

Daniela Ďurčanská – Milan Moravčík \*

## POSUDZOVANIE VPLYVU AUTOMOBILOVEJ DOPRAVY NA ZNEČISTENIE OVZDUŠIA

### ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ROAD TRAFFIC ON AIR POLLUTION

*Negatívny vplyv dopravy na znečistenie ovzdušia je všeobecne známy. Automobilová doprava má veľký podiel na znečisťovaní prízemnej vrstvy atmosféry, v ktorej sa rozvíja život, špeciálne imisií, t. j. koncentrácie emitovaných znečisťujúcich látok. Dôvodom je emisia hlavných znečisťujúcich látok z automobilovej dopravy tesne nad povrchom zeme (CO – oxid uhličitý, NO<sub>x</sub> – suma oxidov dusíka a VOC – prchavé organické zlúčeniny).*

*Príspevok sa zaoberá vplyvmi automobilovej dopravy na znečisťovanie ovzdušia a metodikou na výpočet množstva produkováných znečisťujúcich látok, ktorá sa pre tento účel používa.*

#### 1. Úvod

Problém znečistenia ovzdušia od automobilovej dopravy nie je možné riešiť zvýšením výšky vypúšťania znečisťujúcich látok, ako sa to rieši pri priemyselných zdrojoch, kde sa dosiahnutie prípustných imisných limitov rieši stanovením tzv. minimálnej výšky komína. Znížiť dopad automobilovej dopravy na znečistenie ovzdušia prízemnej vrstvy atmosféry znamená znížiť emisie znečisťujúcich látok automobilov technickým zdokonalením spaľovania, zachytením, popriprade transformáciou znečisťujúcich látok katalyzátormi. Ďalším riešením môže byť odklonenie alebo presmerovanie automobilovej dopravy v oblasti s najviac znečisteným ovzduším.

#### 2. Vplyv dopravy na znečistenie ovzdušia

Zaťaženie životného prostredia ľudskou činnosťou – dopravou – vzniká vnášaním chemických, fyzikálnych a biologických prvkov. Dôležité je neprekročiť mieru únosnosti územia, nepoškodiť ho. Doprava zaťažuje životné prostredie počas výstavby a prevádzky, najviac hlukom a emisiami. V súčasnosti však už existujú také technologické postupy a technické vybavenie cestných komunikácií, ktoré dokážu zabezpečiť neprekročenie predpísaných hygienických limitov.

Doprava a dopravný priemysel v Európe spotrebovávajú 20 % celkovej energie, z tohto množstva až 83 % spotrebovávajú cestná

*The negative impact of traffic on air pollution is a generally known fact. Automobile traffic has a great share in polluting the ground layer of the atmosphere where life develops and this applies especially to emissions, i. e. concentrations of polluting substances being emitted. This is the result of emissions of the main polluting substances produced by automobile traffic (CO – carbon monoxide, NO<sub>x</sub> – sum of nitrogen oxides and VOC – volatile organic compounds) just above the surface of the earth.*

*The article deals with the influence of automobile traffic on air pollution using the methodology of calculating the volume of generated pollutants applied for this purpose.*

#### 1. Introduction

The problem of air pollution caused by traffic cannot be solved by increasing the volumes of air polluting substances release as it is solved in industrial sectors, where permitted emission limits are secured by specifying the minimum chimney height. To reduce the impact of automobile traffic on pollution of the ground layer of the atmosphere, it means to reduce the emissions of pollutants coming from vehicles by means of technical enhancement of the combustion process, by means of interception or transformation of the polluting substances with catalysts. Another solution can be to deflect or redirect traffic from the areas with the most polluted air.

#### 2. Impact of Traffic on Air Pollution

The burden laid on the environment by human activity – by the traffic – is the result of bringing chemical, physical, and biological components into the environment. It is important not to exceed the rate of sustainability of a territory and not damage it. The traffic has had a bad impact on the environment already when new roads are constructed and exploited, mostly due to noise and emissions. Nowadays, technological methods and technical equipment have been developed that can ensure that the specified hygienic limits will not be exceeded.

Traffic and traffic industry in Europe consumes up 20 % of the overall energy, and 83 % out of this amount is consumed by road

\* Assoc. Prof., MSc., Daniela Ďurčanská, Ph.D., MSc. prof. Ing. Milan Moravčík, Ph.D.

University of Žilina, Faculty of Civil Engineering, Department of Highway Engineering, Komenského 52, Žilina, E-mail: durcan@fstav.utc.sk

University of Žilina, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Management, Komenského 52, Žilina, E-mail: milanm@fstav.utc.sk

doprava, ktorá však tiež vyprodukuje 81 % oxidu uhľnatého CO a 51 % oxidov dusika  $\text{NO}_x$ . Diaľnice dokážu tento priemer znížiť približne o 25 % [1].

Na znečisťovaní ovzdušia na Slovensku sa doprava podieľa asi 23 %, najväčším znečisťovateľom je energetika so svojimi cca 42 %. Podiel mobilných zdrojov na tvorbe základných znečisťujúcich látok v ostatnom období je uvedený v tab. č. 1 [2].

Emisie základných znečisťujúcich látok od mobilných zdrojov za obdobie 1995 – 1999 Tab. 1

Roky	Znečisťujúce látky [tis.t/rok]			
	oxid uhľnatý CO	oxid dusika $\text{NO}_x$	oxid siričitý $\text{SO}_2$	tuhé emisie
1995	181,1	52,9	2,4	3,2
1996	154,3	43,4	2,3	2,5
1997	144,2	44,5	2,4	2,7
1998	144,6	46,3	2,7	2,9
1999	132,5	42,9	1,1	2,7

Na znečisťovaní ovzdušia v okolí cestných komunikácií sa podieľajú hlavne škodliviny z výfukových plynov vozidiel a zvýšená prašnosť spôsobená vírením usadených častíc na povrchu vozovky a v jej blízkosti.

### 3. Možnosti minimalizácie vplyvov automobilovej dopravy na životné prostredie

Ďalší vývoj dopravy je neoddeliteľne spojený s otázkami hodnôt životného štýlu, spôsobu života a hospodárstva. Verejným záujmom určený rámec, v ktorom sa môžu dopravné koncepcie pohybovať, závisí od meniaceho sa postoja spoločnosti k týmto otázkam. Dopravná politika musí preto zohľadňovať globálne aj regionálne podmienky. Perspektívu majú tie stratégie, ktoré uvažujú so zmenou dopravných systémov a s obmedzením neefektívnej dopravy. Škodlivé účinky dopravy na životné prostredie musia byť obmedzované presadzovaním rýchlejších, bezpečnejších a pohodlnejších dopravných prostriedkov verejnej dopravy, ako aj obmedzovaním individuálnej dopravy hlavne vo veľkých mestách.

#### *Vplyv trasovania na rozptyl emisií*

Kvalita a čistota ovzdušia sa stali vážnym problémom pri navrhovaní dopravných sietí v mestách i mimo nich, pri organizovaní dopravy a územnom plánovaní. Dopravné kolapsy v mestách znamenajú zvýšenie koncentrácie škodlivín.

Oxidy dusíka patria ku škodlivinám, ktoré pri súčasnom zložení pohonných hmôt predstavujú jednu z najzávažnejších zložiek výfukových plynov, pretože dosahujú pomerne vysoké koncentrácie škodlivých látok produkovaných do ovzdušia, sú dobre zistiteľné monitorovaním a dajú sa určovať výpočtom. Preto sa spravidla používajú ako indikátor znečistenia ovzdušia výfukovými plynmi od dopravy.

traffic, which also produces 81 % of CO and 51 % of  $\text{NO}_x$  nitrogen oxides. Highways can decrease this amount by about 25 %. [1]

In Slovakia, the share of traffic in air pollution is about 23%, while the main polluter, power engineering has a 42% share in air pollution. The share of mobile sources in production of basic polluting elements in the last years is shown in Table 1 [2].

Emissions of basic polluting substances coming from mobile sources in 1995-1999 Table 1

Year	Polluting substances [1000.t/year]			
	carbon monoxide CO	nitrogen oxides $\text{NO}_x$	sulphur dioxide $\text{SO}_2$	particles
1995	181.1	52.9	2.4	3.2
1996	154.3	43.4	2.3	2.5
1997	144.2	44.5	2.4	2.7
1998	144.6	46.3	2.7	2.9
1999	132.5	42.9	1.1	2.7

Air pollution in the vicinity of roads is the result of pollutants coming from vehicle exhaust gases and the increased amount of dust caused by whirling of sedimentary particles on the surface of pavements and around the pavements.

### 3. Possibilities of Minimizing the Impact of Traffic on the Environment

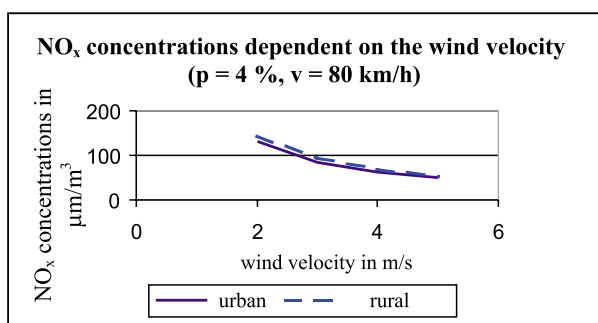
Further traffic development is inseparably connected with the issue of life style values, living conditions and the level of economy. The framework defined by the public interest within which traffic concepts can be developed, depends on changing the attitude of the society towards these issues. A traffic policy must therefore consider global and regional conditions. Such strategies that involve changes in traffic systems and some reduction of ineffective traffic seem to be perspective. Harmful effects of the traffic on the environment must be reduced by implementation of faster, safer and more comfortable public traffic service, as well as by limitation of individual traffic, in large cities in particular.

#### *Influence of Layout on Emissions Dispersion*

The quality and cleanness of the atmosphere has become a serious problem in traffic network planning in and outside cities, in traffic organization and regional planning. Traffic collapses in cities lead to higher concentration of pollutants.

Nitrogen oxides belong to such pollutants that represent one of the crucial components of exhaust gases coming from the current fuels, because they reach relatively high concentrations of pollutants produced into the atmosphere. They are also easy to monitor and can be estimated by calculation. Therefore they can be used as an indicator of air pollution caused by emissions coming from the traffic exhaust gases.

Poloha komunikácie je po výstavbe nemenná, preto jej treba venovať pozornosť pri riešení komunikačných systémov sídiel. Podľa [3] bol sledovaný rozptyl škodlivín v závislosti od polohy nivelety komunikácie (v záreze, na teréne, v násype) a výsledky poukazujú na fakt, že táto závislosť sa prejavuje len pri rýchlosti vetra menšej ako 3 m/s, kedy sa zemné teleso v násype javí ako vhodnejšie pre rozptyl emisií. Koncentrácie  $\text{NO}_x$  namerané pri komunikácii v násype boli 2-krát menšie ako pri komunikácii vedenej v úrovni terénu.



Obr. 1 Vplyv rýchlosti vetra na rozptyl emisií  
(p - pozdĺžny sklon nivelety, v - rýchlosť vozidla)

Fig. 1 The influence of the wind velocity on the emission dispersion  
(p - longitudinal gradient of the vertical alignment, v - vehicle velocity)

Na obr. 1 a 2 sú uvedené porovnávacie údaje vypočítané pre rovnako smerovo orientovaný úsek komunikácie dlhý jeden km, šírkové usporiadanie MS 21,5 pre mestský režim jazdy vozidiel, čo zodpovedá zbernej komunikácii (MS) a R 22,5 pre mimomestský (plynulý) režim jazdy na rýchlostnej komunikácii (R). Uvažovaný počet osobných vozidiel bol 10 000 / 24 h, nákladných 1000 / 24 h, špičková polhodinová doprava bola uvažovaná hodnotou 5 % z celodennej 24-hodinovej dopravy.

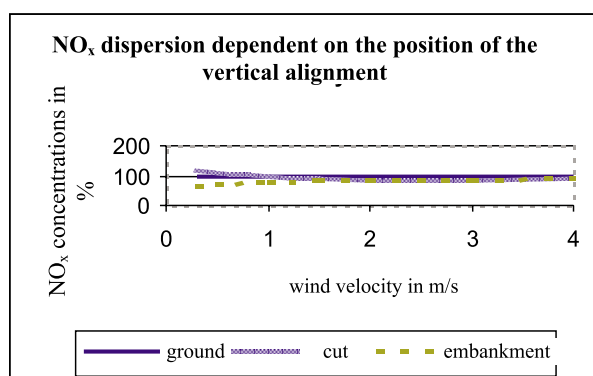
#### Cestná zeleň

Účelné použitie cestnej zelene môže veľkou mierou zmierniť negatívne vplyvy automobilovej dopravy. V minulosti sa účinok zelene nevyužíval dostatočne. V súčasnosti sa ochrana a tvorba životného prostredia i jeho skvalitňovanie dávajú do súvislosti s problémom rovnováhy medzi civilizačnou a biologickou zložkou človeka. Jedna z mnohých funkcií zelene je aj filtračná a v súvislosti s tým sa uplatňuje výsadba zelene pozdĺž komunikácie

Nie každá forma výsadby vedie k zlepšeniu situácie. Dôležitá je hĺbka výsadby a jej filtračná účinnosť. Výsadba môže zachytávať prašnosť a rovnomerne rozptyľovať plynné emisie.

Regulovanie rýchlosti prúdenia vetra hustou výsadbou vedie k zvýšeniu prašnosti v tesnej blízkosti komunikácie. Lepšie účinky sa dosiahnu výsadbou drevín, cez ktoré vietor prechádza.

The position of the road is permanent after it is constructed, so it is necessary to pay attention to the design of communication systems. According to [3], dispersion of pollutants dependent on the vertical alignment position (in the cut, in the field, on the embankment) was monitored and the results show that this dependence is seen only when the wind velocity is under 3 m/s, and in this case the formation level seems to be more suitable for emission dispersion.  $\text{NO}_x$  concentrations monitored near a road on the embankment were twice lower than the concentrations near a road located at the ground level.



Obr. 2 Vplyv polohy zemného telesa [3]

Fig. 2 The influence of the construction limits position [3]

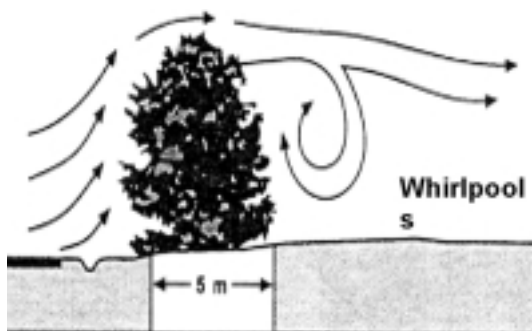
Figures 1 and 2 show comparative data calculated for a 1 km long road section with the same directional orientation with the wideness category of MS 21.5 for urban driving mode, which corresponds to a local distributor road and R22.5 for rural (fluent) driving mode on an expressway (R). The assumed number of passenger cars was 10,000 / 24 hours, trucks 1,000 / 24 hours, the peak traffic in half an hour was assumed to be 5% out of the total all-day long 24 hours traffic.

#### Road Greenery

Effective usage of the road greenery can considerably reduce the negative impact of automobile traffic. In the past, the effect of greenery was not utilized sufficiently. Nowadays, the protection and creation of the environment and its enhancement is associated with the problem of balance between the civilization and biological aspects of a man. One of the various functions of the greenery is filtration, so greenery is planted along roads.

However, not every form of planting results in improved situation. Depth of the planting and its filtering efficiency are very important. The greenery can capture dust and equally disperse gaseous emissions.

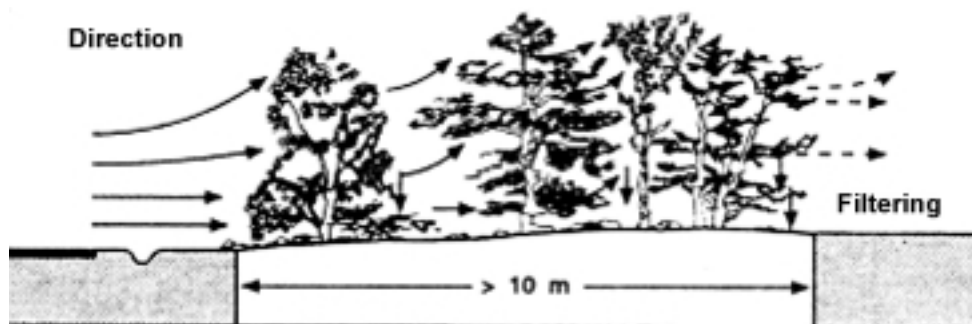
Regulation of wind velocity by dense planting increases the volume of dust in the vicinity of the road. The species that allow the wind to blow through are more effective.



Obr. 3 Hustý porast  
Fig. 3 Dense greenery



Obr. 4 Listnatý porast  
Fig. 4 Deciduous greenery



Obr. 5 Zmiešaný porast  
Fig. 5 Mixed greenery

Krovitý listnatý hustý porast šírky 5 m (obr. 3) spôsobuje redukciiu rozptylu škodlivín do okolia asi 20 %. Porast šírky 10 m (obr. 4) spôsobuje v lete redukciiu rozptylu škodlivín až 60 %. Najvhodnejšia je kombinácia listnatých a ihličnatých stromov. Nie sú výkyvy v účinnosti výsadby v lete a v zime (obr. 5) [3].

Pri listnatých a ihličnatých stromoch sa prejavuje zachytávanie prachu produkciou kyslíka a spotrebou kyslíka uhličitého. Pri plyných exhalátoch je účinok zelene len pri malých koncentráciách. V opačnom prípade dochádza k vysychaniu hlavne ihličnatých stromov.

Z uvedených porovnaní vyplýva, že problematiku dopadu dopravy na znečistenie ovzdušia v mestách je potrebné riešiť už na úrovni územnoplánovacej dokumentácie, kde sa rozhoduje o umiestnení komunikácií.

Potreba rovnováhy civilizačnej a biologickej zložky človeka sa výraznejšie prejavuje v mestskom intraviláne, kde sa na zhoršovaní životného prostredia podieľa aj automobilová doprava.

V intraviláne miest je citlivo vnímaný aj hluk od dopravy. Zelen popri komunikácii tlmi hluk od dopravy v závislosti od

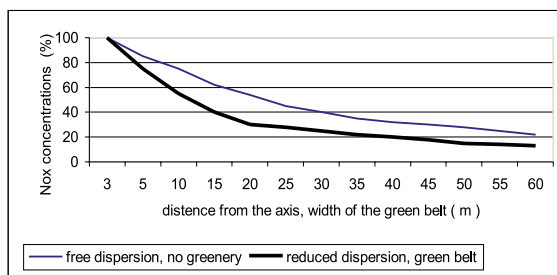
A bushy, dense deciduous greenery with the width of 5 m (see Fig. 3) reduces the dispersion of the pollutants to the surrounding by approximately 20 %. The greenery with the width of 10 m (see Fig. 4) reduces the dispersion of the pollutants by up to 60 % in the summer. The most proper is the combination of deciduous and coniferous species. There is no oscillation in the efficiency of the planting between summer and winter (see Fig. 5) [3].

The effect of capturing the dust by oxygen production and carbon dioxide consumption can be seen in deciduous and coniferous trees. Considering gaseous pollutants, greenery is effective only in case of low concentrations, otherwise coniferous trees in particular dry up.

It can be seen from the presented comparisons that the question of the impact of traffic on air pollution in urban agglomerations should be solved already at the stage of land planning documentation, where the location of the roads is determined.

The need of the balance between civilization and biological aspects of man is manifested especially in urban agglomerations, where automobile traffic makes the environment worse.

The noise from the traffic is felt as a sensitive issue in urban agglomerations. The greenery mutes this noise depending on the width of the green belt. More significant muting

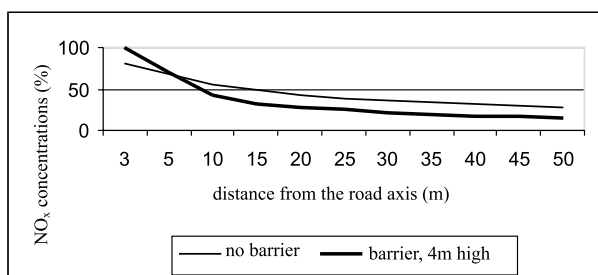


Obr. 6 Vplyv šírky zelene na redukciiu imisii  
Fig. 6 The influence of the green belt on emission reduction

šírky zeleného pásu. Výraznejšie tlmenie sa prejavuje od šírky 15 – 20 m. V zelenom pásu je vhodná kombinácia stromov a kríkov, aby hluk prenikal čo najmenej. Odporúča sa kombinácia listnatých a ihličnatých drevín, nakoľko listnaté vo vegetačnom kľude nemajú vplyv na zníženie hluku. Zníženie hlukovej energie spočíva vo veľkom množstve odrazov od listov, konárov a ihličia, teda nie v pohlcovaní.

#### Protihlukové clony

Osadenie protihlukových clôn, stien a valov pozitívne pôsobí aj na rozptyl emisií. Stena síce tvorí bariéru, ktorá ovplyvní koncentráciu plyných látok v blízkosti komunikácie, ale pri jej vhodnom umiestnení redukuje túto hodnotu v oblasti za stenou, kde dochádza k zníženiu koncentrácie. Pokiaľ je teda vybudovaný chodník pre peších za protihlukovou stenou, sú dosahované koncentrácie v ovzduší nižšie.



Obr. 7 Vplyv protihlukovej steny na redukciiu emisií (rýchlosť vetra >  $2\text{m.s}^{-1}$ )

Fig. 7 Effect of the noise barrier on the emission reduction (wind velocity >  $2\text{m.s}^{-1}$ )

Z uvedených porovnaní vyplýva, že problematiku dopadu dopravy na znečistenie ovzdušia v mestách je potrebné riešiť už na úrovni územnoplánovacej dokumentácie, kde sa rozhoduje o umiestnení komunikácií, pričom je nevyhnutné porovnávanie variantných riešení.

#### 4. Možnosti ovplyvnenia produkcie emisií

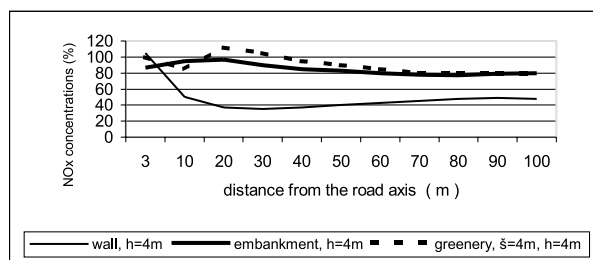
Redukovanie zdroja škodlivín predstavuje ovplyvňovanie intenzity dopravy zmenou dopravných tokov, znížením podielu nákladných vozidiel, obmedzovaním rýchlosti, čo možno dosiahnuť dopravným značením a zosúladením režimu dopravy v rámci komunikačného systému (zelené vlny).

V grafoch na obr. 10 a 11 sú uvedené porovnávacie údaje vypočítané pre rovnako smerovo orientovaný úsek komunikácie dlhý jeden km, šírkové usporiadanie MS 21,5 pre mestský režim jazdy vozidiel, čo zodpovedá zbernej komunikácii (MS) a rýchlostnej komunikácii R 22,5 pre mimomestský (plynulý) režim jazdy. Uvažovaný počet osobných vozidiel bol 10 000/24 h, nákladných 1000/24 h, špičková polhodinová doprava bola uvažovaná hodnotou 5 % z celodennej 24-hodinovej dopravy. Výpočet je uskutočnený podľa metódy SAV [4].

can be seen starting from the width of 15 – 20 m. In the green belt it is appropriate to combine trees and bushes, so that as little noise passes through as possible. It is recommended to combine deciduous and coniferous species, because the deciduous species have no effect on noise protection during their vegetative standstill. The reduction of noise energy is the result of the large amount of noise reflected on the leaves, branches and needles, not of absorption.

#### Noise Barriers

Construction of noise barriers has got positive influence also on the emission dispersion. A wall makes a barrier that affects the concentration of gaseous substances near the road, however, if it is properly situated, it reduces this value in the area behind the wall. Therefore, if footpaths are constructed behind noise barriers, the concentrations in the air are lower.



Obr. 8 Porovnanie účinku zelene, protihlukovej steny a zemného valu [3] (š – šírka, h – výška)

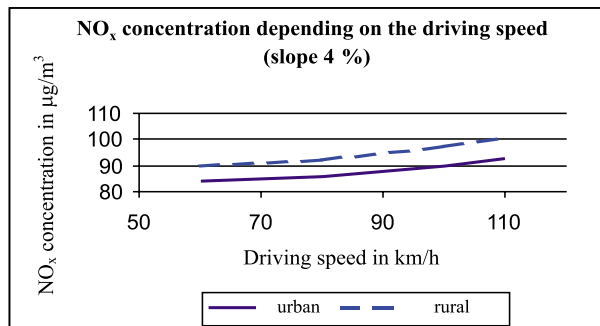
Fig. 8 Comparison of the effect of greenery, noise wall and embankment [3]

It can be seen from the presented comparisons that it is necessary to solve the impact of the traffic on air pollution already at the stage of land planning documentation, where the location of the roads is determined.

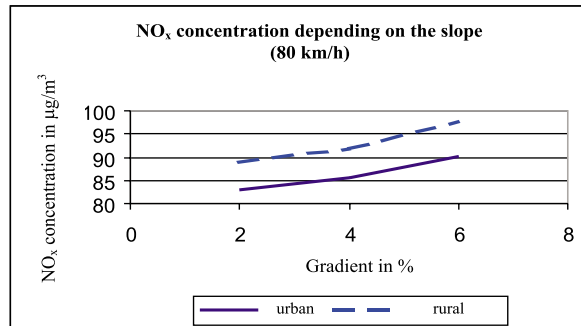
#### 4. Possibilities of the Influencing the Production of Emissions

To reduce sources of pollutants means to influence traffic intensity by changing traffic flows, reducing the number of trucks, limiting speed, which can be achieved by road signs and synchronization of the traffic mode in terms of the communication system (green waves).

Figures 9 and 10 show comparative data calculated for a 1 km long road section with the same directional orientation with the wideness category of MS 21.5 for urban driving mode, which corresponds to a local distributor road (MS) and a R22.5 expressway for rural (fluent) driving mode. The assumed number of passenger cars was 10,000/24 hours, trucks 1,000/24 hours, the peak traffic in half an hour was assumed to be 5 % from the total all-day 24 hours traffic. The calculation was done according to the SAV (Slovak Science Academy) methodology. [4]



Obr. 9 Vplyv rýchlosti jazdy vozidiel  
Fig. 9 Effect of the driving speed



Obr. 10 Vplyv pozdĺžneho sklonu komunikácie  
Fig. 10 Effect of the slope

#### Vplyv regulácie dopravy na produkciu emisií

Pri skvalitňovaní životného prostredia v mestách zohráva významnú úlohu preventívny prístup k riešeniu problémov. Doprava ako taká je v súčasnosti problémom každého mesta. Jedným z príkladov, ako možno riešiť problém z hľadiska znečisťovania ovzdušia z dopravy, je rozsiahla štúdia pracovníkov Technickej univerzity v Grazi [5].

Pracovníci Technickej univerzity v Grazi vypracovali na základe testovania dopravy vo vopred zvolenej oblasti mesta štúdiu, v ktorej vyhodnotili spotrebu pohonných hmôt a vznik plyných emisií od dopravy v neregulovanej oblasti, pri zavedení obmedzenej rýchlosti na  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  a pri rýchlosti  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  v tej istej oblasti.

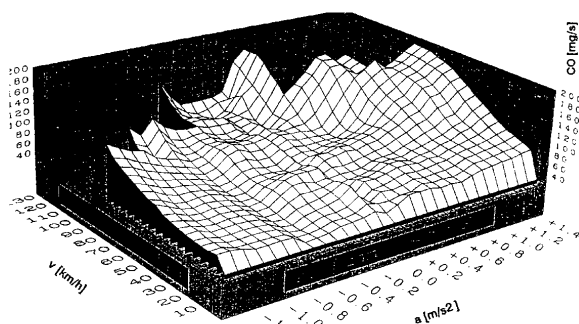
Sledované boli emisie oxidov dusíka  $\text{NO}_x$ , oxid uhoľnatý  $\text{CO}$ , produkcia nespálených uhľovodíkov  $\text{C}_x\text{H}_y$  (resp. HC), spotreba pohonných hmôt a cestovná rýchlosť. Uvedené faktory boli sledované a prepočítavané na tzv. jednotkové osobné vozidlo, ktoré vychádza zo zloženia dopravného prúdu zo 67 % vozidiel s benzínovým motorom (zážihovým) bez katalyzátora, 21 % vozidiel s benzínovým motorom s katalyzátorom a 12 % vozidiel s dieselovým motorom (vznetovým).

#### Effect of Traffic Regulation on Emission Production

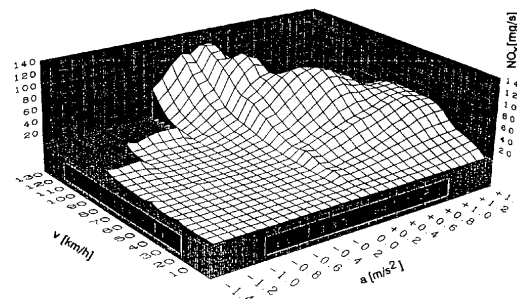
When enhancing the environment in urban agglomerations, preventive approach to problem solving plays a significant role. Traffic is a problem of every city nowadays. One of the examples how to solve this problem in terms of air pollution caused by traffic is a large study of the Technical University of Graz. [5]

Research workers from the TU Graz worked out a study based on testing the traffic in previously selected parts of the town, where they evaluated fuel consumption and emissions coming from traffic in an uncontrolled zone, when the speed was limited to  $30 \text{ km/h}$  and  $50 \text{ km/h}$  within the same zone.

Emissions of  $\text{NO}_x$  nitrogen oxides, carbon monoxide  $\text{CO}$ , production of non-combusted hydrocarbons  $\text{C}_x\text{H}_y$  (or HC), fuel consumption and traveling speed were monitored. These factors were calculated per passenger car unit (PCU), which is based on the traffic flow composition, where 67 % are the vehicles with gasoline engines (petrol engine) without catalyst, 21 % the gasoline engines with catalyst and 12 % are the vehicles with diesel engine (oil engine).



Obr. 11 Produkcia oxidu uhoľnatého  $\text{CO}$   
pre uvažované jednotkové vozidlo  
Fig. 11  $\text{CO}$  production per PCU



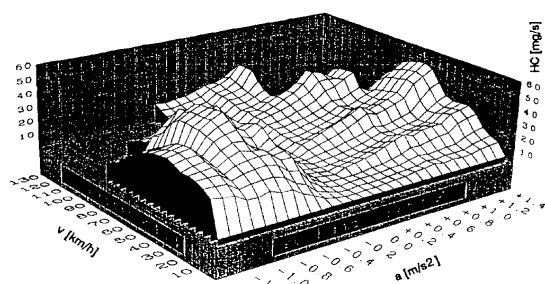
Obr. 12 Produkcia oxidov dusíka  $\text{NO}_x$   
pre uvažované jednotkové vozidlo  
Fig. 12  $\text{NO}_x$  production per PCU

Vzhľadom k závislosti na práci motora, ktorá úzko súvisí s profilom komunikácie, s miestom pred a za križovatkou resp. medzi

Because engine work depends on road profile, location in a place in front of or behind or between crossroads, where con-

križovatkami, kde možno hovoriť o konštantnej rýchlosti jazdy, bola vyhodnotená tvorba emisií jednotkového vozidla (pozri obr. 11 – 14).

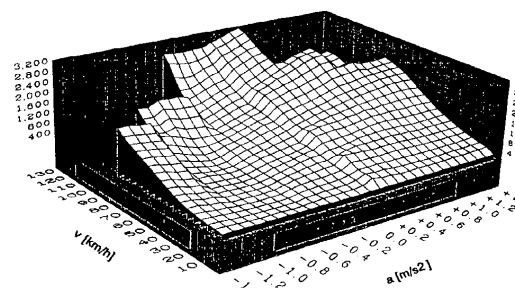
Tvorba emisií oxidu uhoľnatého je silne závislá od cestovnej rýchlosti, produkcia uhľovodíkov je tiež závislá od rýchlosti, ale pri oxidoch dusíka sa cestovná rýchlosť pri ich tvorbe neprejavuje.



Obr. 13 Produkcia uhľovodíkov HC pre uvažované jednotkové vozidlo  
Fig. 13 HC production per PCU

stant driving speed can be presumed, production of the emissions per a passenger car unit was evaluated (see Figs. 11 – 14).

Production of the carbon monoxide emissions strongly depends on the traveling speed, production of hydrocarbons depends on the speed, too, however, the driving speed is not significant for the production of nitrogen oxides.



Obr. 14 Spotreba pohonných hmôt pre uvažované jednotkové vozidlo  
Fig. 14 Fuel consumption per PCU

## 5. Matematické modelovanie znečistenia ovzdušia

V prvom priblížení môžeme považovať cestu za lineárny zdroj znečisťujúcich látok, na ktorom sú produkované znečisťujúce látky rozdelené rovnomerne. Existuje niekoľko principiálne odlišných metód matematického modelovania znečistenia ovzdušia z automobilovej dopravy [4, 9, 10]. Stručne popíšeme analytický model.

### Analytický model – lineárny zdroj

Najjednoduchší model automobilového znečistenia ovzdušia je založený na jednoduchom poloempirickom gaussovskom vzťahu pre distribúciu znečisťujúcich látok v dymovej vlečke z lineárneho zdroja. Pre prízemnú koncentráciu znečisťujúcej látky bude platiť:

$$C(x, y, 0) = \frac{2q}{\sqrt{2\pi} U \sin \varphi \sigma_z} \cdot E(y_1, y_2), \quad (1)$$

kde  $q$  je emisia lineárneho zdroja v  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $U$  je rýchlosť vetra v  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\varphi$  je uhol medzi smerom vetra a osou komunikácie,  $\sigma_z$  je empirický parameter, charakterizujúci rozptyl znečisťujúcich látok vo vertikálnom smere. Funkcia  $E(y_1, y_2)$  vyjadruje vplyv konečnosti lineárneho zdroja na distribúciu koncentrácie znečisťujúcich látok v okolí koncov komunikácie

$$E(y_1, y_2) = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{p^2}{2}\right) dp = \text{erf}(p_2) - \text{erf}(p_1), \quad (2)$$

kde  $p_1 = y_1/\sigma_y$ ,  $p_2 = y_2/\sigma_y$ ,  $\sigma_y$  je parameter, charakterizujúci rozptyl znečisťujúcich látok v horizontálnom smere.

Pre nekonečný zdroj, pre ktorý  $y_1 = -\infty$ ,  $y_2 = \infty$  bude  $E(y_1, y_2) = 1$ .

Uvedený model je veľmi jednoduchý, spoľahlivý a používa sa na výpočet znečistenia ovzdušia z automobilovej dopravy nad rozsiahlou oblasťou. Podrobne bol popísaný v [6].

## 5. Mathematical Modeling of Air Pollution

In the first approximation, a street may be taken as a linear source of pollutants, where the produced pollutants are distributed equally. There are several principally different methods of mathematical modeling of air pollution caused by traffic [4, 9, 10]. The analytical model will be described briefly.

### Analytical Model – Linear Source

The easiest model of the air pollution caused by traffic is based on the elementary semi-empirical Gauss relationship for pollutant distribution in a smoke tow coming from a linear source. The following will apply for the ground concentration of a pollutant:

$$C(x, y, 0) = \frac{2q}{\sqrt{2\pi} U \sin \varphi \sigma_z} \cdot E(y_1, y_2), \quad (1)$$

where  $q$  is emission from the linear source ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $U$  is wind velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\varphi$  is the angle between the wind direction and the road axis,  $\sigma_z$  is the empirical parameter characterizing vertical dispersion of the pollutants. The  $E(y_1, y_2)$  function expresses the effect of the linear source finality on the distribution of the pollutants near the ends of the road.

$$E(y_1, y_2) = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{p^2}{2}\right) dp = \text{erf}(p_2) - \text{erf}(p_1), \quad (2)$$

where  $p_1 = y_1/\sigma_y$ ,  $p_2 = y_2/\sigma_y$ ,  $\sigma_y$  is the parameter characterizing horizontal dispersion of the pollutants.

For an unlimited source, where  $y_1 = -\infty$ ,  $y_2 = \infty$ , the  $E(y_1, y_2)$  function will be  $E(y_1, y_2) = 1$ .

The presented model is a simple and reliable one and is used to compute air pollution caused by traffic over large areas. A detailed description of this model is in [6].



### *Popis programu pre modelovanie produkcie emisií*

Matematické modelovanie sa vykonáva na základe dopravnej prognózy. Trasa komunikácie musí byť umiestnená do súradnicového systému. Študované územie okolo trasy alebo objektu sa rozdelí na sieť bodov so vzájomnou vzdialenosťou 10 až 100 m, podľa veľkosti územia pre ktoré sa vypočítava produkcia emisií a koncentrácie oxidov dusíka.

### *Predpoklady a neurčitosti modelového výpočtu*

- odhadovaná priemerná rýchlosť dopravného prúdu,
- špecifické emisie automobilov sú uvažované pre všeobecné zloženie dopravného prúdu pre súčasnú intenzitu dopravy a výhľad na ďalšie roky,
- veterné pomery o prevládajúcom smere vetra vychádzajú z priemerných údajov podľa dlhodobého sledovania SHMÚ, priemerná rýchlosť vetra je určená zo všetkých meraní vrátane bezvetria,
- uvažuje sa s najnepriaznivejšou stabilitou ovzdušia, kedy dochádza k najsilnejšej záťaži dýchacej zóny.

### *Vstupné údaje modelovania*

V numerickom modeli pre modelovanie emisií od mobilných zdrojov sú zohľadnené:

- emisné faktory pre súčasný a budúci vozidlový park,
- objem dopravy a jej zloženie podľa druhov vozidiel,
- pozdĺžny sklon komunikácie,
- mestský resp. mimomestský režim dopravy (plynulosť jazdy vozidla, zástavba v okolí cesty),
- časový interval hodnotenia produkcie emisií,
- rýchlosť jazdy vozidla,
- poveternostné podmienky (smer a rýchlosť vetra),
- klimatické podmienky (podľa Pasquill-Giffordových kategórií stability).

### *Výstupy programového riešenia*

- výpočet celkovej produkcie škodlivín do voľnej atmosféry (kg/deň),
- výpočet koncentrácie škodliviny v ovzduší ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Najvýznamnejším vstupným údajom všetkých matematických modelov znečistenia ovzdušia je emisia zdroja  $Q$ . Ako je vidieť, napr. zo vzťahu (1) je koncentrácia znečisťujúcej látky priamo úmerná emisii zdroja. Emisiu komunikácie nie je možno merať priamo, ako je to napríklad pri stacionárnych zdrojoch. Počítame ju na základe znalosti emisie automobilov, ktoré prejdú komunikáciou, podľa vzťahu

$$Q = \frac{PO \cdot EMO + PN \cdot EMN}{3600 \cdot T \cdot S}, \quad (3)$$

### *Description of the Program for the Emission Production Modeling*

Mathematical modeling is done on the basis of a traffic prognosis. Horizontal alignment of the road must be placed into a system of coordinates. The studied area around the road or the object is fit into the grid of the size of 10 or 100 meters between the points, according to the size of the area, for which the emission production and nitrogen oxides concentration are calculated.

### *Assumptions and Indefinite Aspects of the Model Calculation*

- Estimated average speed of the traffic flow,
- Specific emissions are considered for general composition of the traffic flow, for the current traffic volume and the prospective for the next years,
- Windy conditions related to the dominant wind direction are based on the average data from long-term monitoring of SHMU (Slovak Institute of Hydro-Meteorology), the average wind velocity is determined from all the measurements, including doldrums,
- The most unfavorable air stability is assumed, when there are the highest demands on the breathing zone.

### *Modeling Input Data*

In a numerical model for modeling the emissions coming from mobile sources, the following is considered:

- Emission factors for the current and future fleet,
- Traffic volume and its composition according to a vehicle type,
- Longitudinal gradient of the road,
- Urban or rural traffic mode (driving fluency, buildings along the road),
- Period of the evaluation of emission production,
- Driving speed,
- Meteorological conditions (direction and velocity of the wind),
- Climatic conditions (according to Pasquill-Gifford categories of stability).

### *Modeling Output Data*

- Calculation of the overall production of the pollutants into the atmosphere (kg/day),
- Calculation of the concentration of the pollutants in the atmosphere ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

The most significant input data for any mathematical model of air pollution is the source of an emission. For example, in formula (1) the concentration of the pollutant is directly proportional to the source of the emission. Emission of the road cannot be measured directly as it is in the case of a stationary source. The calculation is based on knowing the emissions coming from the vehicles running through the road according to the following relationship:

$$Q = \frac{PO \cdot EMO + PN \cdot EMN}{3600 \cdot T \cdot S}, \quad (3)$$



kde  $PO$ ,  $PN$  – počet osobných, resp. nákladných vozidiel za čas  $T$ ,  $EMO$ ,  $EMN$  sú emisné faktory pre osobné, resp. nákladné automobily v  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $S$  je šírka komunikácie v m.

I keď vieme stanoviť  $PO$ ,  $PN$  s vysokou presnosťou, je prakticky nemožné stanoviť presne emisné faktory  $EMO$  a  $EMN$ . Môžeme predpokladať, že prakticky každé vozidlo má inú emisiu znečisťujúcich látok i v prípade, ak ide o ten istý typ vozidla. Vozidlá sa môžu navzájom líšiť zaťaženosťou, technikou jazdy, rýchlosťou a nastavením motora. V slovenskej výpočtovej metodike sú všetky osobné a nákladné vozidlá charakterizované jediným priemerným emisným faktorom  $EMO$  a  $EMN$ .

## 6. Využitie modelu v praxi

Ako príklad uvádzame modelovanie znečistenia ovzdušia od dopravy v meste Žilina.

Mesto Žilina má rozlohu 8 652 ha a 88 tisíc obyvateľov [2]. Okres Žilina má hustotu cestnej siete 0,378  $\text{km}/\text{km}^2$ , resp. 2  $\text{km}/1000$  obyvateľov podľa údajov Slovenskej správy ciest – Cestnej databanky.

Základný komunikačný systém mesta je radiálno-okružný. Je vytvorený z 3 mestských okruhov, radiály tvoria cesty I. a II. triedy a mestské komunikácie.

Matematické modelovanie je vykonané na základe dopravnej prognózy pre sledované územie mesta. Prognóza súčasného stavu vychádza z celoštátneho sčítania dopravy v roku 1995 a 2000. Ďalšie údaje o intenzite dopravy sú prevzaté z dopravno-inžinierskych podkladov, ktoré sa spracovávali v rámci prípravy trasy diaľnice D1 a D18 v okolí Žiliny [3]. Hodnoty intenzít pre rok 2015 sú odvodené prepočtom hodnôt získaných z celoštátneho sčítania dopravy pomocou výhľadových koeficientov.

Študované územie komunikačného systému mesta bolo rozdelené na sieť bodov so vzájomnou vzdialenosťou 100 m, pre ktoré boli modelované koncentrácie oxidov dusíka.

### Predpoklady a neurčitosti modelového výpočtu

- priemerná rýchlosť dopravného prúdu v meste bola uvažovaná 50  $\text{km}/\text{h}$ ,
- uvažované špecifické emisie automobilov sú uvedené v tab. 2,
- priemerná častosť smerov vetra bola dlhodobo sledovaná na letisku v Dolnom Hričove, priemerná rýchlosť vetra je určená zo všetkých meraní vrátane bezvetria a je uvedená v tab. 3,

Špecifické emisie automobilov

Tab. 2

Rok	v [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	Emisný faktor [ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ]			
		CO		NO <sub>x</sub>	
		os.	nakl.	os.	nakl.
2000	50	17,0	13,0	1,5	9,0
	80	8,0	7,0	1,8	8,0
2015	50	3,7	6,6	0,7	7,3
	80	2,2	2,8	0,9	6,8

where  $PO$ ,  $PN$  – the number of passenger cars and/or trucks in the period  $T$ ;  $EMO$ ,  $EMN$  are emission factors for passenger cars and/or trucks in [ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$ ].  $S$  is the road width in m.

Although we can determine the  $PO$  and  $PN$  with high accuracy, it is practically impossible to determine the exact emission factors for  $EMO$  and  $EMN$ . We can assume that every vehicle has got different emissions of pollutants, even if these are the vehicles of the same type. Vehicles can differ in load, driving technique, speed and engine setting. In the Slovak calculation methodology, every passenger car and every truck is characterized by the only one average emission factor  $EMO$  and  $EMN$ .

## 6. Utilisation of the Model in Practice

As an example, the modeling of the air pollution caused by the traffic in the city of Žilina is presented.

The area of Žilina is 8,652 ha and the city has got 88,000 inhabitants [2]. Road density of the Žilina district is 0.378  $\text{km}/\text{h}^2$ , or 2  $\text{km}/1000$  inhabitants according to the data from the Slovak Road Administration – the Road Databank.

The basic road network of the city is a radial-circular one. It is made of 3 urban circles; the radials are the I. and II. class roads and urban communications.

Mathematical modeling is done on the basis of a traffic prognosis for the monitored area. The prognosis of the present state is based on the national traffic census from 1995 and 2000. Further data on traffic volume are taken from traffic-engineering materials, which have been processed for the project of the D1 and D18 highway around Žilina. The values for traffic volume for 2015 are derived from the conversion of the values obtained in the national traffic census using the prognosis coefficients.

The communication system of the city was fitted to a grid with the point interval of 100 m, where concentrations of nitrogen oxides were modeled.

### Assumptions and Indefinite Aspects of the Model Calculation

- Average speed of the traffic flow in the town was considered to be 50  $\text{km}/\text{h}$ ,
- Considered specific vehicle emissions are given in Table 2,
- Average frequency of wind direction was used from long term monitoring in the Dolný Hričov airport, average wind velocity is estimated from all the measurements, including doldrums and it is presented in Table 3.

Specific vehicle emissions

Table 2

Year	v [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	Emission factor			
		CO		NO <sub>x</sub>	
		passanger car	truck	passanger car	truck
2000	50	17.0	13.0	1.5	9.0
	80	8.0	7.0	1.8	8.0
2015	50	3.7	6.6	0.7	7.3
	80	2.2	2.8	0.9	6.8

Priemerná častosť smerov vetrov za rok v %

Tab. 3

Stanica	S	SV	V	JV	J	JZ	Z	SZ	Rých. vetra
Dolný Hričov	14,9	10,4	9,7	11,1	13,4	13,9	13,1	13,5	0,9 m/s

#### Očakávané vplyvy dopravy v meste

Pri modelovaní znečistenia ovzdušia boli posudzované množstvá celkovej produkcie znečisťujúcich látok do ovzdušia (t/rok) od celodennej 24-hodinovej dopravy, taktiež boli porovnávané koncentrácie oxidov dusíka  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) na jednotlivých najviac zafatovaných úsekoch komunikačného systému mesta, vznikajúce od priemernej dennej intenzity dopravy a boli porovnané s prípustnou priemernou dennou koncentráciou  $\text{NO}_x$ , ktorá je  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Na základe matematického modelovania [8] pre roky 2000 a 2015 bolo, zistené, že v meste Žilina sa od automobilovej dopravy pre rok 2000 vyprodukovalo v priemere 660,01 kg  $\text{NO}_x$  za deň, čo je v prepočte 240 t/rok. Z toho 132,9 t/rok (55 %) vyprodukovala osobná doprava. Pre rok 2015 sa predpokladá, že automobilová doprava vyprodukuje 575,45 kg  $\text{NO}_x$  za deň, čo je v prepočte 210 t/rok. Z toho 107 t/rok (51 %) vyprodukuje osobná doprava. Maximálna predpokladaná denná koncentrácia  $\text{NO}_x$  v roku 2015 by po dobudovaní plánovaných komunikácií nemala prekročiť  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Average frequency of wind direction in one year [%]

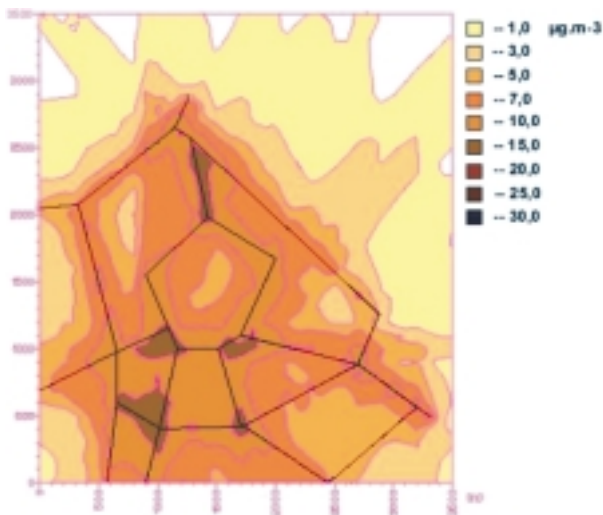
Table 3

Station	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Wind veloc.
Dolný Hričov	14.9	10.4	9.7	11.1	13.4	13.9	13.1	13.5	0.9 m/s

#### Expected Effects of the Traffic in the City

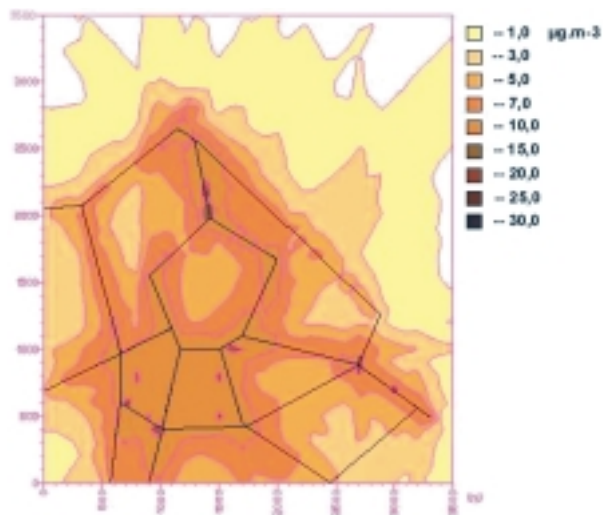
In the air pollution modeling, the amounts of the total production of pollutants into the air (t/year) were evaluated as based on the all-day long 24-hour traffic, and concentrations of nitrogen oxides  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) at the sections with the highest traffic volumes that originate from the average daily traffic were compared and these were compared to the permitted daily concentration of  $\text{NO}_x$ , which is  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Based on the mathematical modeling [8] for 2000 and 2015, it was found out that in the city of Žilina the traffic produced 660.01 kg of  $\text{NO}_x$  per day in 2000, equal to 240 t/year. Out of this volume 132.9 t/year (55 %) was produced by individual traffic. In 2015 it is expected that vehicles will produce 575.45 kg of  $\text{NO}_x$  per day, what equals to 210 t/year. Out of this volume 107 t/year (51 %) will be produced by individual traffic. Maximal assumed daily concentration of  $\text{NO}_x$  in 2015 after the planned communications are constructed should not exceed  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Obr. 15 Znáznornenie priemernej dennej koncentrácie  $\text{NO}_x$  v meste Žilina pre rok 2000

Fig. 15 Average daily concentrations of  $\text{NO}_x$  in Žilina in 2000



Obr. 16 Znáznornenie priemernej dennej koncentrácie  $\text{NO}_x$  v meste Žilina pre rok 2015

Fig. 16 Average daily concentrations of  $\text{NO}_x$  in Žilina in 2015

## 7. Záver

Ukážkou výsledkov pomocou matematického modelu chceme naznačiť široké možnosti využitia.

V príspevku nie je priestor na prezentovanie celej šírky získaných údajov z alternatívnych riešení modelu.

Kvalita a čistota ovzdušia sa stali vážnym problémom pri navrhovaní dopravných sietí v regiónoch i mimo nich, pri organizovaní dopravy aj územnom plánovaní.

## 7. Conclusion

The demonstration of the results obtained through the mathematical model is meant to indicate a wide range of its utilization. The length of the article does not allow us to present the whole scope of the data acquired from alternative model solutions.

Quality and cleanliness of the air have become a serious problem in projecting transport networks within and beyond regions, in transport organization and territorial planning.

Metódy matematického modelovania v súlade s dopravnými prognózami sú veľmi účinným nástrojom v tomto procese a v procese hodnotenia vplyvov na životné prostredie.

Imisná štúdia by preto mala byť súčasťou nielen projektovej dokumentácie cestných komunikácií na úrovni variantného rozhodovania o výbere vhodného umiestnenia cestných ťahov, ale aj neoddeliteľnou súčasťou rozhodovacích procesov na úrovni regionálneho riešenia dopravných problémov. Aby splnila svoj účel, mala by obsahovať modelovanie tvorby imisií z automobilovej dopravy v takom rozsahu, aby bolo možné porovnávať rôzne varianty riešenia a posúdiť prínosy alebo riziká, ktoré do regiónu prinesú.

Methods of mathematical modeling, in accordance with traffic prognoses, are a very effective tool in this process and in the process of evaluation of the effects on the environment.

An emission study should therefore form a part not only of a road project documentation at the level of variant decision-making about choosing a suitable location for road routes, but it should also be an inseparable part of a decision-making processes at the level of finding regional solution for problems with traffic. In order to achieve this aim, the study should comprise a model of emission production coming from automobile traffic to such extent that it would be possible to compare various alternatives to the solution and to evaluate the benefits or the risks brought about into the region.

## Literatúra - References

- [1] ČERNÝ, M.: *Projekt európskych diaľnic AIMSE (Project of European highways AIMSE)*. Silniční obzor 1/1996
- [2] *Životné prostredie v Slovenskej republike, vybrané ukazovatele v rokoch 1996 - 2000* (The Environment in the Slovak Republic, Selected Indicators in 1996 - 2000), ŠÚ SR 2000
- [3] *Merkblatt über Luftverunreinigungen an Strassen, Teil: Strassen ohne oder mit lockerer Randbebauung*, MluS-92, Köln, 1996
- [4] HESSEK, F.: *Metodika výpočtu automobilového znečistenia ovzdušia (The method of road traffic air pollution calculation)*, SAV Bratislava 1993
- [5] PISCHINGER, R.: *Auswirkungen von "Tempo - 30" auf die Kfz - Abgasemissionen in Graz*, Eigenverlag Graz, 1991
- [6] ĎURČANSKÁ, D., HESSEK, F.: *Matematické modelovanie vplyvu diaľnice na znečistenie (Mathematical Modelling of the Highway Influence to Air Pollution)*, Komunikácie/Communications, vedecké listy ŽU, 4/2000, page 69 - 78
- [7] HOLLAREK, T.: *Posúdenie širších dopravných vzťahov diaľničných pripojení D1 a D18 v rámci žilinského regiónu (Assessment of broader transport relationships of D1 and D18 highway connections in the Žilina region)*, Enviconsult Žilina, 1996
- [8] HALABUK, M.: *Modelovanie znečistenia ovzdušia od automobilovej dopravy, diplomová práca (Modeling of air pollution caused by road traffic, Thesis)*, University of Žilina 2002
- [9] SZABÓ, G.: *Dispersion Model of Air Pollutants from Line Sources*, Meteorological Journal, 4/2001 ISSN 1335-33X, p. 23-32
- [10] <http://www.lakes-environmental.com/lakeepa1.html>, 2003-01-08