

## OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU PRO VÝPOČET EMISNÍCH FAKTORŮ OXIDŮ DUSÍKU

FRANTIŠEK SKÁCEL, KATERINA MANEVA  
a VIKTOR TEKÁČ

Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší  
VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Praha 6  
Frantisek.Skacel@vscht.cz

Došlo 12.2.16, přijato 17.5.17.

Klíčová slova: dálniční komunikace, kvalita ovzduší, emise oxidů dusíku, validace emisních modelů, emisní faktory

### Úvod

Provoz motorových vozidel na dálničních komunikacích se projevuje emisí řady znečišťujících látek do okolního ovzduší. Vhodným ukazatelem této zátěže jsou z několika důvodů oxidy dusíku. V převažující míře jsou z výfukových systémů spalovacích motorů emitovány ve formě oxidu dusnatého<sup>1–4</sup>, který je v krátké době oxidován na oxid dusičitý<sup>5–7</sup>. Poměr jejich koncentrací v ovzduší dálniční komunikace je určován řadou faktorů, především podílem motorových vozidel vybavených moderními katalyzátory s vysokou účinností<sup>8,9</sup>, vzdáleností od komunikace<sup>10–15</sup>, koncentrací jemných aerosolových částic<sup>10,11</sup>, koncentrací ozonu<sup>9,16</sup> aj.

V minulých letech byly vytvořeny matematické programy pro vytváření modelů emisí souboru znečišťujících látek z mobilních zdrojů – automobilů účastníků se silničního provozu. První modely vznikly z podnětu US EPA již v roce 1972 jako AP-42 *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Tento model zahrnoval emisní faktory více než 200 kategorií zdrojů znečišťování ovzduší, mimo jiné i silniční dopravu. V roce 1978 vznikl specializovaný model MOBILE1 uvažující tři základní znečišťující látky (uhlovodíky, CO a NO<sub>x</sub>), vozidla různých kategorií (osobní vozidla, nákladní vozidla, autobusy a motocykly) spalující benzin, motorovou naftu a zemní plyn a kalendářní roky 1952 až 2050. Model MOBILE se postupně rozrůstal a v roce 2004 dosáhl podoby MOBILE6.2 používané do roku 2010, kdy jej US EPA nahradila modelem MOVES (*Motor Vehicle Emissions Simulator*)<sup>17</sup>. Od té doby vznikly v USA a Kanadě podobné programy např. EMFA (*Motor Vehicle Emission Software*)<sup>18</sup>, CMEM (*Comprehensive Modal Emission Model*)<sup>19</sup> a další. Tyto modely však nelze v evropských podmínkách využívat především v důsledku naprosté odlišnosti vozového parku a emisních charakteristik v USA a Kanadě používaných motorových vozidel.

V Evropě byly vytvořeny modely popsané velmi dob-

ře autory finského modelu CAR-FMI (*Contaminants in the Air from a Road*)<sup>20</sup>. Většina z nich vychází z gaussovského modelu rozptylu znečišťujících látek v okolí liniového zdroje, aniž by se nějakým způsobem zabývala ověřováním korelace se skutečnými podmínkami silničního provozu. Z těchto modelů se výrazně vyděluje matematický model HBEFA (*HandBook of Emission Factors for road transport*) vytvořený původně spoluprací německé, švýcarské a rakouské agentury pro ochranu životního, k nimž se posléze připojily i obdobné agentury ze Švédska, Norska, Francie a Společným výzkumným střediskem Evropské komise (European Research Center of the European Commission) v roce 1995 (HBEFA 1.1) a dostupný v současné době ve verzi HBEFA 3.2. (červenec 2014). Model HBEFA byl vypracován na základě výsledků měření emisí souboru znečišťujících látek na dynamometrech pro lehčí vozidla a měření emisí z motorů těžších vozidel a v menší míře i měření emisí z těchto vozidel na dynamometrech a při reálném provozu na komunikacích. Tento postup vedl k získání výsledků, které v maximální míře odpovídají reálným dopravním scénářům na silničních komunikacích. Přehled vývoje těchto emisních modelů byl podrobně zpracován<sup>21</sup>.

V České republice byl v rámci řešení projektu MŽP ČR VaV/740/3/00 autorským kolektivem pracovníků VŠCHT Praha, ATEM a DINPROJEKT vytvořen program MEFA v. 02, jehož současná zdokonalená verze MEFA 13 pochází z roku 2013. Při sestavení tohoto modelu byla zvolena cesta použití již získaných a ověřených emisních dat vozidel z řady testů v zemích EU, především zmíněného modelu HBEFA. Tyto údaje byly dále doplněny s využitím výsledků emisních testů charakteristických zástupců vozového parku ČR.

Přes uvedený postup vývoje matematického modelu nelze považovat výsledky výpočtu s použitím emisních faktorů a výsledky měření aktuální koncentrace znečišťujících látek v ovzduší silniční komunikace za totožné. Potvrdilo to i několik studií provedených v podmínkách, kdy lze zjistit minimální vliv vnějších faktorů, především meteorologických, na výsledky měření koncentrace znečišťujících látek na měřicím stanovišti. K tomu účelu jsou vhodné především silniční tunely různé délky od 239 m dlouhého tunelu Van Nuys v Kalifornii při ověření modelu MOBILE6.2, MOVES2010a a EMFAC2007 (cit.<sup>22</sup>), přes 3273 m dlouhý tunel Gubrist ve Švýcarsku<sup>23,24</sup> až po 7808 m dlouhý tunel Plabutsch<sup>25,26</sup>.

Výsledky porovnání tří modelů pro výpočet emisních faktorů s výsledky měření prováděných ve výduchu tunelu Van Nuys (147 m od východního portálu tunelu) pomocí chemiluminiscenčního analyzátoru Horiba a určením počtu projíždějících automobilů v 3hodinových intervalech pomocí videokamery prokázaly, že vypočtené emisní faktory jsou vždy vyšší než údaje vycházející z reálných měření<sup>22</sup>. Výsledky získané pomocí jednotlivých modelů se výrazně lišily, skutečnosti nejvíce odpovídaly výsledky modelu MOBILE6.2 a nejméně modelu EMFAC2007 (cit.<sup>22</sup>).

Při posouzení modelu HBEFA1.2 v tunelu Plabutsch na obvodu Štýrského Hradce byly vzorky ovzduší odebrá-

rány na stanovišti umístěném 4,4 km od severního portálu tunelu. Výhodou tohoto tunelu je systém automatizované kontroly počtu projíždějících automobilů. Stanoviště bylo osazeno blíže neidentifikovaným monitorovacím kontejnerem pro měření koncentrace sledovaných analytů (aerosolové částice a oxidy dusíku). Matematický model vycházel z modelového složení flotily projíždějících vozidel zahrnujících vozidla emisních kategorií EURO 1 až EURO 3. Z výsledků porovnání vyplývá, že vypočtené emisní faktory třídy těžkých nákladních vozidel jsou oproti skutečnosti výrazně podceněny<sup>26</sup>.

Ověření modelu HBEFA2.1 ve švýcarském tunelu Gubrist vycházel rovněž z národního mixu vozidel pro daný rok a výsledků měření indukční smyčkou zaznamenávající počet projíždějících vozidel, jejich rychlost ( $90 \text{ km h}^{-1}$ ) a početnost tří délkových kategorií vozidel (délka <6 m, 6 až 12,2 m a >12,5 m). Měření se provádělo na stanovišti umístěném v portálu tunelu blíže neurčenou metodou. Výsledky porovnání obou metod v případě oxidů dusíku ukázaly více než 50% nadhodnocení emisních faktorů vypočtených pro lehká vozidla a o 15 % vyšší hodnoty vypočtených emisních faktorů pro těžká vozidla v porovnání se skutečně naměřenými údaji o koncentraci oxidů dusíku na měřicím stanovišti.

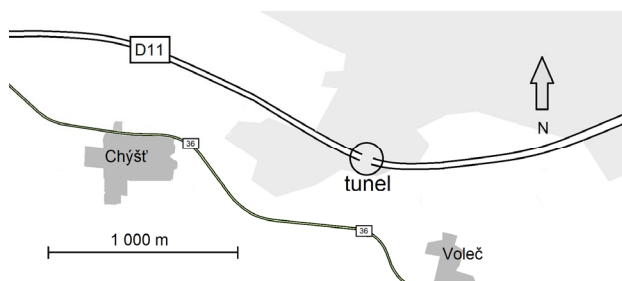
Obě jmenované studie využívaly dlouhých silničních tunelů a modelových mixů flotily projíždějících vozidel typických pro Rakousko a Švýcarsko v letech 2001 a 2002. Tyto závěry vedly k organizaci série ověřovacích zkoušek uskutečněných ve velmi krátkém tunelu v podmínkách České republiky.

## Experimentální část

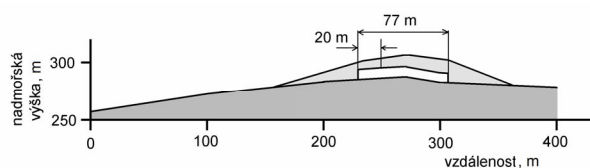
Měřicí stanoviště pro sledování kvality ovzduší

Odběr vzorků ovzduší dálniční komunikace byl prováděn v období let 2013 až 2015 v katastru obce Chýšť (obr. 1).

Měřicí stanoviště se nacházelo na tzv. *Zeleném mostě* přecházejícím nad dálnicí D11 na 72. kilometru ve výšce 286 m n.m. se souřadnicemi: N  $50^{\circ}7'41,948''$  a E  $15^{\circ}33'54,875''$ . Tento úsek dálnice D11 byl uveden do provo-



Obr. 1. Umístění vzorkovacího stanoviště na 72. km dálnice D11



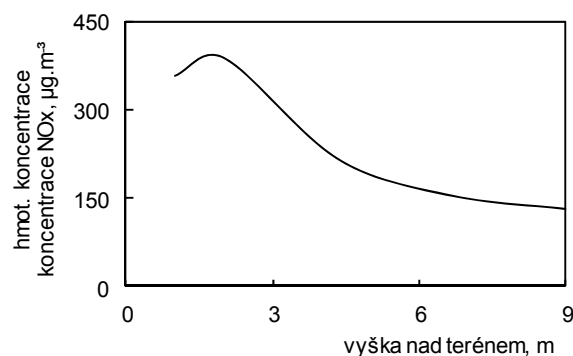
Obr. 2. Podélný profil tunelu Zelený most s vyznačením vzorkovacího stanoviště na 72. km dálnice D11



Obr. 3. Měřicí přímka v tunelu Zelený most

zu v roce 2005 a jedná se o místo s vysokou intenzitou dopravy. Měřicí stanoviště bylo umístěno v neosídlené oblasti a jeho volba byla podmíněna zajištěním co nejstabilnějších podmínek pro odběr vzorků, což je v ideálním případě dlouhý silniční tunel bez aktivního větrání. Stanoviště bylo umístěno na vrcholu mírného návrší v přímém úseku a průměrným sklonem menším než 1 % (obr. 2).

Měřením byla zjištěna nevýrazná stratifikace oxidů dusíku v kolmém směru k povrchu vozovky. V souladu s obdobnými studii<sup>22–25</sup> byla pro odběr vzorků zvolena



Obr. 4. Průběh výškové závislosti hmotnostní koncentrace NO a NO<sub>2</sub> vyjádřených sumárně jako NO<sub>2</sub> v měřicí přímce měřicího stanoviště v tunelu Zelený most na 72. km dálnice D11 dne 14.11.2013

reprezentativní měřicí přímka procházející středem příčného průřezu tunelu (obr. 3).

V průběhu každé z kampaní byla zjišťována výšková závislost koncentrace oxidů dusíku. Měření v této reprezentativní měřicí přímce přineslo výsledky odlišující se jen absolutní hodnotou naměřených koncentrací při zachování shodné výškové závislosti uvedené na následujícím obr. 4.

Pro odběr reprezentativního vzorku bylo použito úrovně 1,8 m nad povrchem vozovky, tzn. v místě odpovídajícím těžišti příčného průměru sledovaného tunelu.

#### Metody a postupy měření

Objemový zlomek oxidu dusičitého a oxidu dusnatého byl měřen dvojicí analyzátorů APNA–360 (Horiba, Japonsko) pracujících na chemiluminiscenčním principu s mezi stanovitelností vyjádřenou objemovým zlomkem  $0,5 \cdot 10^{-9}$ . Vzorkování sledovaného vzduchu probíhalo společnou vzorkovací trátí z PTFE délky 9 m s vnitřním průměrem 6 mm opatřenou vstupním filtrem. Doba průměrování byla 3 min. Stejných analyzátorů používala i řada jiných autorů<sup>24,26</sup>. Analyzátoři byly kalibrovány akreditovanou kalibrační laboratoří Českého hydrometeorologického ústavu v Praze KL 2284.

Určení počtu projíždějících vozidel bylo prováděno prostým sčítáním projíždějících vozidel rozdělených do 2 kategorií – osobní automobily a těžká nákladní vozidla a autobusy. Doba průměrování pro získávání výsledných hmotnostních koncentrací oxidů dusíku byla 9 min, takže pokrývala tři hodnoty průměrných třímínutových koncentrací oxidů dusíku. Rychlost projíždějících vozidel byla ověřována výpočtem a v naprosté většině případů rovna limitním rychlostem určeným pro měřený úsek dálnice D11, tj.  $130 \text{ km h}^{-1}$  pro osobní automobily a  $100 \text{ km h}^{-1}$  pro nákladní vozidla a autobusy. Tyto rychlosti byly ověřovány při každé z měřicích kampaní a s ohledem na přímý úsek dálnice s minimálním převýšením byly udržovány za všech meteorologických podmínek.

V letech 2013 až 2015 proběhlo celkem 7 měřicích kampaní v trvání nejméně 3 hodin. Tyto měřicí kampaně

probíhaly za různých povětrnostních a dopravních situací tak, aby pokryly typické podmínky provozu na sledované dálnici D11 (viz tab. I). Střední rychlost proudění větru v prostoru měřicí přímky v průběhu měření byla menší než  $5 \text{ m s}^{-1}$ .

#### Výpočet emisních faktorů oxidů dusíku

K výpočtu emisních faktorů oxidů dusíku bylo použito matematického modelu HBEFA 3.1 (cit.<sup>27,28</sup>). Pro zadání dopravního scénáře bylo použito veličin a hodnot uvedených v tab. II.

Složení flotily projíždějících vozidel (tzv. *mix*) vycházelo z modelu PHEM (cit.<sup>28</sup>), který je založen na souboru vozidel registrovaných v daném roce v zemích účastnících se přípravy matematického modelu HBEFA. Model PHEM počítá i s předpokládaným složením flotily vozidel pro roky budoucí. Uvažovaná flotila vozidel je složena z motorů vznětových a zážehových emisních kategorií EURO (I÷5, I÷V a tzv. konvenčních), dále motorů spalujících zemní plyn a propanbutanovou směs. K ověření modelu v podmínkách České republiky byl zvolen mix označený „BAU“ D, odpovídající složení flotily projíždějících vozidel registrovaných ve Spolkové republice Německo. Tato volba vychází ze skutečnosti, že převážná většina motorových vozidel projíždějících českými dálnicemi je vybavena stejnými motory jako v případě SRN. Tento předpoklad se týká především nejfrekventovanější značky českých vozidel, tj. Škoda.

#### Statistické výpočty

Veškeré naměřené výsledky byly zpracovány za použití metod analýzy rozptylu. Cílem aplikovaných postupů byla identifikace a vyloučení odlehklých hodnot a testování obou populací hodnoty, tj. výsledků přímého měření hmotnostních koncentrací oxidů dusíku v prostoru tunelu a výsledků získaných s využitím matematického modelu HBEFA 3.1 k témuž účelu. Analýza rozptylu metodou ANOVA umožňuje určit, zda rozdíly mezi vzorky (výsledky urč-

Tabulka I  
Přehled měřicích kampaní

Datum	Trvání [h]	Intenzita provozu <sup>a</sup>	Teplota [°C]	Barometrický tlak [kPa]	Relativní vlhkost [%]
14. 11. 2013	6	střední	7	98,15	70
21. 3. 2014	5	střední	19	101,32	65
10. 10. 2014	3	vysoká	16	99,01	80
14. 11. 2014	3	vysoká	12	98,15	75
15. 12. 2014	3	nízká	7	99,83	80
17. 2. 2015	4	nízká	5	101,36	53

<sup>a</sup> Stupeň intenzity provozu dán počtem projíždějících osobních automobilů: nízká  $\leq 1000 \text{ h}^{-1}$ ; střední  $1000 \div 1400 \text{ h}^{-1}$ ; vysoká  $> 1400 \text{ h}^{-1}$

Tabulka II  
Zadání dopravního scénáře

Charakteristika	Zadaná hodnota
Kategorie vozidel	lehká vozidla o délce < 6 m (osobní automobily) těžká vozidla a autobusy (nákladní automobily a autobusy)
Rychlost vozidel	130 km h <sup>-1</sup> (osobní automobily) 100 km h <sup>-1</sup> (nákladní automobily a autobusy)
Sklon vozovky	0 %
Dopravní situace	volný průjezd
Typ komunikace	venkovský
Složení flotily vozidel	SRN 2005 („BAU“ D) SRN 2010 („BAU“ D) SRN 2015 („BAU“ D)

nými oběma postupy pro doby vzorkování 9 min) jsou způsobeny náhodnými nebo systematickými chybami. Analýza rozptylu se používá pro určení shodnosti dvou nebo více průměrů<sup>29,30</sup> a ke spolehlivému posouzení míry korelace dvou nebo více číselných řad.

## Výsledky a diskuse

### Časové řady výsledků měření

Časové řady výsledků měření hmotnostních koncentrací sledovaných analytů zahrnují závislost hmotnostní koncentrace NO, NO<sub>2</sub> a sumy obou oxidů vyjádřených jako oxid dusičitý (NO<sub>x</sub>). Typický průběh této řady je znázorněn na obr. 5.

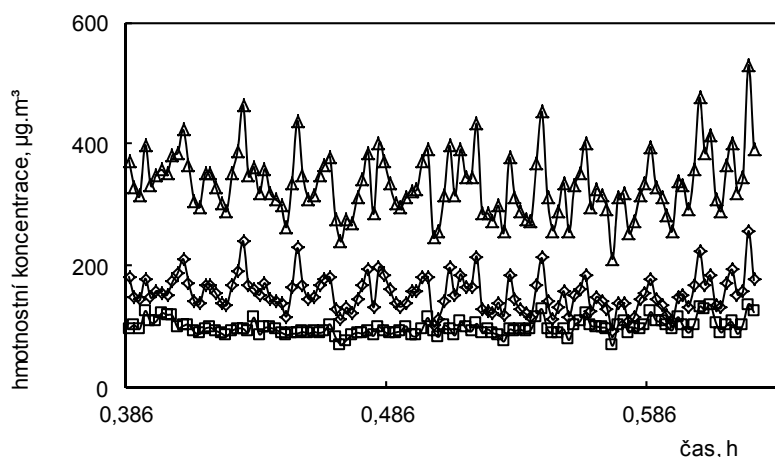
V této souvislosti stojí za zmínku, že v průběhu všech měřicích kampaní nebyl zaznamenán časový interval, v němž by aktuální hmotnostní koncentrace NO<sub>2</sub> překroči-

la úroveň limitní hodinové hmotnostní koncentrace NO<sub>2</sub> v ovzduší<sup>31</sup> za standardních podmínek (20 °C, 101,325 kPa) činí 200 µg m<sup>-3</sup>.

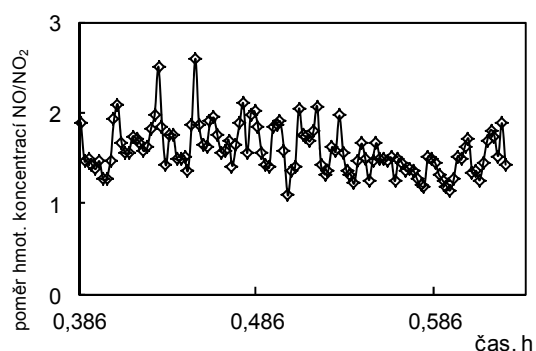
Časové řady poměru naměřených hmotnostních koncentrací NO a NO<sub>2</sub> zaznamenané v průběhu všech měřicích kampaní byly velmi podobné. Typický průběh této řady je znázorněn na obr. 6.

Časové řady výsledků určení počtu projíždějících vozidel obou kategorií sloužily k posouzení intenzity provozu ve sledovaném úseku dálnice. Typický průběh této řady pro střední intenzitu provozu je znázorněn na obr. 7.

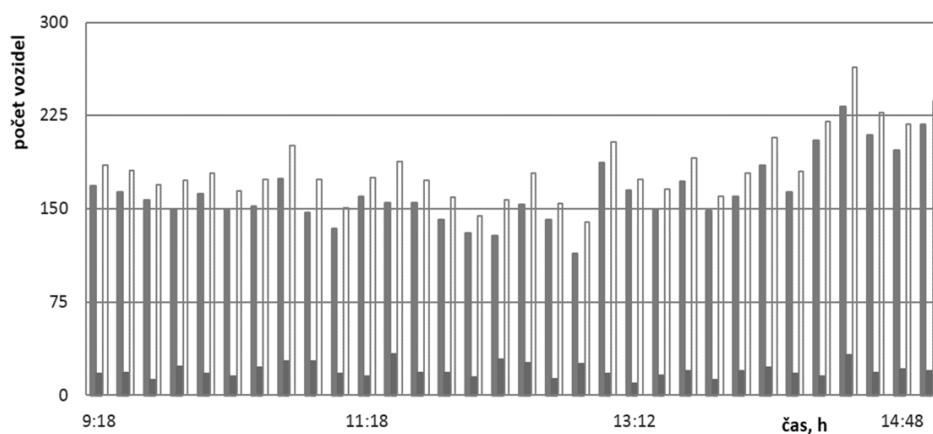
V této souvislosti stojí za zmínku, že v průběhu všech měřicích kampaní nebyl zaznamenán časový interval (9 min), v němž by četnost projíždějících osobních automobilů klesla pod úroveň 100 průjezdů a četnost projíždějících nákladních automobilů a autobusů klesla pod úroveň 5 průjezdů v uvedeném intervalu. To odpovídá intenzitě provozu vyjádřené počtem projíždějících vozidel asi 670 h<sup>-1</sup>



Obr. 5. Typický průběh časové řady hmotnostní koncentrace NO, NO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub> v ovzduší měřicího stanoviště v tunelu Zelený most na 72. km dálnice D11 dne 14.11.2013. Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty pro  $\diamond$  NO,  $\square$  NO<sub>2</sub>,  $\Delta$  NO<sub>x</sub>



Obr. 6. Typický průběh časové řady poměru naměřených hmotnostních koncentrací NO a NO<sub>2</sub> v ovzduší měřicího stanoviště v tunelu Zelený most na 72. km dálnice D11 dne 14.11.2013



Obr. 7. Typický průběh časové řady počtu vozidel projíždějících měřicím stanovištěm v tunelu Zelený most na 72. km dálnice D11 dne 14.11.2013. Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty pro ■ osobní automobily, ■ těžké nákladní automobily a autobusy, □ celkový počet vozidel

Tabulka III

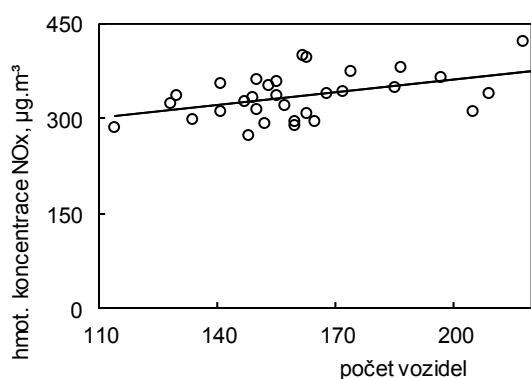
Výsledky ANOVA vyjádřené hodnotami  $F$ -testu pro jednotlivé typy vozidel

Analyt	Kategorie vozidel	Charakteristiky třiminutových intervalů	
		$F_{\text{vyp}}$	$F_{\text{krit}}$
NO	osobní automobily	1,429	1,65
	nákladní automobily a autobusy	1,539	
	celkem	1,365	
NO <sub>2</sub>	osobní automobily	1,040	1,65
	nákladní automobily a autobusy	2,036	
	celkem	1,114	
NO <sub>x</sub>	osobní automobily	1,141	1,65
	nákladní automobily a autobusy	1,443	
	celkem	1,085	

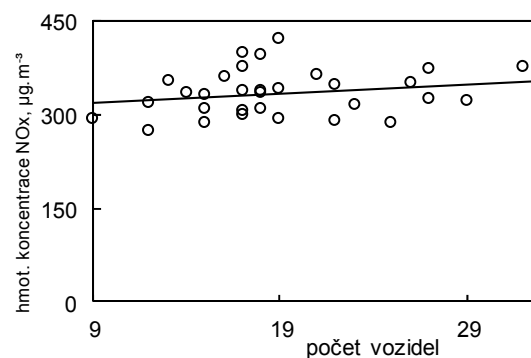
pro kategorii osobních automobilů a 50 h<sup>-1</sup> pro kategorii nákladních automobilů a autobusů.

Studium korelace hmotnostní koncentrace oxidů dusíku v prostoru tunelu a intenzity provozu

Pro ověření působení ostatních zdrojů emisí oxidů dusíku v okolí měřicího stanoviště bylo provedeno opakované měření pozadových koncentrací sledovaných analytů v prostoru mimo vzorkovací stanoviště, tj. v měřicích bodech umístěných na vrcholu návrší, jímž tunel prochází. Stanoviště byla zvolena severně a jižně od západního portálu tunelu ve vzdálenosti asi 100 m. Naměřené hmotnostní koncentrace NO a NO<sub>2</sub> vyjádřené sumárně jako oxid dusičitý se pohybovaly na úrovni jednotek  $\mu\text{g m}^{-3}$  a v žádném z případů nepřekročily hodnotu 10  $\mu\text{g m}^{-3}$ , v souladu s výsledky naměřenými v okolí dálnice D1 (cit.<sup>15</sup>).



Obr. 8. Typický průběh regresní analýzy závislosti hmotnostní koncentrace  $\text{NO}_x$  na počtu projíždějících osobních automobilů v ovzduší měřicího stanoviště v tunelu Zelený most na 72. km dálnice D11 dne 14.11.2013



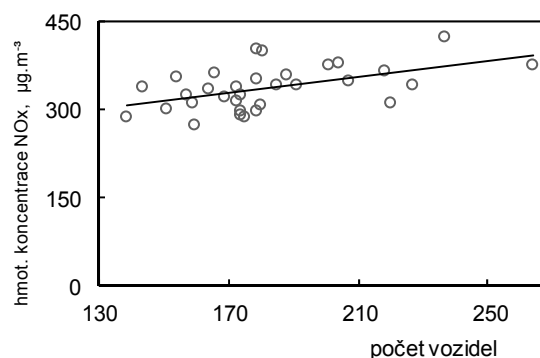
Obr. 9. Typický průběh regresní analýzy závislosti hmotnostní koncentrace  $\text{NO}_x$  na počtu projíždějících nákladních automobilů a autobusů v ovzduší měřicího stanoviště v tunelu Zelený most na 72. km dálnice D11 dne 14.11.2013

K statistickému posouzení korelace hmotnostní koncentrace oxidů dusíku v prostoru tunelu a intenzity provozu bylo použito analýzy rozptylu. Graficky je vztah těchto veličin vyjádřen regresní závislostí uvedenou na obr. 8 až 10.

Metodou ANOVA bylo testováno, zda počet projíždějících vozidel dané kategorie má významný vliv na hmotnostní koncentraci  $\text{NO}_x$ . Interpretace analýzy rozptylu metodou ANOVA je založeno na porovnání vypočtené hodnoty  $F$ -testu s kritickou hodnotou pro daný počet stupňů volnosti. Příklad výsledků získaných analýzou jedné z kampaní uvádí tab. III. V případě osobních automobilů se ve všech uvedených kampaních prokázala lineární závislost hmotnostní koncentrace sledovaných analytů, tj.  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  a  $\text{NO}_x$ , na počtu projíždějících vozidel. V případě nákladních automobilů a autobusů nebyla linearita závislosti hmotnostní koncentrace sledovaných analytů, tj.  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  a  $\text{NO}_x$ , na počtu projíždějících vozidel prokázána ve všech případech. K tomuto výsledku nepochybně přispěla velká statistická váha každého z projíždějících vozidel této kategorie, která výrazným způsobem ovlivnila velikost náhodných odchylek této statistiky.

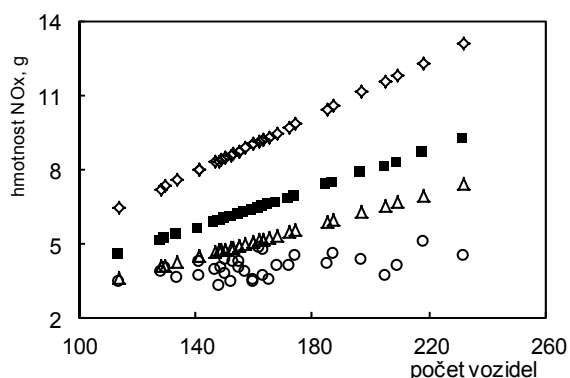
#### Ověření matematického modelu HBEFA 3.1

K ověření modelu HBEFA 3.1 bylo použito porovnání celkové hmotnosti oxidů dusíku v prostoru tunelu určené z jeho rozměrů a změřené průměrné hmotnostní koncentrace v dané době průměrování a hmotnosti určené s použitím emisního faktoru vypočteného modelem pro změřený počet projíždějících vozidel a dobu jejich zdržení v tunelu. Složení proudu vozidel bylo vypočteno pro různé doby registrace těchto vozidel. Ověření modelu HBEFA 3.1 přineslo výsledky graficky znázorněné pro obě kategorie vozidel na obr. 11 a 12.

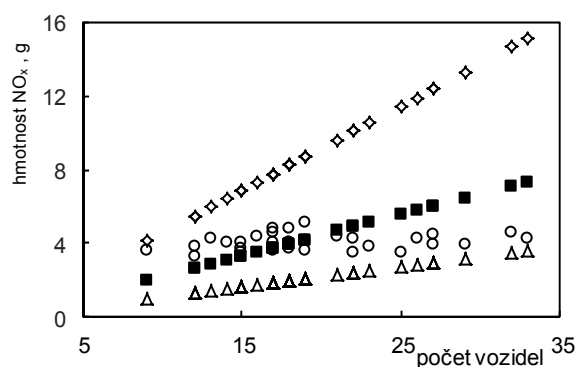


Obr. 10. Typický průběh regresní analýzy závislosti hmotnostní koncentrace  $\text{NO}_x$  na počtu obou kategorií projíždějících vozidel v ovzduší měřicího stanoviště v tunelu Zelený most na 72. km dálnice D11 dne 14.11.2013

V grafu uvedeném na obr. 11 jsou vyneseny naměřené hmotnosti  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$  vyjádřené sumárně jako oxid dusičitý ( $\text{NO}_x$ ) v prostoru sledovaného tunelu proti hmotnostem  $\text{NO}_x$  vypočteným matematickým modelem HBEFA 3.1 pro soubor projíždějících osobních automobilů odpovídající složení flotily této kategorie vozidel registrovaných v roce 2005, 2010 a 2015 v Německu. Směrnice vypočtené a naměřené závislosti hmotnosti oxidů dusíku na počtu projíždějících vozidel jsou uvedeny v tab. IV. Z výsledků je patrné, že naměřené výsledky při menší intenzitě dopravy odpovídají složení flotily osobních automobilů registrovaných v roce 2015. S rostoucím počtem projíždějících automobilů se projevuje výrazné nadhodnocení emisí oxidů dusíku vypočtených s použitím uvedených



Obr. 11. Výsledky ověření modelu HBEFA 3.1 v kategorii osobních automobilů. Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty  $\square$   $m_{\text{měř}}(\text{NO}_x)$ ,  $\diamond$   $m_{\text{vyp.EF-2005}}(\text{NO}_x)$ ,  $\blacksquare$   $m_{\text{vyp.EF-2010}}(\text{NO}_x)$ ,  $\triangle$   $m_{\text{vyp.EF-2015}}(\text{NO}_x)$



Obr. 12. Výsledky ověření modelu HBEFA 3.1 v kategorii nákladních automobilů a autobusů. Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty  $\square$   $m_{\text{měř}}(\text{NO}_x)$ ,  $\diamond$   $m_{\text{vyp.EF-2005}}(\text{NO}_x)$ ,  $\blacksquare$   $m_{\text{vyp.EF-2010}}(\text{NO}_x)$ ,  $\triangle$   $m_{\text{vyp.EF-2015}}(\text{NO}_x)$

#### Tabulka IV

Výsledky ANOVA vyjádřené hodnotami  $F$ -testu pro jednotlivé typy vozidel

Výsledek	Směrnice lineární závislosti	
	osobní automobily	nákladní automobily a autobusy
Měření	0,008	0,018
Výpočet – rok 2005	0,056	0,457
Výpočet – rok 2010	0,039	0,221
Výpočet – rok 2015	0,032	0,108

ho modelu pro osobní automobily způsobené pravděpodobně rozptylem sledovaných analytů portály relativně krátkého tunelu do okolního ovzduší. Naměřená stagnace hmotností oxidů dusíku v prostoru tunelu zjištěná při vyšším počtu projíždějících osobních automobilů je pravděpodobně způsobena vlivem určitého druhu „*pístového efektu*“, který se projevuje zrychlením a zintenzivněním výměny vzduchu uvnitř tunelu vlivem projíždějících vozidel.

V grafu uvedeném na obr. 12 jsou vyneseny naměřené hmotnosti NO a NO<sub>2</sub> vyjádřené sumárně jako oxid dusičitý (NO<sub>x</sub>) v prostoru sledovaného tunelu proti hmotnostem NO<sub>x</sub> vypočteným matematickým modelem HBEFA 3.1 pro soubor projíždějících nákladních automobilů a autobusů odpovídající složení flotily těchto vozidel registrovaných v roce 2005, 2010 a 2015 v Německu. Z výsledků je patrné, že naměřené výsledky při menší intenzitě dopravy odpovídají složení flotily nákladních automobilů a autobusů registrovaných v roce 2010. Vozový park této kategorie vozidel je oproti osobním automobilům pravděpodobně starší. S rostoucím počtem projíždějících nákladních automobilů se rovněž projevuje stagnace emisí oxidů dusíku způsobené pravděpodobně rozptylem sledovaných analytů portály relativně krátkého tunelu do okolního ovzduší.

Získané výsledky odpovídají výsledkům předchozích ověření matematického modelu v případě švýcarského tunelu Gubrist, kde bylo v roce 2004 zjištěno až 50% nadhodnocení vypočtených emisních faktorů pro lehká a asi 15% nadhodnocení vypočtených emisních faktorů pro těžká vozidla<sup>23</sup>. Tato skutečnost se kupodivu do jisté míry projevila i v případě amerických výpočetních modelů MOVES2010a, MOBILE6.2 a v případě vznětových motorů i v případě modelu EMFAC2007 (cit.<sup>22</sup>).

#### Závěr

Z výsledků studie vyplývá výrazné nadhodnocení emisí oxidů dusíku vypočtených pomocí matematického modelu HBEFA 3.1 pro osobní automobily a méně výrazné nadhodnocení emisí oxidů dusíku vypočtených pomocí matematického modelu HBEFA 3.1 pro nákladní automobily a autobusy. Tento výsledek je navíc zdůrazněn skutečností, že přes veškerou podobnost vozového parku České republiky a Spolkové republiky Německo, jejíž údaje o složení registrovaných vozidel byly použity při výpočtu, lze předpokládat, že flotila vozidel projíždějících sledovaným úsekem dálnice D11 bude pravděpodobně tvořena

vozidly zastaralejších konstrukcí a emisních kategorií než v případě Německa.

## LITERATURA

1. Palmgren F., Berkowicz R., Hertel O., Vignatti E.: *Sci. Total Environ.* 189, 409 (1996).
2. Nielsen T., Pilegaard K., Egeløv A. H., Granby K., Hummelshøj P., Jensen N. O., Skov H.: *Sci. Total Environ.* 189, 459 (1996).
3. Carslaw D. C., Beevers S. D.: *Atmos. Environ.* 39, 167 (2005).
4. Grice, S., Stedman, J., Kent, A., Hobson, M., Norris, J., Abbott, J., Cooke, S.: *Atmos. Environ.* 43, 2154 (2009)
5. Sjödin Å., Loman G., Omstedt G.: *Sci. Total Environ.* 1469, 365 (1994).
6. MacKenzie A. R., Harrison R. M., Colbeck I., Clark P. A., Vary R. H.: *Sci. Total Environ.* 159, 91 (1995).
7. Bukowiecki N., Dommen J., Prévôt A. S. H., Richter R., Weingartner E., Blatensperger U.: *Atmos. Environ.* 36, 5569 (2002).
8. Carslaw D. C.: *Atmos. Environ.* 39, 4793 (2005).
9. Hueglin C., Buchmann B., Weber R. O.: *Atmos. Environ.* 40, 3696 (2006).
10. Pirjola L., Paasonen P., Pfeiffer D., Hussein D., Hämeri K., Koskentalo T., Virtanen A., Rönkkö T., Keskinen J., Pakkanen T. A., Hillamo R. E.: *Atmos. Environ.* 40, 867 (2006).
11. Beckerman B., Jerrett M., Brook J. R., Verma D. K., Arain M. A. Finkelstein M. M.: *Atmos. Environ.* 42, 275 (2008).
12. Wallace J., Corr D., Deluca P., Kanaroglou P., McCarry B.: *J. Environ. Monit.* 11, 998 (2009).
13. Pleijel H., Karlsson G. P., Gerdin E. B.: *Sci. Total Environ.* 332, 261 (2004).
14. Clements A. L., Jia Y., Denbleyker A., McDonald-Buller E., Fraser M. P., Allen D. T., Collins D. R., Michel E., Pudota J., Sullivan D., Zhu Y.: *Atmos. Environ.* 43, 4523 (2009).
15. Skácel F., Müllerová T., Cudlín P., Tekáč V.: *Chem. Listy* 105, 778 (2011).
16. Fjæraa A. M., Hjellbrekke A. G.: *EMEP Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe, Ozone Measurements 2005*, EMEP/CCC-Report 2/2007, O-99074.
17. EPA 2010: *Official release of the MOVES2010 motor vehicle emissions model for emission inventories in SIPs and transportation conformity*, Fed. Regist. 75:9411–9414 [Vol. 75, No. 40, March 2, 2010].
18. EPA 2014: *Official Release of EMFAC2014 Motor Vehicle Emission Factor Model for Use in the State of California*, Fed. Regist. 80: 77337-77340 [Vol. 80, No. 239, December 14, 2015].
19. Barth M., An F., Younglove T., Scora G., Levine C., Ross M., Wenzel T.: *The Development of a Comprehensive Modal Emissions Model*. Final report to the National Cooperative Highway Research Program. CMEM 1991.
20. Kukkonen J., Härkönen J., Walden J., Karppinen A., Lusa K.: *Atmos. Environ.* 35, 949 (2001).
21. Franco V., Kousoulidou M., Muntean M., Ntziachristos L., Hausberger S., Dilara P.: *Atmos. Environ.* 70, 84 (2013).
22. Fujita E. M., Campbell D. E., Zielinska B., Chow J. C., Lindhjem C. E., DenBleyker A., Bishop G. A., Schuchmann B. G., Stedman D. H., Lawson D. R.: *J. Air Waste Manage. Assoc.* 62, 1134 (2012).
23. John C., Friedrich R., Staehelin J., Schläpfer K., Stahel W. A.: *Atmos. Environ.* 33, 3367 (1999).
24. Colberg C. A., Tona B., Stahel W., Meier M., Staehelin J.: *Atmos. Environ.* 39, 4703 (2005).
25. Sturm P. J., Rodler J., Lechner B., Almbauer A.: *Int. J. Vehicle Design* 27, 65 (2001).
26. Hausberger S., Rodler J., Sturm P., Rexeis M.: *Atmos. Environ.* 37, 5237 (2003).
27. Keller M.: *Handbook Emission Factors for Road Transport 3.1*, INFRAS Bern 2010.
28. Hausberger S., Rexeis M., Zallinger M., Luz R.: *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*, Graz University of Technology, Graz 2009.
29. Massart D. L., Vandeginste B. G. M., Deming S. N., Michotte Y., Kaufman L.: *Chemometrics: a textbook*, Elsevier, Amsterdam 1988.
30. Dohnal L., v knize: *Štatistické metody pro klinickou epidemiologii a laboratorní praxi*, kap. IV, Aprilla, Košice 2008.
31. *Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší*, (příloha č. 1). Sbírnka zákonů 2012, částka 69, str. 2822.

**F. Skácel, K. Maneva, and V. Tekáč** (*Department of Gas, Coke and Air Protection, University of Chemistry and Technology, Prague*): **Evaluation of a Mathematical Model to Estimate the Nitrogen Oxides Emission Factors**

Emissions of nitrogen oxides currently represent a crucial problem of ambient air quality protection. Mathematical models used to simulate the traffic emissions situations were designed by many institutes across all continents. Only a few of those models were evaluated using simultaneous measuring of corresponding NO<sub>x</sub> concentrations in the ambient air. The most convenient site for those validation measurements are the road tunnels. HBEFA is the most popular model within the Central Europe area. The previous validation studies indicated a certain overestimation of the model calculation results, as compared to measured values. Comparison of the HBEFA model results and several measurement campaign data in Czech Republic confirmed this trend and emphasized the need of a further improvement of this model.