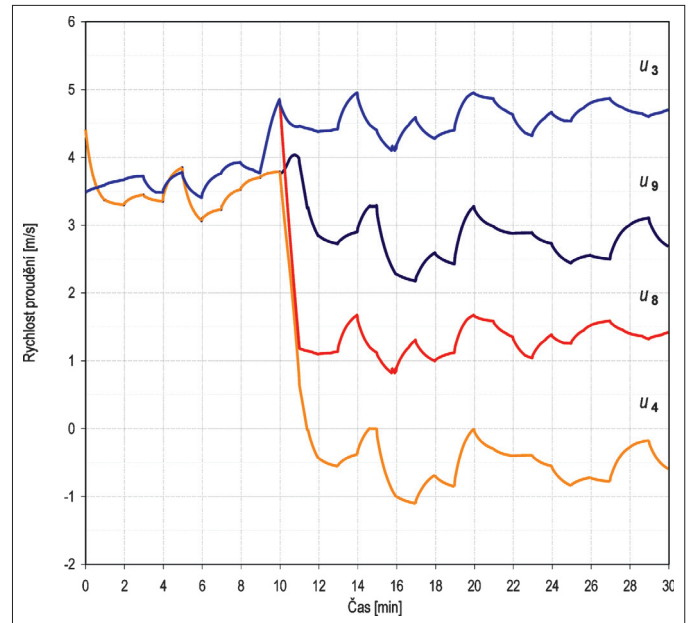
$$\zeta_{st} = \frac{\Delta p_{st}}{\rho u_{st}^2 / 2} = \frac{\zeta_{c-st}}{(u_{st} / u_c)^2} \quad (29)$$

**VÝSLEDKY**

V grafu na obr. 4 je zobrazen průběh rychlostí proudění v páteřním výjezdovém úseku MO a vjezdové větvi B dle obr. 2, při modelování průjezdu vozidel za současného stavu špičkové intenzity dopravy na MO v Praze. Vstupní data o projíždějících vozidlech byla získána z měření v tunelu Mrázovka. V grafu je vykreslena situace, kdy v 10. minutě dojde ke spuštění nuceného převodu (Q<sub>p</sub>) za přispění brzdícího účinku proudových ventilátorů ve větvi MO.

Doba náběhu axiálních a proudových ventilátorů na nominální výkon byla uvažována dle skutečných parametrů běžně dodávaných zařízení různými výrobci (30 s). Je zde názorně vidět diskrétní změna rychlosti proudění vyvolané diskrétními změnami průjezdu vozidel v místě měření rychlosti proudění. Tato skutečnost např. poukazuje na nutnost průměrování této veličiny během procesu regulace.

Na základě charakteristických modelů dopravní situace předpokládaného špičkového provozu byly stanoveny počáteční a okrajové podmínky potřebné pro tvorbu CFD modelu, jehož řešením se získá např. přehled o chování proudění vzduchu v blízkosti otvoru (Q<sub>p</sub>) v dělicí přičce mezi tunely a jeho efektivnosti při přirozeném a nuceném proudění.



Obr. 4 Průběh rychlostí proudění v čase

Tab. Výsledky simulace stacionárního proudění pro výpočet CFD modelu portálového objektu Malovanka

Q <sub>i</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>5</sub>	Q <sub>S1</sub>	Q <sub>9</sub>	Q <sub>11</sub>
213	38	193	224	374
199	18	166	253	501

Výsledky průtoků v tabulce reprezentují dva případy při špičkové intenzitě vozidel, za různých tlakových poměrů uvnitř tunelů, při kapacitně omezeném brzdícím chodu proudových ventilátorů.

**ZÁVĚR**

Vytvořeným matematickým modelem a změnou jeho parametrů lze analyzovat odezvy a získávat poznatky o vlastnostech soustavy, které budou použity při tvorbě algoritmu řízení a regulace systému větrání v rámci skutečných možností regulované soustavy.

Takovýto jednorozměrný simulační model lze také s úspěchem využít k modelování proudění vzduchu i kouře při vzniku požáru.

Uvedené aerodynamické schéma se dá taktéž použít např. pro tvorbu simulačního trenažéru systému větrání pro modelování neočekávaných situací a jejich následné řešení v praxi.

Řešením stacionárního modelu větrání se získá rychlost průtoku vzduchu v tunelu a následně je možné:

- ❑ stanovit průtoky vzduchu portály a místy, kde jsou předpokládána čidla měření fyzikálních veličin
- ❑ stanovit, kdy je zapotřebí brzdit podélné proudění tak, aby bylo z maximální možné míře zabráněno vnosu
- ❑ také stanovit koncentrace sledovaných škodlivin

Kontakt na autora: e-mail: jan.porizek@satra.cz

Text článku byl přednesen na 4. konferenci IBPSA-CZ Simulace budov a techniky prostředí 2006, Praha, 7. listopadu 2006.



**Použité zdroje:**

[1] Noskovič, P.: Modelování a identifikace systémů; MONATEX a.s.; 1999; 276 s. ISBN 80-7225-030-2  
 [2] Ježek, J., Váradiová, B., Adamec, J.: Mechanika tekutin, Vydavatelství ČVUT, 2000. 150 s. ISBN 80-01-01615-3  
 [3] Microsoft © Excel 2000 – nápověda  
 [4] Ventilation Report from Permanent International Association of Road Congresses (PIARC); Road Tunnels: Emissions, Ventilation Environment. 1995  
 [5] B.B. Dally, *Woods Practical Guide to Fan Engineering*. Colchester G.B. (1992)  
 [6] Meidinger. U.: Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläsen. Schweizerische Bauzeitung, 1964, 82. Jahrgang Heft 28, s. 489-504  
 [7] Idelchik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, Begell House – 3rd Edition, Inc., 2001. 790 s. ISBN 1-56700-074-6  
 [8] Hemzal, K.: Součinitel tření při proudění tekutin – komparace vztahů. Vytápění, větrání, instalace, 12, č.1, Praha 2003, str. 30-32  
 [9] Idelchik, I.E.: Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam, Masinstrojenije, Moskva 1975. 559 s.  
 [10] Nový, R. a kol.: Technika prostředí, Vydavatelství ČVUT, 2000. 265 s. ISBN 80-01-02108-4  
 [11] Ježek, J., Hemzal, K., Jašková, H.: Sběrka příkladů z mechaniky tekutin; Praha; Vydavatelství ČVUT; 1973  
 [12] Hemzal, K.: Větrání tunelu Mrázovka – VTT; Simulace proudění vzduchu východním tunelem. [Zpráva č. 09/2000 – He pro SATRA s. r. o.] Praha, listopad 2000, 11 s., 11 příloh

**Přehled označení**

- $u$  rychlost proudění [ $m.s^{-1}$ ]
- $Q$  průtok vzduchu [ $m^3.s^{-1}$ ]
- $\Delta p$  rozdíl tlaků v definovaném úseku [Pa]

- $L$  délka úseku [m]
- $a_i$  lokální zrychlení [ $m.s^{-2}$ ]
- $A$  plocha průřezu [ $m^2$ ]
- $g$  tíhové zrychlení [ $m.s^{-2}$ ]
- $h$  výška v daném místě [m]
- $Re$  Reynoldsovo číslo
- $D_h$  ekvivalentní hydraulický průměr [m]
- $F$  tah proudového ventilátoru [N]
- $n$  počet
- $c$  odporový součinitel
- $\rho$  hustota vzduchu [ $kg.m^{-3}$ ]  $\rho = 1,2$
- $v$  rychlost jízdy vozidel [ $m.s^{-1}$ ]
- $\eta$  účinnost přeměny tahu na tlak
- $\lambda$  součinitel tření
- $\varepsilon$  relativní drsnost
- $\zeta$  součinitel místní tlakové ztráty
- Indexy – pokud není vysvětleno v textu  
 1,2... obecně označení daného úseku

- $JF$  vztahující se k proudovému ventilátoru
- $T$  vztahující se k tunelu
- $veh$  vztahující se k vozidlům v tunelu
- $s$  označení boční větve
- $st$  označení přímé větve
- $c$  označení společné větve
- $ch$  rozdíl tlaků způsobený vztlakem
- $wind$  rozdíl tlaků způsobený působením větru
- $P$  přirozený průtok vzduchu v otvoru mezi tunely
- $S1$  nucený průtok mezi výjezdem MO a větví B
- $S2$  nucený průtok vzduchu mezi větví E a větví B. ■

**\* Kombinace centrální klimatizace a VRF zařízení je ideální?**

Pro novostavby i rekonstrukce administrativních budov hledají architekti, projektanti a uživatelé „ideální“ klimatická zařízení. Tato zařízení mají být, pokud možno, investičně i provozně nízko nákladová, mají mít dostatečně vysoký tepelný výkon s rezervami a v místnostech zajišťovat dobrou hygienickou kvalitu vzduchu a pocit pohody. Zařízení mají dále automaticky reagovat na aktuální tepelnou nebo chladič potřebu, s možností individuální obsluhy uživatelů místností. Již delší dobu se zabývají odborníci otázkou, zda se ke klimatizaci hodí nejlépe centrální systém v kombinaci s decentrálními jednotkami VRF (s proměnným průtokem chladiva).

Jako příklad uvedme budovu, u níž se změnil majitel, který bude odlišně využívat pracovní plochy s rozsáhlým technickým vybavením (PC, tiskárny, automaty na kávu atd.) a s vyšším personálním osazením. Na to stávající klimatizace nestačí. Co dělat? Instalovat chladič agregát o vyšším výkonu a příp. i silnější ventilátory? Snížením teploty přiváděného vzduchu za současného zvýšení přiváděného vzduchu povede k pocitu nepohody. Možností řešení problému je doplnit stávající klimatická zařízení systémem VRF-Multisplit. Ten se skládá z kompaktní, vzduchem chlazené jednotky s kompresorem a kondenzátorem, z níž jsou vedeny tenké měděné trubky až do 60 vnitřních jednotek s chladivem R 407C nebo R 410A, kterými je nasáván vnitřní vzduch (sekundární) a individuálně tepelně a příp. i vlhkostně upravován.

Druhou možností jsou tzv. výparníkové pakety systému VRF, kterými se dovybaví přívodní kanály před místnostmi nebo před jednotlivými zónami. Tyto pakety se např. skrývají v mezistropích a podle potřeby doupravují přiváděný vzduch z centrální klimatizace. Takovýto výparníkový paket systému VRF je příp. možno instalovat i do centrální klimatické jednotky.

Přídavné systémy VRF mají řadu výhod. Kromě úspor energie a možnosti individuální regulace, zabírají i málo místa.

**\* Průtokoměr na baterii odečítá mobil**

Německý výrobce potrubních měřicích systémů Krohne Messtechnik z Duisburgu uvedl na trh nový elektromagnetický průtokoměr na vodu Waterflux 2070 s digitálním panelem a telemetrickým odečítáním mobilem.

Spojuje výhody mechanických průtokoměrů s elegantním řešením jejich nevýhod – měří u velkých průměrů, v obou směrech průtoku, při náhlých změnách tlaku a ve vodě s obsahem částic. Umožňuje instalaci na místech vzdálených od zdroje síťového proudu zdrojem z NiMH baterie se životností min. 6 let a se spotřebou energie až 5000krát nižší než u běžných elektromagnetických průtokoměrů. Senzory změny magnetického pole jsou uloženy v plastové výstelce.

Nevyžaduje filtry ani čištění usazenin. Významnou výhodou je to, že s rostoucím průměrem DN jejich cena nestoupá lineárně.

Vyrábí se v přírubovém provedení dle DIN a ANSI pro DN 50 až 600 a ve stavební délce dle ISO 13359 s možností instalace v jakékoliv poloze i pod zemí a pod vodou. Umožňuje až 4 měření za minutu v přesnosti +0,40 % (s nižší frekvencí měření roste přesnost a životnost baterie) a diagnostiku v souladu s OIML R49, EN 14154, ISO 4064 a MI-001.

Diagnostika hlásí poruchy senzoru, elektroniky, stavu baterie a vysílá alarm stavu nouze. Senzory jsou kabelem spojeny s vestavěným modulem pro ukládání dat průtoku a telemetrické vysílání přes GSM na nejbližší převaděč mobilní sítě SMS a GPRS s odečítáním na mobilním telefonu a internetu po celém světě.

Je určen pro použití u všechny druhy vod – pitnou, neupravenou, užitkovou, technologickou a odpadní v obtížně přístupných místech a u liniových vedení, kde je instalace spojená a zdroje síťového proudu neekonomická.