

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Studium vlivu meteorologických podmínek na zhoršování kvality  
ovzduší v okolí dopravních zdrojů

Josef Toláš

Diplomová práce  
2011

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef TOLÁŠ**  
Osobní číslo: **D09786**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury - ochrana životního prostředí v dopravě**  
Název tématu: **Studium vlivu meteorologických podmínek na zhoršování kvality ovzduší v okolí dopravních zdrojů**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Zásady pro vypracování:

1. Na základě vypracovaného rešeršního přehledu analyzujte současný stav poznatků o celoročním vlivu meteorologických podmínek (teplota, vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru, doba a intenzita slunečního svitu) a intenzity dopravy na koncentrace vybraných škodlivin v ovzduší.
  2. Na základě provedené rešerše zajistěte data vhodná pro hodnocení vlivu meteorologických podmínek na škodliviny pocházející z dopravy z vybraných dopravních i pozadových lokalit.
  3. Získané výsledky vyhodnoťte s využitím statistických metod a interpretujte, závěry zpracujte ve formě doporučení pro uživatele v praxi.
-

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tiskem**

Seznam odborné literatury:

- 1) Zdroje dat: ISKO? Tabelární ročenky. [online]. [2011-02-21]. <[http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab\\_roc/tab\\_roc\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/tab_roc_CZ.html)>.
- 2) ADAMEC, V., HUZLÍK, J., LIČBINSKÝ, R., DUFEK, J., JEDLIČKA, J., PROVALILOVÁ, I., ADAMCOVÁ, M., JÍCHA, M., POSPÍŠIL, J., KATOLICKÝ, J., BENCKO, V., PETANOVÁ, J., NOVOTNÝ, L. Pražnost dopravy a její vlivy na imisní zatížení ovzduší suspendovanými částicemi. Výroční zpráva projektu VaV 1F54H/098/520 za rok 2007. Brno: CDV, 2008. 110 s.
- 3) MELOUN, M., MILITKÝ, J., HILL, M. Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech. Praha: ACADEMIA, 2005. 450 s.
- 4) MELOUN, M., MILITKÝ, J. Statistické zpracování experimentálních dat. 2. vydání. Praha: East Publishing, 1998. 840 s.
- 5) Technical Documents for Wet and Dry Deposition Monitoring for Male Declaration. [online]. [2011-02-21]. <<http://www.rrcap.unep.org/male/national>>.
- 6) Zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší, v aktuálním znění.
- 7) Nařízení vlády č. 597/2006 Sb., kterým se stanoví imisní limity a podmínky a způsob sledování, posuzování, hodnocení a řízení kvality ovzduší v aktuálním znění.


Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Jaroslava Machalíková, CSc.**  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2011**

  
prof. Ing. Bohumil Čížek, CSc.  
děkan

L.S.

  
Ing. Leo Šatka, Ph.D.  
vedoucí katedry

dan

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne:

Josef Toláš

## Poděkování

Zejména bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za podporu při studiu na VŠ.

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při tvorbě této práce, především doc. RNDr. Jaroslavě Machalíkové, CSc. a RNDr. Jiřímu Huzlíkovi, za jejich čas, rady a pomoc.

Také bych chtěl poděkovat Ing. Aleně Sieglerové z ČHMÚ za vstřícný postoj při zajišťování dat.

## **ANOTACE**

Práce je zaměřena na hodnocení vlivu meteorologických podmínek na šíření znečišťujících látek od dopravních zdrojů. Součástí práce je ověření použitelnosti a rozšíření metodiky vytvořené pracovníky CDV Brno na konkrétních datech, dále aplikace statistického software QC – Expert pro hodnocení vlivu meteorologických podmínek na koncentrace vybraných škodlivin z dopravy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Meteorologické podmínky, doprava, emise, pevné částice, QC – Expert

## **TITLE**

Study of the influence of meteorological conditions on the degradation of air quality near traffic sources

## **ANNOTATION**

The work is focused on assessing the impact of meteorological conditions on the distribution pollutants from transport sources. Part of the work is verification of the application and extension of the methodology developed by CDV Brno staff on specific dates, as well as the application of statistical software QC - Expert for reviews of the impact of meteorological conditions on concentrations of selected pollutants from transport.

## **KEYWORDS**

Meteorological conditions, transport, emissions, particulates, QC – Expert

# Obsah

1. Úvod.....	8
2. Teoretická část .....	9
2.1 Vybrané nebezpečné látky a jejich vliv na člověka .....	9
2.2 Vybrané státní orgány zabývající se mobilními zdroji znečištění .....	11
2.3 Umístění bodů vzorkování .....	11
2.4 Evropské emisní standardy .....	13
3. Současný stav.....	14
3.1 Doprava a změny klimatu .....	14
3.1.1 Primární snižování emisí .....	17
3.1.2 Sekundární snižování emisí .....	19
3.1.3 Další emise související s dopravou.....	20
3.2 Vývoj emisí do roku 2020 v evropských městských aglomeracích.....	20
3.3 Pevné částice .....	23
3.2.1 Český hydrometeorologický ústav.....	24
3.2.2 Centrum dopravního výzkumu .....	24
3.3 Koncentrace PM.....	24
3.4 Distribuce vybraných prvků na PM .....	28
3.5 Hodnocení závislosti mezi rychlostí větru a koncentrací PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> .....	29
4 Praktická část .....	38
4.1 QC – Expert.....	38
4.2 Větrná růžice .....	39
4.3 Koncentrace PM <sub>10</sub> .....	40
4.4 Hodnocení závislosti rychlosti větru a koncentrací PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> .....	41
4.5 Vliv meteorologických podmínek na PM <sub>10</sub> .....	42
4.6 Vliv meteorologických podmínek na CO .....	47
4.7 Vliv meteorologických podmínek na NO .....	48
4.8 Vliv meteorologických podmínek na NO <sub>2</sub> .....	50
Závěr .....	53
Použité informační zdroje:.....	55
Seznamy.....	58
Seznam zkratk:.....	58
Seznam obrázků:.....	60
Seznam tabulek:.....	61
Přílohy.....	62
Příloha 1 .....	62

## 1. Úvod

Narůstající objem dopravy vyvolává zvýšený tlak na životní prostředí, zejména pokud jde o změnu klimatu a ztrátu biologické rozmanitosti. Současné snahy o potlačení těchto trendů v nejlepším případě jen zpomalují tempo jejich nárůstu. Velkým problémem je z hlediska účinků na lidské zdraví vliv dopravy, zejména škodlivin z provozu dopravních prostředků a dopravních staveb, na ovzduší.

Podle zákona 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší, v aktuálním znění, je každý povinen omezovat a předcházet znečišťování ovzduší a snižovat množství jím vypouštěných znečišťujících látek stanovených podle zákona a prováděcích právních předpisů [1]. Přesto však jsou ve městech kongesce, smog a často jsou překračovány limitní hodnoty znečišťujících látek. Tyto látky znečišťují životní prostředí, poškozují ho a v některých případech způsobují trvalé poškození. Znečišťující látky mají negativní vliv i na lidské zdraví – proto je nutné množství nebezpečných látek v ovzduší monitorovat.

Od zdroje znečištění se látky šíří působením meteorologických vlivů, především proudění vzduchu. Cílem práce je proto identifikace příspěvků dopravy ke znečištění ovzduší s přihlédnutím k meteorologickým podmínkám (vliv směru a rychlosti větru, teploty, slunečního svitu, vlhkosti vzduchu a pod) a hustotě dopravy. Metodicky práce navazuje na výzkumy, které byly provedeny v letech 2007–2008 pracovníky Centra dopravního výzkumu, v. v. i. v Brně. V rámci této diplomové práce byla metodika CDV rozšířena a upravena, byla ověřena její funkčnost a použitelnost v praxi na konkrétních datech získaných z Oddělení všeobecné klimatologie a Úseku ochrany ovzduší Českého hydrometeorologického ústavu v Praze z vybrané lokality. Vypočtené výsledky byly porovnány s výsledky získanými na CDV.



## 2. Teoretická část

Znečištění dopravními prostředky se podle zákona 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší, v aktuálním znění řadí mezi mobilní zdroje znečištění ovzduší. Provozovatelé těchto zdrojů jsou povinni poskytovat informace o těchto zdrojích, jejich technickém stavu a vypouštěných emisích.

Sledování kvality ovzduší se provádí pro znečišťující látky uvedené v příloze č. 1 vyhlášky 597/2006 Sb., kterou se stanoví imisní limity a podmínky a způsob sledování, posuzování, hodnocení a řízení kvality ovzduší v aktuálním znění. Měří se úroveň znečištění ovzduší na určených místech, a to kontinuálně (dlouhodobě a nepřetržitě) nebo jednorázovým odběrem vzorků. Při měření znečištění od mobilních zdrojů se používá především kontinuální měření.

Měření, jehož účelem je prokázat dodržování emisních limitů nebo ověření správnosti měření znečišťujících látek prováděných provozovatelem u zvláště velkých, velkých a středních stacionárních zdrojů provádí osoba, která je držitelem platné autorizace vydané českým institutem pro akreditaci.

### 2.1 *Vybrané nebezpečné látky a jejich vliv na člověka*

Chemické látky mají na lidský organismus různý vliv. Některé látky jsou pouze nepříjemné, a jiné mohou způsobit trvalé následky, případně smrt. Účinky se mohou projevit okamžitě (akutně), ale i po velmi dlouhé době a delšímu vystavení nebezpečným látkám (chronicky). Vybrané látky vznikající v dopravě a jejich vliv na člověka:

- CO – oxid uhelnatý

Je to bezbarvý plyn, bez zápachu a chuti, který reaguje s hemoglobinem za vzniku karboxyhemoglobinu. Váže se na hemoglobin lépe než kyslík, a tudíž může způsobit smrt udušením.

Do životního prostředí vstupuje nedokonalým spalováním uhlovodíkových paliv.

Maximální denní osmihodinový průměr je  $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  [2].

- HC – uhlovodíky

Uhlovodíky jsou nejjednodušší organické sloučeniny, neboť obsahují ve svých molekulách pouze atomy uhlíku a vodíku. Za normálních podmínek jsou uhlovodíky

$C_1 - C_4$  plynné,  $C_5 - C_{16}$  kapalné a od  $C_{17}$  tuhé látky. Jsou nerozpustné ve vodě, rozpustné v nepolárních rozpouštědlech, mají menší hustotu než voda a jsou hořlavé.

Jejich vlastnosti jsou rozmanité. Mají akutní toxické účinky a mnoho z nich je potenciálními karcinogeny a mutageny.

Do životního prostředí se dostávají převážně spalováním, ale i z požárů, vulkanické činnosti a činností mikroorganismů.

- $NO_x$  – oxidy dusíku

Mezi tyto látky patří především NO (oxid dusnatý) a  $NO_2$  (oxid dusičitý). Mají toxické a dráždivé účinky. Mohou se vázat na hemoglobin a reagovat s organickými látkami za vzniku přízemního ozónu.

Do životního prostředí vstupují spalováním nejen fosilních paliv, ale i plynů a biomasy. Imisní limit s hodinovým průměrováním na jeden kalendářní rok je  $30\mu g \cdot m^{-3}$  [2].

- $CO_2$  – oxid uhličitý

Skleníkový plyn, který je nedýchatelný. Je to druhý nejvýznamnější skleníkový plyn s podílem kolem 26 %. Na prvním místě jsou vodní páry (60 %) [21].

Do životního prostředí vstupuje spalováním fosilních paliv.

- PM – pevné částice

Částice pevného a kapalného materiálu o velikosti od několika nanometrů až po 0,5 mm, které setrvávají po určitou dobu v ovzduší. Setkáváme se s nimi v podobě složité heterogenní směsi z hlediska velikosti částic a jejich chemického složení, čemuž odpovídá i pestrá škála jejich účinků. Pronikají do plicních sklípků, kde se usazují a ztěžují dýchání. Také se na ně váží další zdraví nebezpečné látky.

- Při krátkodobé expozici

vyšší počet zánětlivých onemocnění plic  
nepříznivé účinky na srdečně-cévní systém  
vyšší spotřeba léčiv  
zvýšení počtu hospitalizací  
vyšší úmrtnost

- Při dlouhodobé expozici

snížení plicních funkcí dětí i dospělých  
vyšší počet chorob dolních cest dýchacích  
zvýšení výskytu chronické obstrukční nemoci plicní  
snížení předpokládané délky doby dožití [3]

Pevné částice se do životního prostředí dostávají z průmyslu, zemědělství, dopravy a spalování a sekundárním znečištěním, např.: otěry pneumatik, koroze, prach, atd. Imisní limit hodinového průměrování: na 24 hodin je  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , na jeden kalendářní rok je  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  [2].

## ***2.2 Vybrané státní orgány zabývající se mobilními zdroji znečištění***

Mobilními zdroji v dopravě se zabývá několik státních orgánů. Každý z nich má však jinou funkci.

- Ministerstvo životního prostředí

Vykonává působnost ústředního správního úřadu v oblasti ochrany ovzduší, ozonové vrstvy a klimatického systému Země před emisemi skleníkových plynů. Řídí výkon státní správy, a vykonává vrchní státní dozor. Zajišťuje sledování kvality ovzduší, provoz základní sítě imisního monitoringu na celém území České republiky a sledování úrovně znečištění. Zabezpečuje jednotný registr informačního systému kvality ovzduší (ISKO) a registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší[1]. Vlastní měření pro ISKO provádí ČHMÚ.

- Ministerstvo zdravotnictví

Předkládá ministerstvu životního prostředí návrhy ke zpřísnění imisních limitů v případech odůvodněné potřeby na základě zhodnocení zdravotních rizik. Provádí sledování zdravotního stavu obyvatelstva a hodnocení zdravotních rizik v oblastech se zhoršenou kvalitou ovzduší a sídelních seskupeních pro potřeby zpracování programů zlepšení kvality ovzduší[1].

- Česká inspekce životního prostředí

Kontroluje správnost provádění autorizovaného měření emisí a imisí[1].

## ***2.3 Umístění bodů vzorkování***

Místa odběru vzorků zaměřená na ochranu zdraví lidí se jsou volena tak, aby poskytla údaje o oblastech v rámci zón a aglomerací, v nichž se vyskytují nejvyšší koncentrace a jimž bude obyvatelstvo pravděpodobně přímo nebo nepřímo vystaveno. Oblasti se obvykle vybírají tak, aby byly reprezentativní i pro podobné lokality, které neleží v jejich bezprostřední blízkosti. Odběry se provádí tak, aby se zamezilo měření velmi malých mikroprostředí. To znamená, že místo odběru vzorků musí být umístěno

tak, aby vzorky vzduchu byly pokud možno reprezentativní pro kvalitu ovzduší v okolí nejméně 200 m<sup>2</sup> v dopravně zaměřených lokalitách [2].

Při měření se uplatňují tyto zásady:

- proud vzduchu kolem vstupního otvoru odběrové sondy nesmí být omezen a v blízkosti nesmí být žádné překážky ovlivňující proud vzduchu (odběrové zařízení musí být zpravidla vzdáleno od budov, balkonů, stromů a jiných překážek,
- vstupní otvor odběrové sondy se zpravidla umístí ve výšce mezi 1,5 m (dýchací zóna) a 4 m nad zemí, za určitých okolností může být zapotřebí i vyšší poloha (až 8m), vyšší umístění může být vhodné, je-li stanice reprezentativní pro velkou oblast,
- vstupní otvor odběrové sondy nesmí být umístěn v bezprostřední blízkosti zdrojů, aby bylo zamezeno přímému vlivu emisí nesmíšených s okolním vzduchem,
- výstupní otvor odběrového zařízení musí být umístěn tak, aby byl znemožněn vstup vytékajícího odebraného vzduchu zpět do vstupního otvoru odběrového zařízení,
- odběrová zařízení zaměřená na dopravu
  - se zřetelem na všechny znečišťující látky by taková místa odběru vzorků měla být alespoň 25 m od krajnice velkých křižovatek a nejméně 4 m od středu nejbližšího dopravního pruhu,
  - pro měření oxidu dusičitého a oxidu uhelnatého by vstupy měly být nejdále 5 m od okraje vozovky,
  - vstupy by měly být umístěny tak, aby měření byla reprezentativní pro úroveň znečištění ovzduší v blízkosti linie obytné zástavby, ale nejdále 10 m od vozovky[2].

Odběrová místa by měla být alespoň 25 m od krajnice velkých křižovatek a nejméně 4 m od středu nejbližšího dopravního pruhu, pro měření oxidu dusičitého a oxidu uhelnatého by vstupy měly být nejdále 5 m od okraje vozovky. Vstupy odběrového zařízení by měly být umístěny tak, aby měření byla reprezentativní pro úroveň znečištění ovzduší v blízkosti linie obytné zástavby, ale nejdále 10 m od vozovky [2].

Postupy pro výběr míst měření se zdokumentují ve fázi klasifikace. Povinně musí být pořízena fotografie okolí vybraného místa v hlavních světových stranách a podrobné mapy. Umístění bodů vzorkování se pravidelně přezkoumává a pořizuje se nová dokumentace, aby byla doložena průběžná platnost výběrových kritérií.

Metody sledování kvality ovzduší pro znečišťující látky jsou popsány v samostatných normách. Například pro odběr vzorků a stacionární měření PM<sub>10</sub> se používá česká technická norma EN 12341:1999 „Kvalita ovzduší – Stanovení frakce PM<sub>10</sub> v suspendovaných částicích – Referenční metoda a polní zkouška k prokázání ekvivalence metod měření“[2].

Pro modelování a výpočet možných imisí je možno použít speciální software. Vyhláška umožňuje použití tří softwarových produktů (tabulka 1). Modelování není vhodné pro znečišťující látky s krátkou dobou setrvání v atmosféře a pro rychle reagující látky (např. troposférický ozon). Modely neuvažují znečištění pozadí, ani nezahrnují sekundární znečištění pevnými částicemi. Modelování neslouží jako náhrada měření[2].

Tabulka 1: Software pro modelování imisí [2]

Název modelu	Oblasti použití	Velikost výpočetní oblasti	Určen pro znečišťující látky
SYMOS '97	<b>Venkovské oblasti</b> (bodové, plošné a mobilní zdroje znečišťování ovzduší)	do 100 km od zdroje znečišťování ovzduší	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> a další méně reaktivní látky (např. benzen)
ATEM	<b>Městské oblasti nad úrovní střech budov</b> (bodové, plošné a mobilní zdroje znečišťování ovzduší)	do 100 km od zdroje znečišťování ovzduší	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> a další méně reaktivní látky (např. benzen)
AEOLIUS	<b>Městské oblasti v uličních kaňonech</b> (mobilní zdroje znečišťování ovzduší)	jednotlivé ulice	znečišťující látky emitované mobilními zdroji

## 2.4 Evropské emisní standardy

Evropské emisní standardy (EURO) jsou souborem nařízení a požadavků, které stanovují limity pro složení výfukových plynů všech automobilů vyráběných v členských zemích EU. Platí i pro automobily dovážené do EU, které nemají globální

homologaci. Cílem je postupné snižování obsah oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), uhlovodíků (HC), oxidu uhelnatého (CO) a pevných částic (PM) v emisích. Oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) není součástí těchto směrnic, ale již byl schválen příslušný legislativní návrh na jeho omezení. EURO rozděluje automobily podle hmotnosti (osobní automobily, nákladní, autobusy) a podle typu motoru (benzínové a naftové).

Tabulka 2: Tabulka emisních norem pro osobní automobily (Veškeré údaje jsou uváděny v g/km, tabulka převzata z [4] a zkrácena)

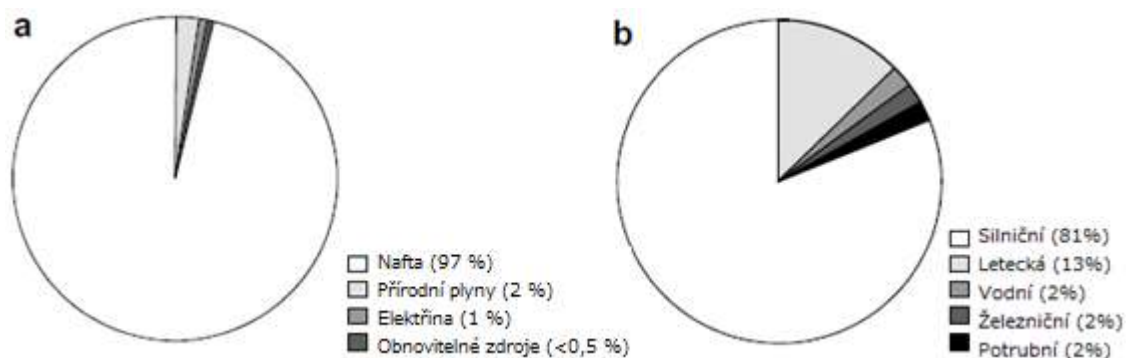
Název	Platnost	CO	HC	$\text{NO}_x$	HC+ $\text{NO}_x$	PM
<b>Diesel</b>						
<b>Euro 1</b>	Červenec 1992	2,72	-	-	0.97	0.14
<b>Euro 2</b>	Leden 1996	1.0	-	-	0.9	0.10
<b>Euro 3</b>	Leden 2000	0.64	-	0.50	0.56	0.05
<b>Euro 4</b>	Leden 2005	0.50	-	0.25	0.30	0.025
<b>Euro 5</b>	Září 2009	0.50	-	0.18	0.23	0.005
<b>Euro 6</b>	Září 2014	0.50	-	0.08	0.17	0.005
<b>Benzín</b>						
<b>Euro 1</b>	Červenec 1992	2,72	-	-	0.97	-
<b>Euro 2</b>	Leden 1996	2,2	-	-	0.5	-
<b>Euro 3</b>	Leden 2000	2,3	0.20	0.15	-	-
<b>Euro 4</b>	Leden 2005	1.0	0.10	0.08	-	-
<b>Euro 5</b>	Září 2009	1.0	0.10	0.06	-	0.005
<b>Euro 6</b>	Září 2014	1.0	0.10	0.06		0.005

### 3. Současný stav

#### 3.1 Doprava a změny klimatu

Hnací silou dopravní poptávky je v konečném důsledku hospodářský růst, který má sám o sobě za následek zvýšenou potřebu přepravy a cestování. Vrchol produkce ropy je podle některých autorů nevyhnutelný [5] a světové zdroje budou vyčerpány v průběhu 50 let [6]. V současné době je třeba realizovat řadu rozhodnutí tak, aby dopady dopravy na životní prostředí byly minimalizovány a zdroje fosilních paliv zachovány.

Na obrázku 1 je dokumentováno, že dominantní palivo je ropa a největší zastoupení má silniční doprava.



Obrázek 1 - (a) použití paliv v sektoru dopravy v zemích OECD (Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj), (b) podíly dopravy v zemích OECD [7]

Vliv dopravy na globální klima není omezen pouze na emise z motorových vozidel. Úvaha ‘wells to wheels’ (analýza životního cyklu spotřebního zboží včetně dopravy paliva a analýzy přístupu palivového cyklu) o celkových emisích CO<sub>2</sub> z průměrného automobilu ukázala, že 76 % bylo ze spotřeby paliva, 9 % bylo z výroby vozidla a dalších 15 % bylo z emisí a ztrát v systému dodávky paliva [20].

Jednou z možností snižování vlivu dopravy na životní prostředí je změna dopravních prostředků. Namísto individuální dopravy používat dopravu, kde je možno převézt více lidí, eventuelně nákladů.

- Námořní doprava

Námořní doprava je dominantní pro zámořskou nákladní dopravu. Je často považována za formu dopravy, která je udržitelná, energeticky účinná a relativně šetrná k životnímu prostředí. Stále však ve velké míře emituje skleníkové plyny. V současné době je 90 % světového zboží přepravováno za nízké náklady námořní dopravou. Zde je velký technologický pokrok s cílem zlepšit účinnost paliva, rozvíjení lepších motorů, a efektivnějších trupů lodí, které mohou snížit emise CO<sub>2</sub> až o 50 % [7]. Kromě toho používání čistších paliv, jako je plyn, může snížit emise z lodí až o 90 %. Námořní doprava by mohla být rovněž ideální pro použití palivových článků (případně jako hybridní).

- Železniční doprava

Pro jízdu na dlouhou vzdálenost je železnice jedinou alternativou silniční a letecké dopravy. Jízda na kolejích je brána jako ekologicky uvědomělá forma dopravy, přičemž je čtyřikrát účinnější pro cestující a dvakrát efektivnější pro převoz nákladů, než silniční

doprava [8]. Většina železničních systémů je v dnešní době elektrická. Výroba elektřiny však vyžaduje další infrastrukturu. Mnoho elektráren je tepelných, kde se spalují fosilní paliva. V těchto elektrárnách pak vzniká CO<sub>2</sub> a další znečišťující látky. V případě, že dodaná energie je z nefosilních zdrojů paliva, jako jsou jaderné elektrárny, nebo z obnovitelných zdrojů (sluneční, větrné a vodní elektrárny), emise CO<sub>2</sub> mohou být minimální. Dále například, vodík může být více vhodný jako palivo pro vlaky než pro osobní automobily, na železnici je snadnější využít velké palivové články.

- **Autobusová doprava**

Autobus je často jedinou alternativou k použití automobilu. Autobusy jsou flexibilní, mohou být rychle nasazeny v reakci na měnící se poptávku a není nutná speciální infrastruktura, jako je tomu v případě vlaků. Autobusová doprava není čistý způsob dopravy, ale jakmile obsazení autobusu přesahuje tři lidi, pak emise CO<sub>2</sub>, na jednoho cestujícího na kilometr, jsou mnohem nižší než u automobilů [7]. V mnoha světových městech jsou používány stále čistší a úspornější autobusy. Tyto autobusy jezdí na LPG, CNG, elektřinu a vodík. Tento technologický vývoj se bude dále vyvíjet a snižovat emise na cestujícího na kilometr.

- **Chůze a cyklistika**

Chůze a jízda na kole je řešení pro osobní dopravu s nulovými emisemi uhlíku, která je šetrná k životnímu prostředí. Nicméně, jak pěší, tak i cykloturistika za posledních 20 let výrazně klesla. Tento pokles silně odráží dostupnost automobilů a řadu psychologických a sociologických faktorů (strach z kriminality, počasí, atd.). Hlavní problém však je, že málo cílových destinací (obchody, zaměstnání, atd.) je ve vzdálenosti, která se dá ujít nebo ujet na kole.

Velmi zajímavé je porovnání produkce CO<sub>2</sub> mezi různými dopravními prostředky, které bylo provedeno v Irsku (tabulka 3).



Tabulka 3: Celkové emise CO<sub>2</sub> na osobu na kilometr [9]

Doprava	Maximální kapacita	Emise při maximálním využití [kg CO <sub>2</sub> Osoba km <sup>-1</sup> ]		
		Přímé	Nepřímé	Celkové
Cyklistika	1	0,005	0,0061	0,011
DART	945	0,011	0,0006	0,011
Meziměstský autobus	57	0,015	0,0006	0,015
Dublinský autobus	90	0,016	0,0008	0,017
Městský autobus	50	0,025	0,0015	0,027
Osobní automobil	4	0,042	0,0103	0,052
SUV	5	0,052	0,0162	0,068

Doprava	Maximální kapacita	Emise při průměrném využití [kg CO <sub>2</sub> Osoba km <sup>-1</sup> ]		
		Přímé	Nepřímé	Celkové
Cyklistika	1	0,005	0,0061	0,011
DART	945	0,028	0,0006	0,029
Meziměstský autobus	57	0,029	0,0011	0,031
Dublinský autobus	90	0,032	0,0017	0,034
Městský autobus	50	0,05	0,0031	0,053
Osobní automobil	4	0,12	0,0293	0,149
SUV	5	0,184	0,0579	0,242

DART - Dublin Area Rapid Transit – elektrická vlaková doprava

Kromě každodenních emisí CO<sub>2</sub> z vozidel, výroba a doprava těchto dopravních prostředků na místo použití také významně přispívá k znečištění atmosféry. Všechny tyto zdroje znečištění mohou být v průběhu životnosti vozidla sečteny. Čím je delší životnost vozidla, tím nižší jsou roční emise. Odbor životního prostředí a emisí v Austrálii v roce 2003 [9] zveřejnil metody pro odhad provozu a výroby energie vozidel. Výsledky, vyjádřené jako osobokilometry, jsou porovnatelné s emisemi z provozu vozidel.

Další možností jak redukovat emise je jejich snižování přímo v dopravních prostředcích. Metody snižování emisí z výfukových plynů lze obecně zařadit do dvou skupin:

1. primární snižování emisí
2. sekundární snižování emisí

### 3.1.1 Primární snižování emisí

Jsou techniky ke snižování emisí během procesu spalování, jako např. spalování kvalitního paliva nebo modifikace spalování.

- **Kvalita paliva**

Složení paliva a jeho kvalita ovlivňuje produkci emisí z výfukových plynů motorových vozidel. Nejvýznamnějším přínosem u benzínů je zrušení prodeje olovnatých benzínů. Dále je kvalita ovlivněna snížením obsahu síry až na 10 ppm. U motorové nafty je kvalita ovlivňována zvyšováním cetanového čísla a odparností paliva při startu za nízkých teplot.

- **Snížování spotřeby paliva**

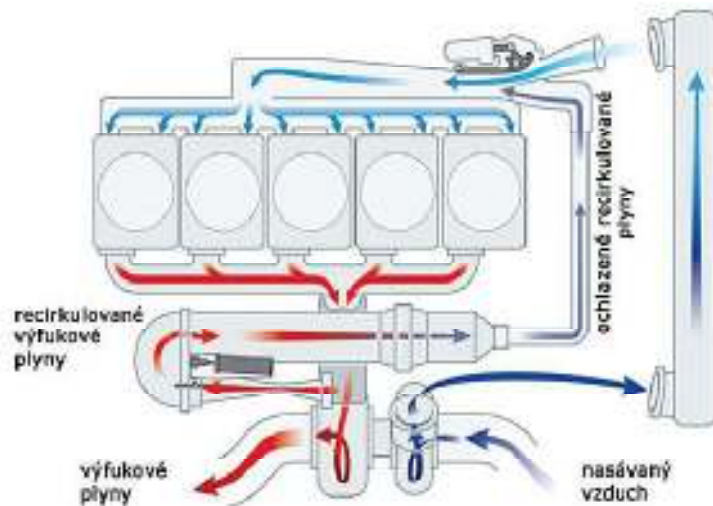
Snížení spotřeby paliva lze docílit mnoha způsoby. Řidič může spotřebu ovlivnit správnou jízdou. Na základě aktuálního zatížení řídicí jednotka vyhodnocuje vstřikování paliva do válců motoru, čímž dochází k optimalizaci spotřeby paliva. Další možnost ovlivnění spotřeby paliva je snížením odporu vzduchu jedoucího vozidla. Spotřeba paliva je závislá i na hmotnosti vozidla. Menší vozidla mají i menší spotřebu paliva.

- **Modifikace spalování**

Úprava spalovacího procesu se používá především ke snížování emisí oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ). Toho lze dosáhnout snížením spalovací teploty, nebo snížením obsahu kyslíku při spalovacím procesu. Tato opatření vedou k nedokonalému spalování paliva, které má za následek produkci většího množství oxidu uhelnatého (CO).

- **EGR ventil (Exhaust Gas Recirculation)**

Typické opatření pro naftové motory je systém EGR (Exhaust Gas Recirculation). Část výfukových plynů je v tomto systému vedena přes regulační ventil zpět do sání motoru. (obrázek 2) Spalování nafty probíhá v takovém případě při nižších teplotách, kdy je potlačována tvorba oxidů dusíku. Na druhé straně dochází k větší tvorbě pevných částic, které je pak nutno odstraňovat ve filtru pevných částic [10].



Obrázek 2 - Systém EGR [17]

- **Alternativní paliva**

Další možností snižování emisí je používání alternativních paliv. Nejznámější je použití biopaliv (bioetanol a metylestery mastných kyselin) a LPG (propan-butan) - ve srovnání s benzínem má LPG až o 80 % méně CO, o 30 % méně NO<sub>x</sub> a při hoření nevznikají tuhé částice. [11] Dále se používají CNG (stlačený zemní plyn), LNG (zkapalněný zemní plyn) a vodík. Při spalování vodíku vzniká pouze voda a NO<sub>x</sub>.

### 3.1.2 Sekundární snižování emisí

Jsou opatření koncového čištění, tj. taková, která redukují emise do ovzduší.

- **Katalyzátory**

Katalyzátor je látka ovlivňující rychlost chemické reakce, přičemž po skončení reakce zůstává v chemicky nezměněném stavu.

Katalyzátory, které se v současné době používají u automobilů, lze rozdělit do dvou skupin:

- **oxidační** - převádí C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> a CO na vodní páru a oxid uhličitý, oxidy dusíku však nejsou prakticky snižovány; tyto katalyzátory se používají u vznětových motorů.
- **redukční** - převádí pouze oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>) na dusík.
- **třícestné** - převádí C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, CO a NO<sub>x</sub> na vodní páru, oxid uhličitý a dusík; používají se u zážehových motorů s nepřímým i přímým vstříkovaní paliva [12].

- **Filtr pevných částic**

Výfukové plyny procházejí přes porézní keramické vložky částicových filtrů (DPF - Diesel Particulate Filter). Zachytáváním částic se na filtru tvoří saze, které mohou zanášet filtr a poté dochází k tlakovým ztrátám, snižování výkonu motoru a zvyšování spotřeby paliva. Z tohoto důvodu je zapotřebí filtry regenerovat - spálení částic a jejich přeměna na jiné skupenství.

- **Technologie SCR (Selectiv Catalytic Reduction)**

Selektivní katalytická redukce spočívá ve vstřikování močoviny do výfukového potrubí u naftových motorů. Aditivum na bázi močoviny je známo pod pojmenováním AdBlue (32,5 % vodný roztok močoviny). Močovina se nastříkuje do výfukového potrubí vozidla přes speciální redukční katalyzátor, kde se mění na amoniak. Amoniak reaguje na katalyzátoru s oxidy dusíku na dusík a vodu. Technologie SCR také umožňuje snížit spotřebu nafty o 4-6 % oproti motoru bez SCR [12].

### **3.1.3 Další emise související s dopravou**

Další emise vznikající v dopravě jsou při stavbě dopravní infrastruktury, jako jsou silnice, železnice a přístavní zařízení ale i mosty, parkoviště, čerpací stanice či tunely. Jejich stavba vyžaduje energii pro stavební práce, údržbu a výrobu materiálů (např. asfalt, beton a ocel). Také výroba vozidla vyžaduje energii, zejména u primárních produktů (např. oceli, hliníku a plastu). Kromě těchto s materiálem souvisejících emisí i výroba paliv generuje emise: z těžby, rafinace a dopravy [22].

## ***3.2 Vývoj emisí do roku 2020 v evropských městských aglomeracích***

V roce 2008 provedla laboratoř aplikované Termodynamiky Aristotelovy Univerzity v Thessalonice [13] výzkum vývoje emisí z automobilové dopravy v evropských městských aglomeracích. Emise byly navrženy pro stávající právní předpisy (CLE) a pro scénář představující maximální možné technické snížení (MFR). Výzkum byl proveden pro státy EU15 a tři nové státy (Česká Republika, Maďarsko a Polsko).

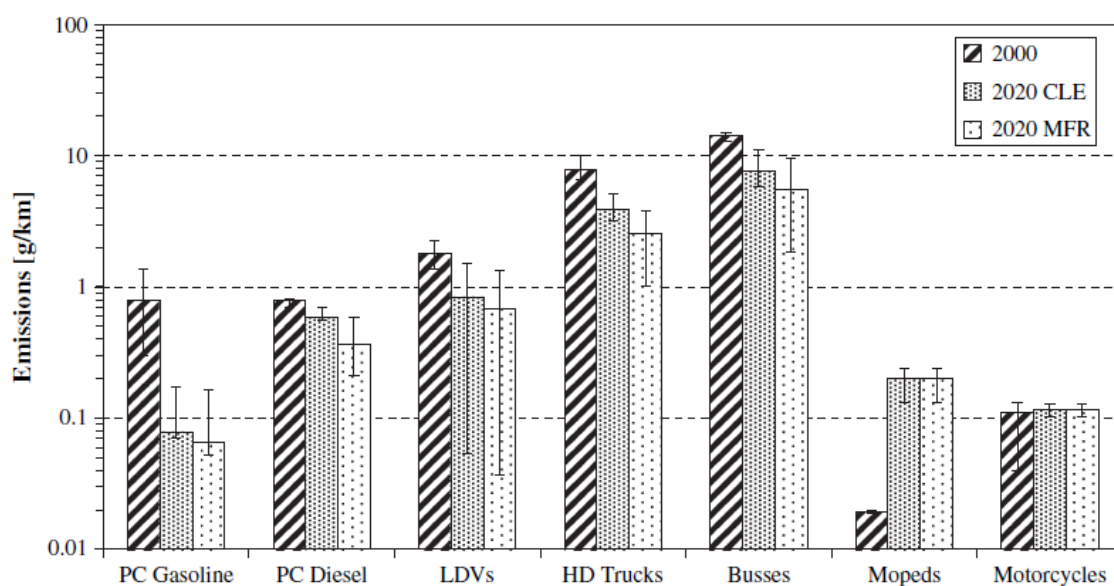
Množství automobilů v letech 2000-2020 bylo odhadnuto za pomoci modelu TREMOVE ([www.tremove.org](http://www.tremove.org)). Množství vozidel je založeno na datech

z EUROSTATu. Klasifikace automobilů podle různých technologií je založena na specifické době funkčnosti automobilů a implementaci nových emisních standardů.

Pro výpočet emisí výfukových plynů byl použit software COPERT 4 (<http://www.emisia.com/copert/>).

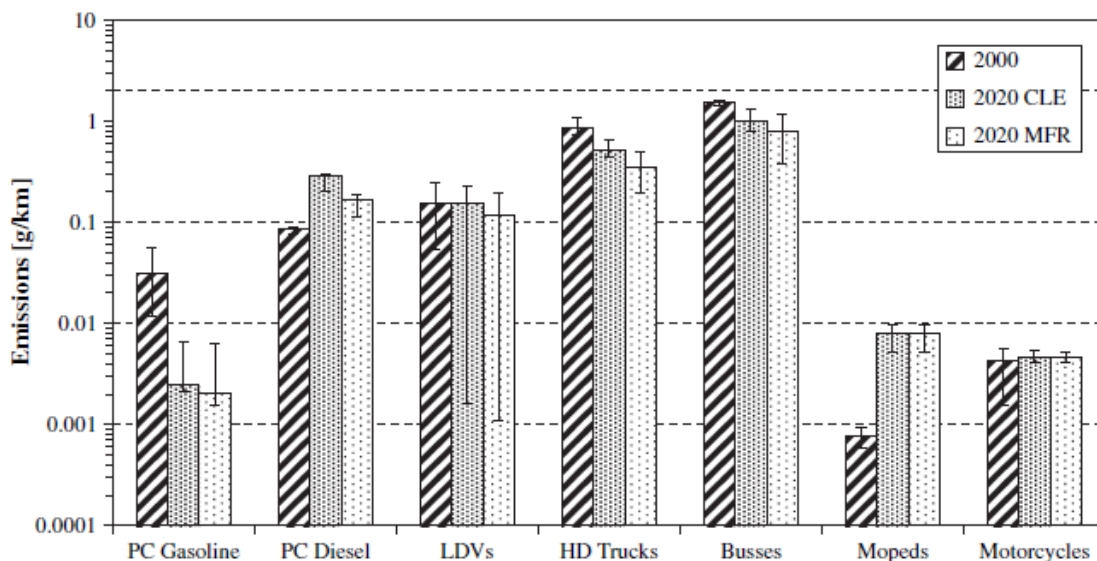
Vozový park byl složen z osobních automobilů (PC), lehkých užitkových vozidel (LDVs), těžkých nákladních vozidel (HDVs), včetně autobusů, a mopedů a motocyklů. Z výpočtů byla vyloučena těžká nákladní vozidla o celkové hmotnosti nad 20 tun, protože v městském prostředí se vyskytují pouze zřídka. Dále byla vozidla rozdělena na benzínová (gasoline) a dieselová (diesel).

Na obrázku 3 vidíme možný vývoj průměrných emisí  $\text{NO}_x$  pro jednotlivé druhy dopravních prostředků v letech 2000 a 2020 podle CLE a MFR. Díky zpřísnění limitů většina emisí pro jednotlivé druhy dopravních prostředků klesá. Zajímavý vývoj produkovaných emisí je pro mopedy a motocykly. Důvodem je, že v roce 2000 nebylo spalování pro jednostopá vozidla nijak řízeno a v důsledku nedostatku kyslíku ve spalovací komoře bylo produkováno málo emisí  $\text{NO}_x$ . V posledních letech je omezováno množství CO a HC. Za většího přístupu vzduchu vzniká i více  $\text{NO}_x$ .



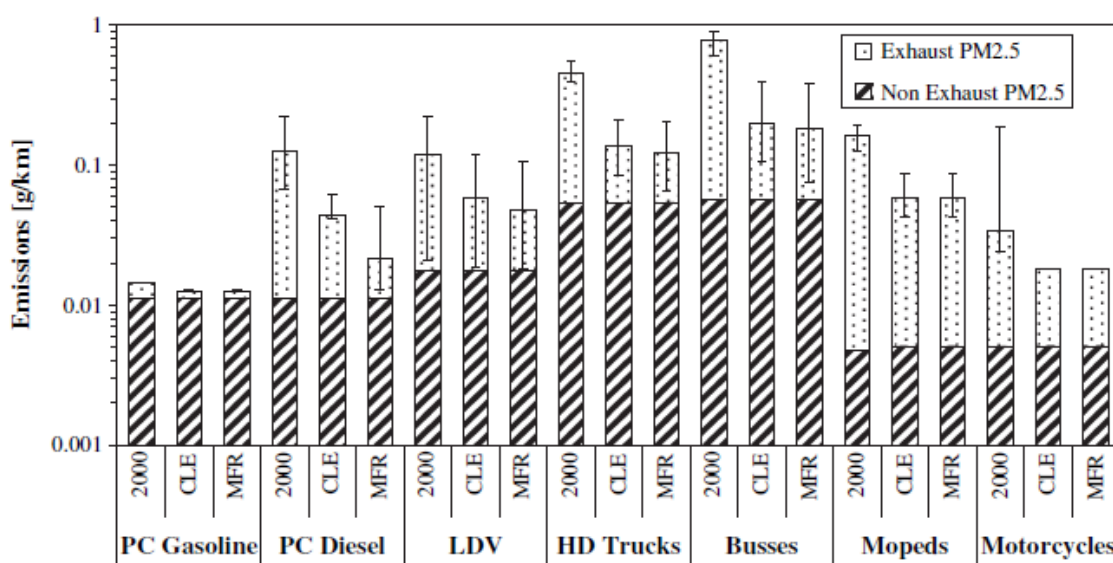
Obrázek 3 – Vývoj průměrných emisí  $\text{NO}_x$  pro jednotlivé druhy dopravních prostředků [13]

Na obrázku 4 je možno pozorovat předpokládaný vývoj  $\text{NO}_2$ . Pro jednostopá vozidla jsou díky stejným důvodům jako u  $\text{NO}_x$  emise v roce 2020 vyšší než v roce 2000. Další zajímavost je zvýšení emisí u osobních dieselových automobilů. Důvodem je používání oxidačních katalyzátorů, které neredukují emise  $\text{NO}_2$ . Proto je nutná další studie technických možností snižování těchto emisí.



Obrázek 4 – Vývoj průměrných emisí NO<sub>2</sub> pro jednotlivé druhy dopravních prostředků [13]

Obrázek 5 nám prezentuje vývoj emisí PM<sub>2,5</sub>, který je rozdělený na emise z výfukových plynů (spalovací procesy) a ostatní zdroje (otěry z pneumatik, brzdového obložení, atd.). Redukce emisí u dieselových motorů je přepokládáno především díky snížení teploty spalování a používání oxidačních katalyzátorů. U jednoštopých vozidel je snížení umožněno zavedením nových technologií (4dobé motory, třicestné katalyzátory, atd.). V dnešní době jsou studie primárně zaměřeny na emise ze spalovacích procesů. Na tomto grafu je zřetelné, že u dvouštopých vozidel je největším produkce PM<sub>2,5</sub> právě z nespalovacích procesů. Z tohoto důvodu se mělo v celkových emisích počítat i s emisemi z nespalovacích procesů.



Obrázek 5 - Vývoj průměrných emisí PM<sub>2,5</sub> pro jednotlivé druhy dopravních prostředků [13]

### 3.3 Pevné částice

Jsou částice pevného a kapalného materiálu rozptýlené ve vzduchu o velikosti od několika nanometrů až po 0,5 mm, které setrvávají po určitou dobu v ovzduší. Zdrojem pevných částic jsou přírodní procesy, např. výbuch sopky, větrná bouře nebo lesní požár, ale také lidská činnost, např. spalování uhlí, ropy, dřeva nebo odpadů, těžba uhlí, kamene či šterku, atd. Pronikají do plicních sklípků, kde se usazují a ztěžují dýchání. Také se na ně váží další zdraví nebezpečné látky. Podrobnější popis jejich účinků je v kapitole 2.1.



Obrázek 6 - Prachový mrak na pomezí Indie a Bangladéše [3]

V současné době žije téměř 25 % obyvatel zemí Evropské unie v místech, které jsou vzdáleny méně než 500 metrů od komunikací, po nichž projedou ročně více než 3 milióny vozidel. Jsou významnou příčinou zkracování průměrné délky života ve velkých městech, přitom snížení emisí PM nejmenších frakcí o 30 % by zachránilo 300-400 životů na každý milion obyvatel, kteří žijí ve městech. Znečištění ovzduší způsobuje každý rok smrt 370 000 Evropanů a 9 000 obyvatel České republiky. Dlouhodobá expozice vysokým koncentracím výfukových plynů z naftových motorů způsobuje nárůst výskytu rakoviny o 40 % a znečištěné ovzduší si vyžaduje 7x více lidských životů než dopravní nehody. Přitom v letech 1990 – 2004 bylo 43 % Evropanů žijících ve městech vystaveno množství PM, které přesáhlo platné limity [14].

### 3.2.1 Český hydrometeorologický ústav

Základní měření znečištění ovzduší, a tudíž i koncentrace PM provádí ČHMÚ. ČHMÚ se dělí na několik úseků:

- Úsek meteorologie a klimatologie – provádí předpověď počasí
- Úsek hydrologie – provádí především měření a archivaci dat pro množství a jakost podzemních a povrchových vod
- Úsek ochrany čistoty ovzduší – zabývá se získáváním objektivních a všestranných informací o dosavadním vývoji, současném stavu a prognóze znečištění. Tyto podklady používá pro navrhování, realizaci, kontrolu a hodnocení efektivnosti koncepčních i krátkodobých opatření k ochraně ovzduší[15].

ČHMÚ má rozlehlou síť stanic pro měření znečištění ovzduší, tak i ostatních činností, kterými se zabývá. Měří dlouhodobě a systematicky.

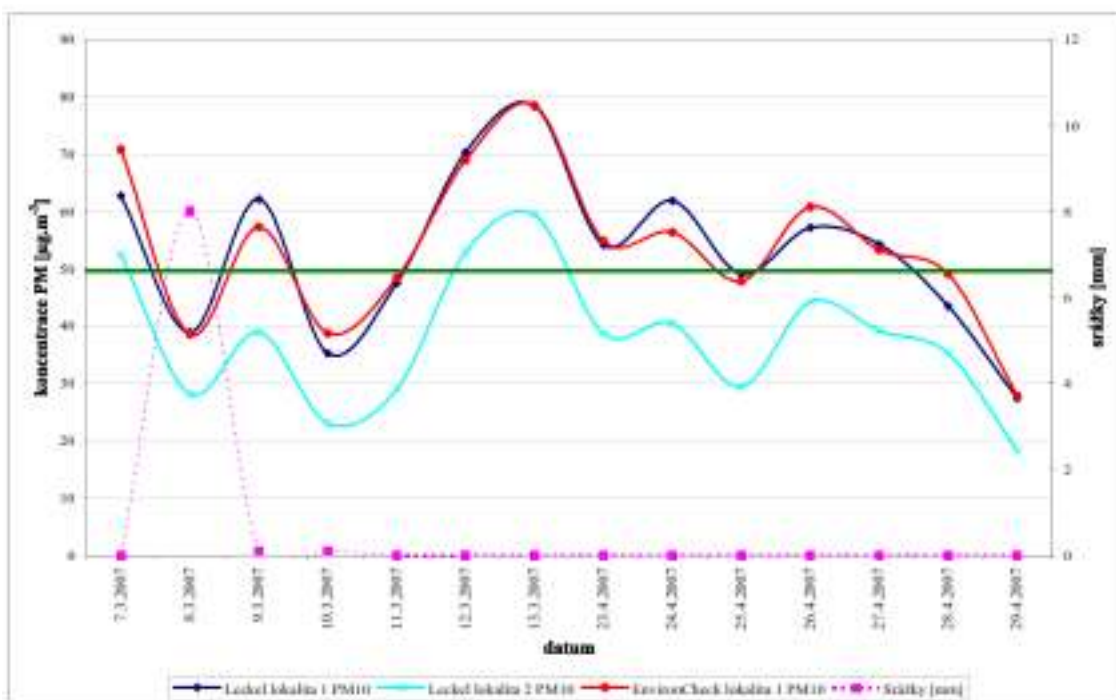
### 3.2.2 Centrum dopravního výzkumu

Již několik let provádí Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Brno (CDV) odběr a hodnocení koncentrací pevných částic v ovzduší. CDV neměří znečištění systematicky, ale v závislosti na řešených projektech.

### 3.3 Koncentrace PM

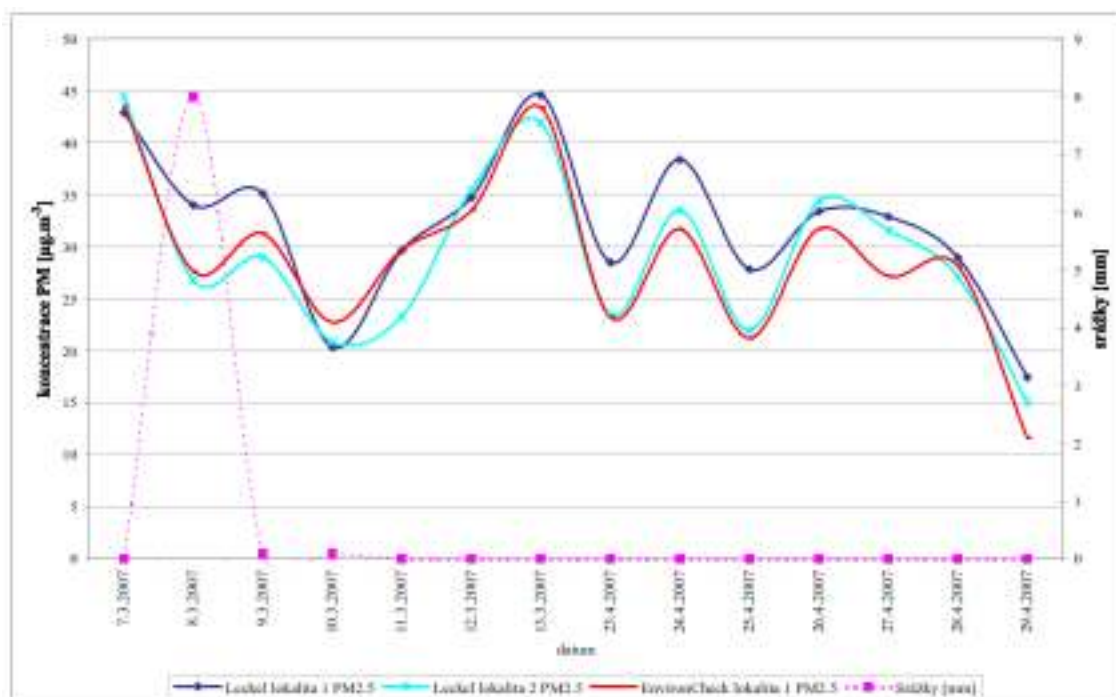
V roce 2007 až 2008 bylo provedeno 8 odběrových kampaní, z toho dvě byly zaměřeny na všechny velikostní frakce PM a zbytek na frakce s rozměry pod 1  $\mu\text{m}$ . Měření probíhalo na dvou lokalitách (lokalita 1 – uliční kaňon, 2 – rezidenční zástavba), na lokalitě 1 bylo kromě jednorázového odběru i kontinuální měření koncentrací. Odběrové akce v březnu a dubnu byly zaměřeny na měření jednotlivých frakcí PM. Průběh koncentrací  $\text{PM}_{10}$  je znázorněn na obrázku 7, v grafu je vyneseno i množství srážek v dané dny. Zelenou přímkou je znázorněn imisní limit stanovený v nařízení vlády 597/2006 Sb. Jak je z grafu patrné, k jeho překročení došlo v osmi případech ze 14 dnů měření na lokalitě 1, zatímco na lokalitě 2 byl překročen pouze dvakrát [16].



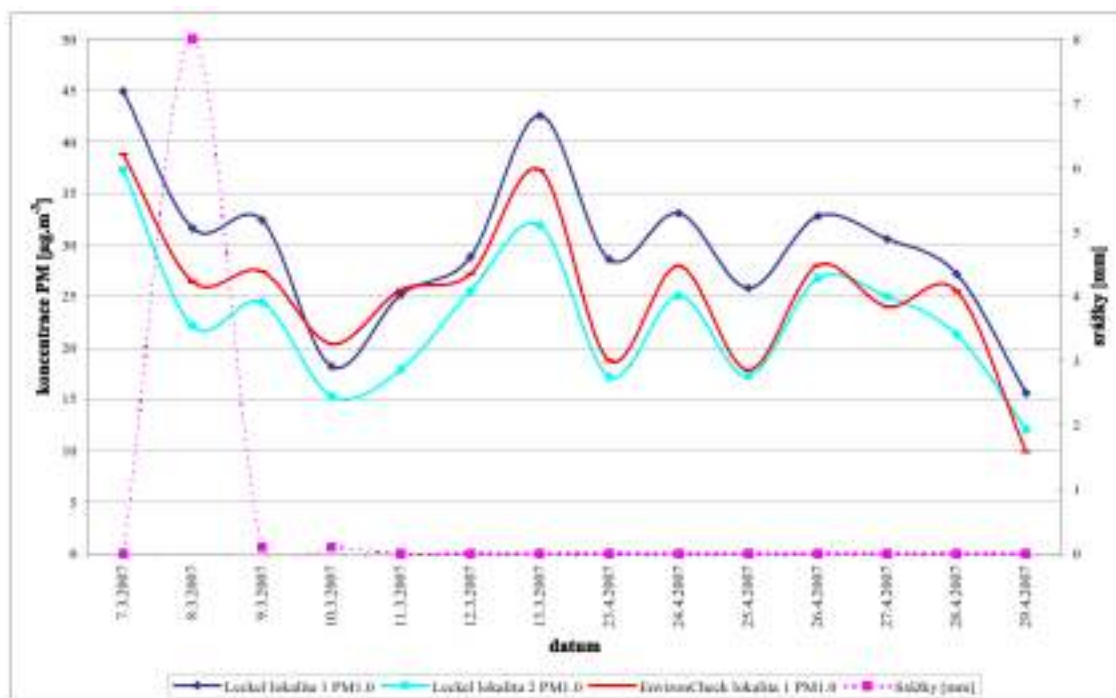


Obrázek 7– Průběh koncentrací PM<sub>10</sub> [16]

Na obrázku 8 je zachycen průběh koncentrací částic s rozměry od 1 µm do 2,5 µm a na obrázku 9 je vynesena průběh koncentrací PM<sub>1.0</sub>. Koncentrace jednotlivých frakcí PM byly vyšší na lokalitě 1, tedy v místě vyšší intenzity dopravy, pouze u frakce PM<sub>2.5</sub> byly ve třech dnech naměřeny vyšší koncentrace na lokalitě 2.



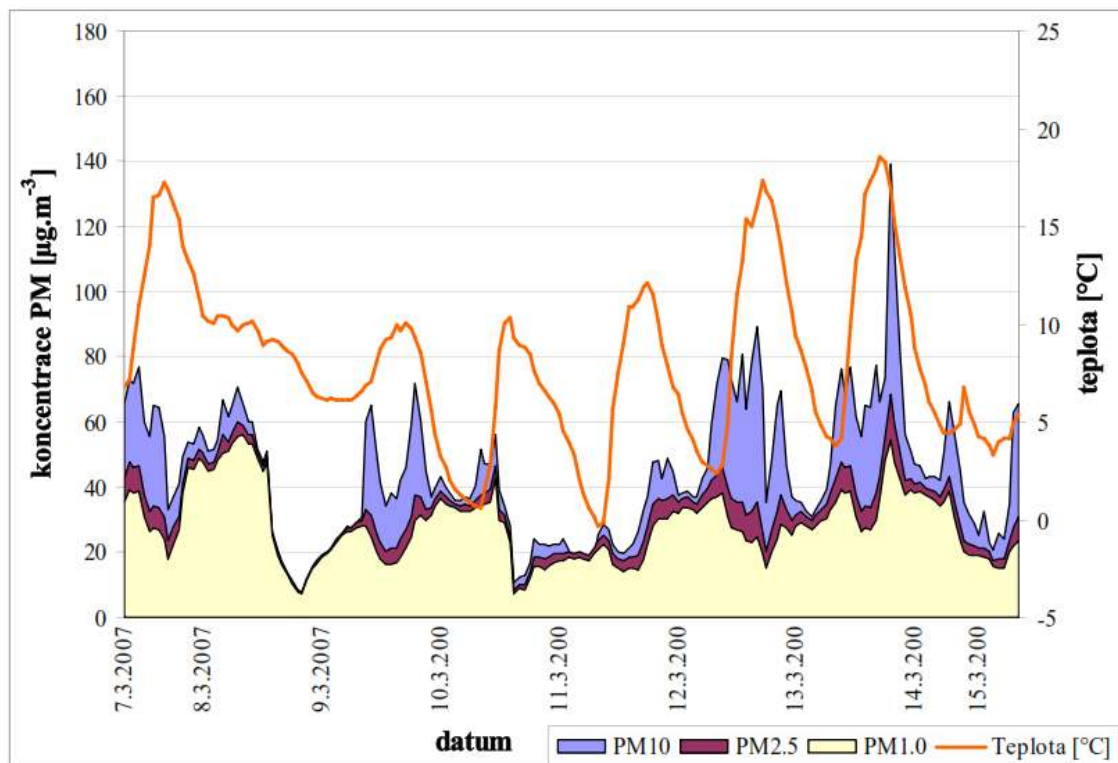
Obrázek 8 – Průběh koncentrací PM<sub>2.5</sub> na lokalitách 1 a 2 [16]



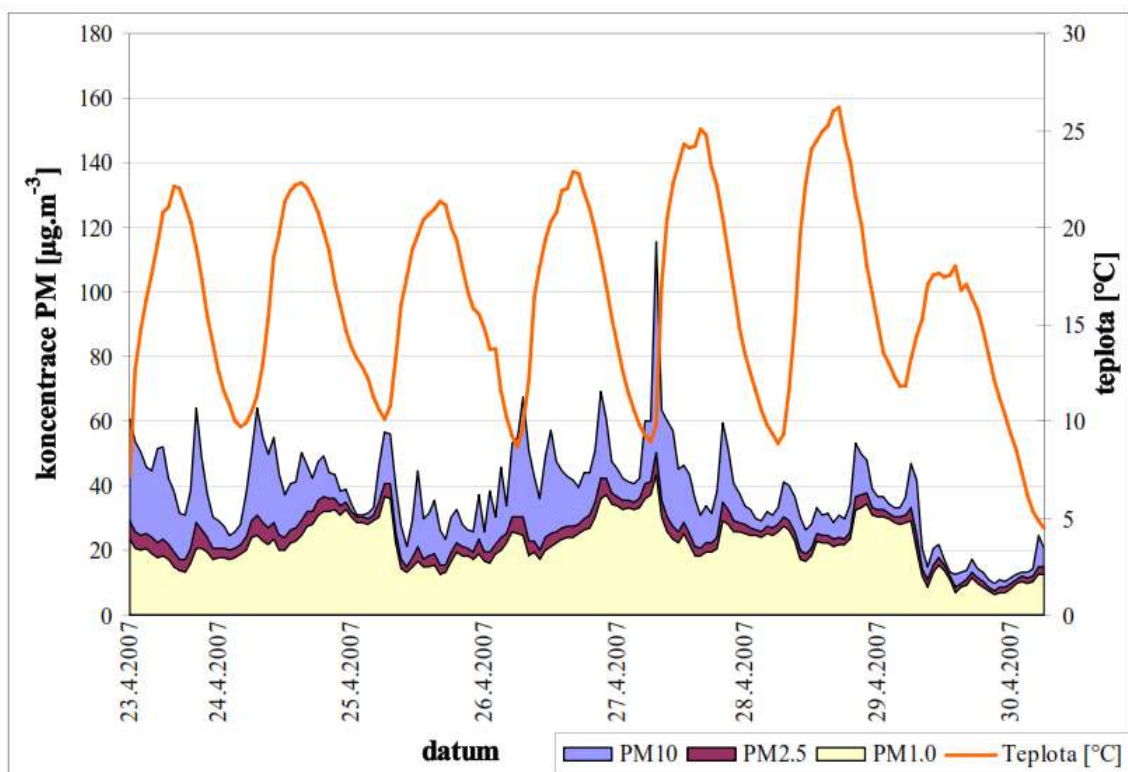
Obrázek 9 - Průběh koncentrací PM<sub>1,0</sub> na lokalitách 1 a 2 [16]

Zejména v první odběrové kampani je patrná velmi dobrá shoda při měření různými metodami na lokalitě 1. Vliv srážek na koncentrace jednotlivých frakcí PM není zcela prokazatelný, i když po strmém nárůstu množství srážek v druhý den měření následoval pokles obsahů PM v ovzduší v případě všech velikostních frakcí.

Graf na obrázku 10 znázorňuje velikostní distribuci PM v rámci březnové odběrové kampaně. Podíl jednotlivých velikostních frakcí PM pro měření v dubnu je zachycen na grafu na obrázku 11. V obou grafech je rovněž vyneseno průběh teploty při obou týdenních měřeních. Rozdíl v průměrné týdenní teplotě mezi těmito kampaněmi byl přibližně 8 °C ve prospěch dubnového měření, což může mít vliv na zastoupení jemných částic s rozměry pod 1 µm. V chladnějším období (průměrná týdenní teplota 8,1 °C) tvořily PM<sub>1,0</sub> přibližně 65 % z PM<sub>10</sub>, zatímco v dubnové kampani 58 % (průměrná týdenní teplota 16,3 °C). Vliv teploty byl prokázán již při měření v předchozích letech [16].



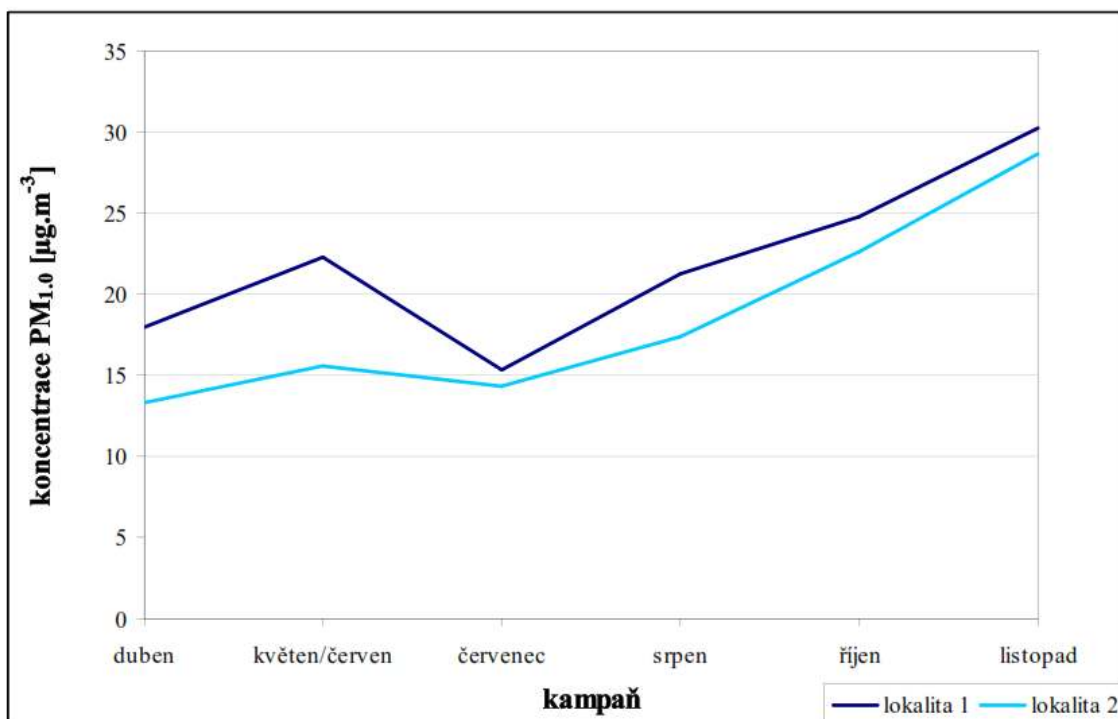
Obrázek 10 - Velikostní distribuce PM na lokalitě 1 v březnu 2007 [16]



Obrázek 11 - Velikostní distribuce PM na lokalitě 1 v dubnu 2007 [16]

Další odběry byly zaměřeny vzorky PM s rozměry pod  $1\ \mu\text{m}$ . Koncentrace těchto částic je důležitá kvůli jejich možnému průniku až do alveolárního systému dýchacích orgánů. Jak je patrné z grafu na obrázku 12, koncentrace jemné frakce PM vykazují

sezónní změny, podobně jako bylo prokázáno u částic s větším průměrem při řešení v minulých etapách projektu. Nejnižší koncentrace PM<sub>1,0</sub> byla naměřena v teplém období roku, naopak nejvyšší koncentrace na podzim v rámci listopadové odběrové kampaně.



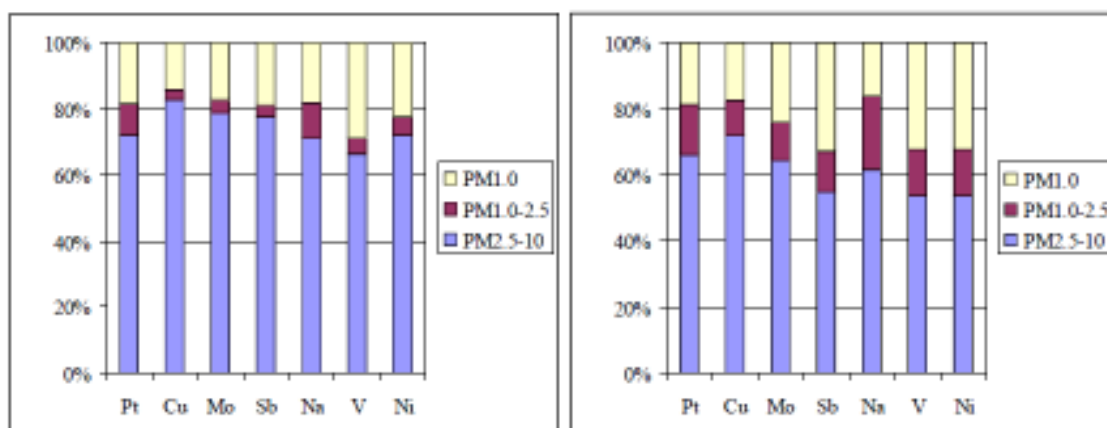
Obrázek 12 - Vývoj průměrných týdenních koncentrací PM<sub>1,0</sub> [µg.m<sup>-3</sup>] [16]

### 3.4 Distribuce vybraných prvků na PM

Na povrch PM je navázána celá řada škodlivin a ty pak vstupují do dýchacího traktu člověka. Chemické složení rovněž odráží způsob vzniku PM a jeho znalost je tedy žádoucí pro možné zjištění zdrojů, které se podílí na znečištění ovzduší. Z těchto důvodů byly ve vzorcích jednotlivých velikostních frakcí PM stanoveny koncentrace vybraných anorganických škodlivin. Z prvků byly stanoveny koncentrace Pt, Rh, Pd, které jsou součástí automobilových katalyzátorů. Dále skupina prvků zahrnujících Zn, Cu, Mn, Sn, Ni, Cr, Pb, Cd, As a Ba, které se do životního prostředí dostávají mechanickou separací z karosérií a dalších součástí silničních vozidel, případně otěry brzdového obložení (Cu a Ba). Některé prvky však mohou být součástí výfukových plynů, jelikož jsou ve stopových množstvích obsaženy v palivu jako např. Ni, V nebo Mn, jenž je přísadou v dieselových palivech [16].

V rámci prvních dvou kampaní (březen, duben) v roce 2007, byly koncentrace vybraných prvků sledovány ve všech velikostních frakcích PM, za účelem stanovení jejich distribuce. Na grafech na obrázku 13 je znázorněn podíl jednotlivých frakcí

k celkové koncentraci příslušného prvku stanovený v dubnové odběrové kampani. Graf vlevo znázorňuje distribuci prvku na lokalitě 1, graf vpravo na lokalitě 2. Jak je patrné, na lokalitě 1 jsou prvky obsaženy zejména v hrubé frakci PM. Na lokalitě 2 se na celkové koncentraci prvků nejvíce podílí rovněž hrubá frakce, ale v případě V a Ni je podíl částic s rozměry pod 2,5  $\mu\text{m}$  přibližně 47 %. Tento fakt může indikovat jejich původ ve spalovacích procesech, které produkují částice zejména jemné frakce. Překvapivý je malý podíl jemné frakce na koncentracích Pt, což je možné zdůvodnit uvolňováním tohoto prvku v čisté podobě částic s rozměry nad 2,5  $\mu\text{m}$ . Naopak příspěvek  $\text{PM}_{1,0}$  na celkové koncentraci Sb je přibližně 40 %, což může indikovat vznik jemných částic např. při obrusu brzdového obložení. Cu a Mn, jak bylo popsáno výše, vznikají zejména mechanickou separací z různých částí vozidel, a proto jsou obsaženy zejména v hrubé frakci PM stejně jako Ni, který reprezentuje zejména částice geologického původu, tedy vzniklé resuspenzí prachu deponovaného na povrchu a v okolí komunikací [16].



Obrázek 13 – Distribuce vybraných prvků ve frakci  $\text{PM}_{10}$  na lokalitě 1 (vlevo) a lokalitě 2 (vpravo) [16]

### 3.5 Hodnocení závislosti mezi rychlostí větru a koncentrací $\text{PM}_{10}$ a $\text{NO}_x$

Pro hodnocení vlivu rychlosti větru na resuspenzi částic v lokalitách města Brna byly využity dlouhodobé záznamy koncentrace  $\text{PM}_{10}$  získané ze dvou stanic automatického imisního monitoringu provozovaného ČHMU. První stanice označovaná jako Brno-střed se nachází v blízkosti křižovatky Kotlářská/Kounicova. Druhá stanice se nachází v okrajové části města, v blízkosti letiště Tuřany. Obě uvedené stanice měří koncentrace suspendovaných částic  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{NO}_x$  a další meteorologické údaje. Vlastní vyhodnocení bylo provedeno s cílem stanovit rychlosti větru, při kterých dochází k významné změně podílu resuspendovaných částic na celkové koncentraci částic

PM<sub>10</sub> v ovzduší. Za tímto účelem byla pozornost zaměřena na sledování závislosti koncentrace PM<sub>10</sub> na rychlosti větru. Tato závislost byla dále porovnána s průběhem koncentrace NO<sub>x</sub>, také vyjádřené jako funkce rychlosti větru.

Koncentrace částic PM<sub>10</sub> vyjádřená jako funkce rychlosti větru prezentuje při vyhodnocování základní vyjádření sledované veličiny. Zvyšování rychlosti proudění obecně způsobuje lepší „ředění“ emisních látek produkovaných zdroji. Z tohoto důvodu může být očekáváno snižování koncentrace PM<sub>10</sub> v ovzduší při zvyšování rychlosti větru. V případě konstantní produkce všech zdrojů, by pokles koncentrace částic měl být lineární. Významným příspěvkem nelineárnosti je proměnlivost vydatnosti emisního zdroje částic spojeného s resuspenzí dříve vypuštěných částic.

Vzájemné porovnání průběhu PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> je velmi časté při sledování koncentrací částic PM<sub>10</sub> v městské zástavbě. Koncentrace NO<sub>x</sub> souvisí převážně s aktuální produkcí spalovacích zdrojů, mezi které patří i motorová vozidla se spalovacím motorem. Koncentrace NO<sub>x</sub> tedy vypovídá o intenzitě dopravy. Porovnání průběhu koncentrace NO<sub>x</sub> s průběhem PM<sub>10</sub> umožňuje odlišit změny produkce částic související se změnou intenzity provozu na komunikacích od změn intenzity produkce ostatních zdrojů částic. Měřicí lokalita Brno-Tuřany (obrázek 14) se nachází na východním okraji města Brna. Měřicí stanice je umístěna v blízkosti místního letiště, jehož provoz, vzhledem k malému počtu odbavených letů, však průměrné dlouhodobé hodnoty naměřených koncentrací PM<sub>10</sub> významně neovlivňuje. SZ směrem ve vzdálenosti cca 1 km od stanice prochází po okraji městské zástavby rychlostní komunikace. V ostatních směrech je okolí stanice tvořeno rozsáhlými plochami hospodářsky využívané zemědělské půdy. Vyhodnoceno bylo období 1. 4. 2005 – 31. 10. 2005. Koncentrace byla sledována odděleně v období se zvýšenou intenzitou provozu, vymezeném časově 6:00 – 21:50 a období s nízkou intenzitou provozu, časově 22:00 - 5:50 [16].



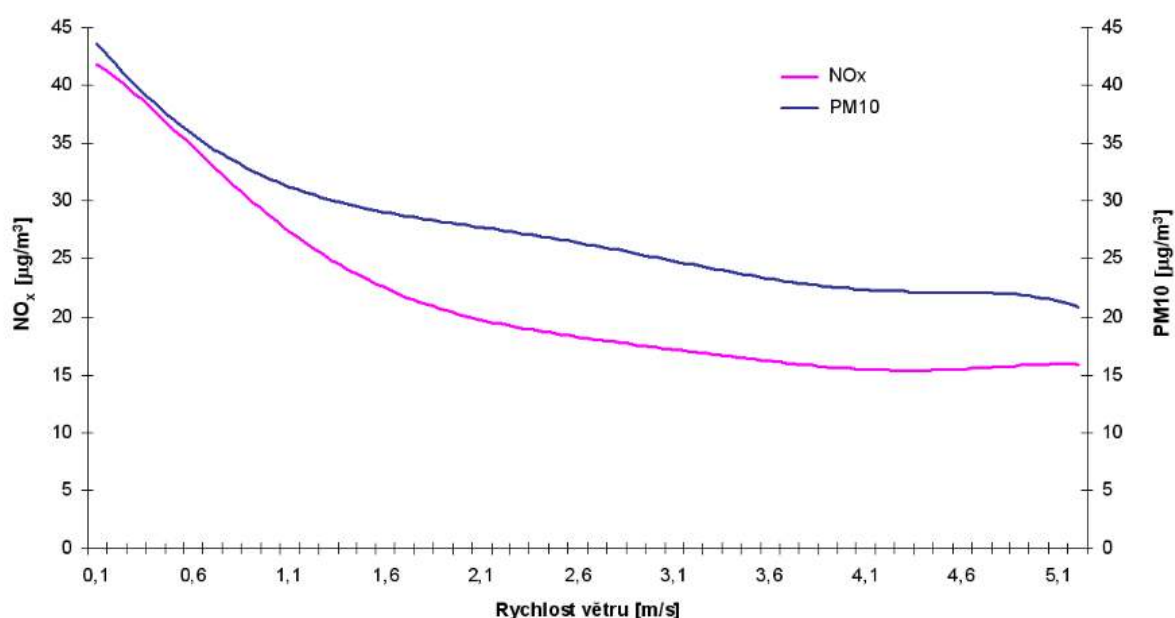
Obrázek 14 - Umístění měřicí lokality Brno - Tuřany



Obrázek 15 - Umístění měřicí lokality Brno - křižovatka Kotlářská/Kounicova

Získané závislosti průměrné koncentrace  $PM_{10}$  a  $NO_x$  za celé sledované období vyjádřené jako funkce rychlosti větru jsou uvedeny na obrázku 16. Průběh obou závislostí vykazuje dva patrné zlomy. První zlom se objevuje při rychlosti větru blízké 1 m/s a druhý při rychlosti větru přibližně 4 m/s. Při nízké rychlosti větru (cca 1 m/s), zlom průběhu koncentrace  $PM_{10}$  významně předchází zlomu průběhu koncentrace  $NO_x$ .

Tato skutečnost naznačuje, že musí existovat i jiné zdroje PM<sub>10</sub>, které nesouvisí s dopravou. Pozvolnější klesání závislosti PM<sub>10</sub> za prvním zlomem vypovídá o zvyšující se emisi částic PM<sub>10</sub> s rostoucí rychlostí větru. Druhý zlom průběhu koncentrací NO<sub>x</sub> a PM<sub>10</sub> (cca 4 m/s) je pozorován při stejné rychlosti větru, což prokazuje přímou souvislost produkce NO<sub>x</sub>. Detailním porovnáním trendů obou sledovaných závislostí byla stanovena rychlost větru odpovídající významné produkci „nedopravních“ částic PM<sub>10</sub>, 1,2 m/s. Hodnota byla graficky získána v průsečíku lineárního prodloužení úseků před prvním a za druhým zlomem průběhu prezentované závislosti PM<sub>10</sub>. Tato rychlost větru je dále považována za mezní rychlost resuspenze v lokalitě Tuřany. Při rychlosti větru vyšší než 4 m/s je resuspenze částic PM<sub>10</sub> minimální, většina částic byla větrem stržena při nižších rychlostech větru [16].

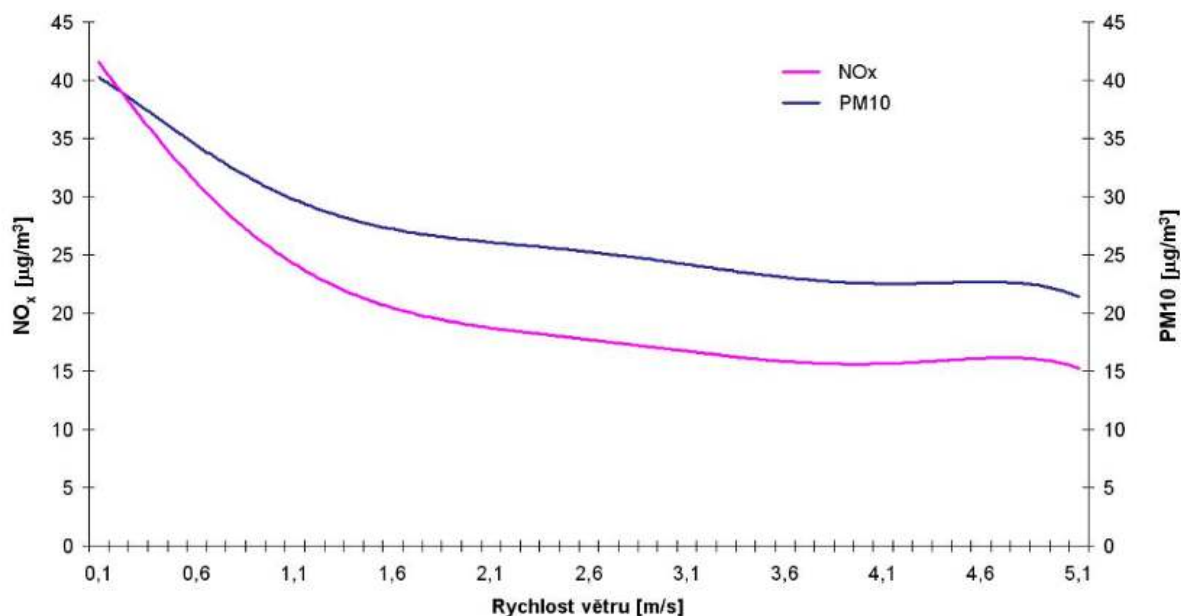


Obrázek 16 - Porovnání závislostí koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Tuřany [16]

Průběh sledovaných závislostí pro období s významnou intenzitou provozu – obrázek 17, vykazuje pouze jeden výrazný zlom průběhu pro NO<sub>x</sub> i PM<sub>10</sub>, při hodnotě rychlosti větru cca 1,2 m/s. Pokles koncentrací obou sledovaných znečišťujících složek je za tímto zlomem velice mírný a obě závislosti vykazují podobný trend. To je pravděpodobně způsobeno výraznou převahou produkce znečišťujících látek souvisejících s lidskou činností nad resuspenzí větrem [16]. Koncentrace PM<sub>10</sub> jsou až do rychlosti větru 3,5 m/s nižší než v období s nízkou intenzitou provozu. Tato skutečnost je nejpravděpodobněji zapříčiněna obecně lepšími rozptylovými

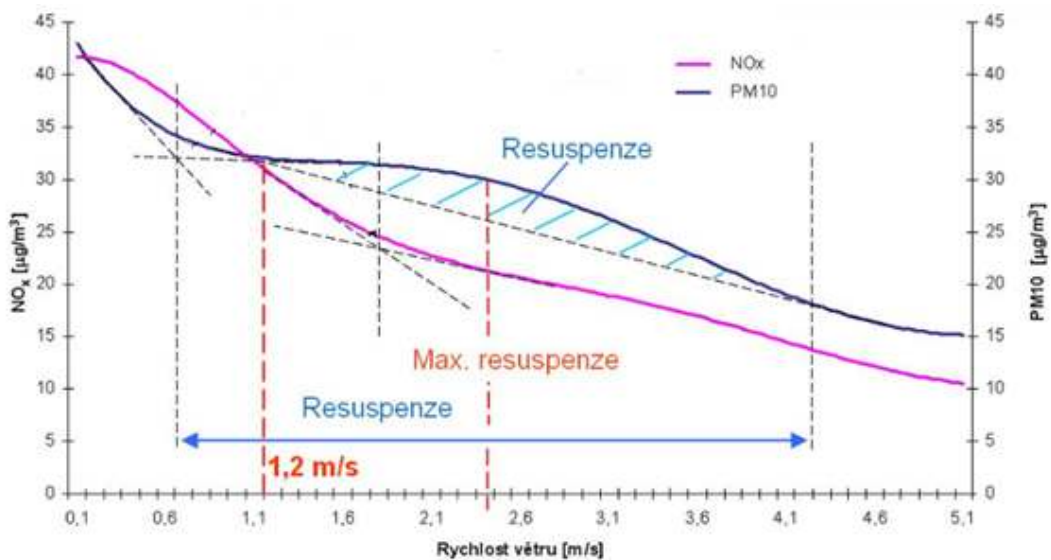


podmínkami v odpoledních hodinách, intenzivnějším pohybem automobilů na komunikaci a nižší relativní vlhkostí v teplejším období dne.



Obrázek 17 - Srovnání závislostí koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Tuřany, období s významnou intenzitou provozu [16]

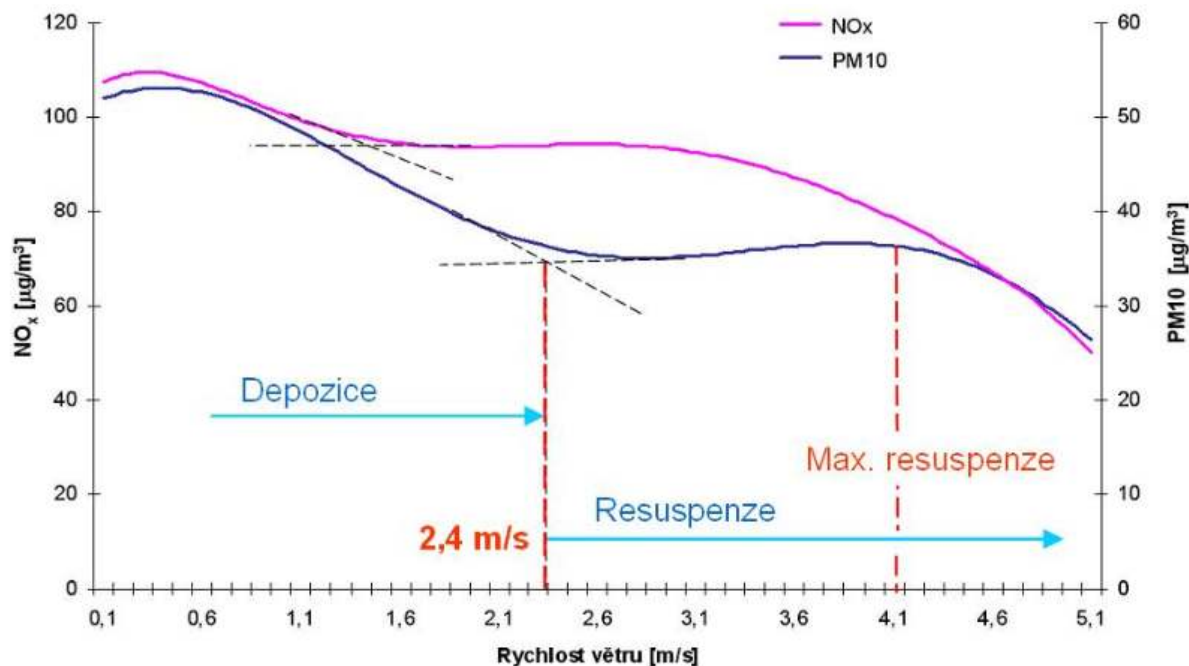
Průběh závislosti koncentrace PM<sub>10</sub> pro období s nízkou intenzitou provozu (noc) – obrázek 18, vykazuje nejvíce rozkolísaný charakter. První výrazný zlom průběhu závislosti PM<sub>10</sub> je pozorována při rychlosti větru 0,8 m/s, od této, do hodnoty do rychlosti větru 2,5 m/s je koncentrace PM<sub>10</sub> téměř konstantní, což může nastat pouze při intenzivním nárůstu produkce částic nesouvisející s dopravou. To potvrzuje i poloha zlomu na závislosti NO<sub>x</sub>, která je výrazně posunuta za zlom průběhu PM<sub>10</sub>. Ve shodě s předchozím byla určena rychlost větru způsobující významnou produkci resuspenze blízká 1,2 m/s. Trend obou sledovaných závislostí je shodný pro rychlosti větru větší než 4 m/s, kdy je vliv resuspenze minimální [16].



Obrázek 18 - Ukázka grafického vyhodnocení závislosti koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Tuřany, období s nízkou intenzitou provozu [16]

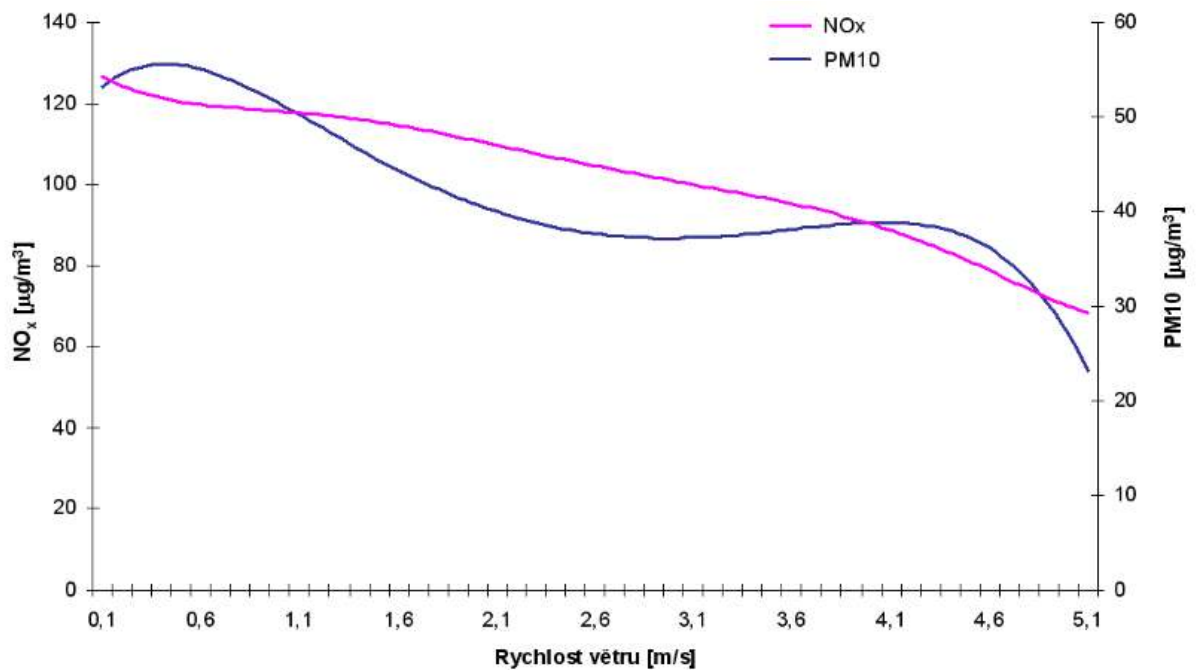
Další lokalitou s dostupnými daty koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> byla křižovatka Kotlářská/Kounicova (obrázek 15). Tato křižovatka je součástí městského dopravního okruhu a nachází se v centrální části města Brna. Uzavřena je ze tří čtvrtin okolní zástavbou. Poslední čtvrtina je tvořena parkovým prostranstvím s osamělými budovami. V blízkosti křižovatky se nachází kontejner AIM, který zaznamenává základní meteorologická data včetně koncentrací PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub>. Vyhodnocována byla data zaznamenaná v období 1.1. - 31.12.2005, odděleně koncentrace v období se zvýšenou intenzitou provozu, vymezeném časově 6:00 – 21:50 a období s nízkou intenzitou provozu 22:00-5:50. Získané závislosti průměrné koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> za celé sledované období, vyjádřené jako funkce rychlosti větru jsou uvedeny na obrázku 19. Důvod nárůstu koncentrace PM<sub>10</sub> při přechodu z nulové rychlosti větru na rychlost 0,5 m/s není zatím uspokojivě objasněn, vzhledem k velmi malým rychlostem větru nesouvisí s resuspenzí částic. Důležitá je ale následující část klesající závislosti. Až do rychlosti větru cca 2,4 m/s je pokles téměř lineární a odpovídá ideálnímu „ředění“ proudícím vzduchem. Následuje změna trendu sledované závislosti, která přechází do mírného stoupání. Tato změna je pravděpodobně spojena právě s nástupem intenzivní resuspenze. Mírně rostoucí trend závislosti koncentrace PM<sub>10</sub> je zakončen druhým zlomem při rychlosti větru cca 4,3 m/s. Pro větší rychlosti je resuspenze již zanedbatelným příspěvkem v celkové koncentraci znečištění ovzduší. Z uvedených závislostí byla mezní rychlost resuspenze stanovena 2,4 m/s [16]. Hodnota byla graficky získána v průsečíku prodloužení lineárního úseku poklesu koncentrace PM<sub>10</sub> před

zlomem závislosti při rychlosti větru 2,4 m/s a lineární části rostoucí závislosti za tímto zlomem.



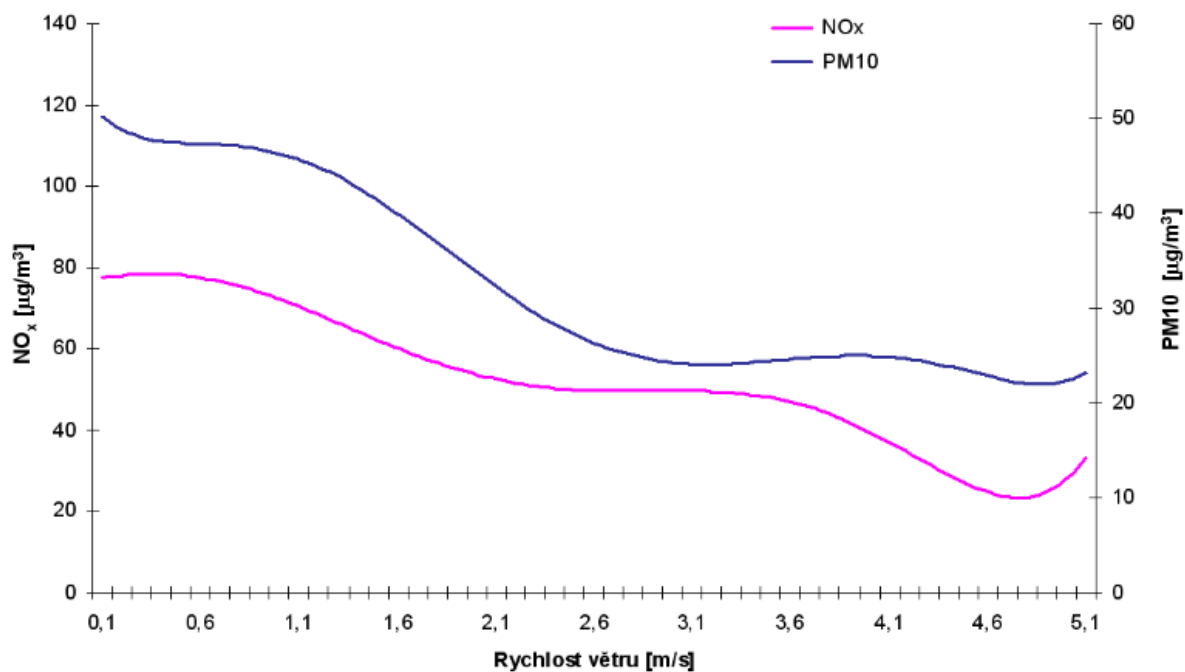
Obrázek 19 - Vyhodnocení závislostí koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> – Kotlářská/Kounicova [16]

Závislost koncentrace PM<sub>10</sub> získaná z hodnot v období vysoké intenzity provozu – obrázek 20 potvrzuje trend z celodenních hodnot. K významné změně trendu závislosti koncentrace PM<sub>10</sub> dochází při rychlosti větr u 2,2 m/s. S dalším nárůstem rychlosti větru dochází k výraznějšímu nárůstu koncentrace PM<sub>10</sub>, což je důsledek příspěvku resuspenze dříve vypuštěných částic. Nárůst koncentrace PM<sub>10</sub> je patrný až do hodnoty rychlosti větru 4,3 m/s, již dříve označené jako rychlost omezující významný vliv resuspenze částic. Vzhledem k téměř lineárnímu poklesu koncentrace NO<sub>x</sub> v celém rozsahu sledovaných rychlostí větru, je možné uvedené závislosti koncentrace PM<sub>10</sub> považovat vzhledem k průkaznosti příspěvku resuspenze za značně významné [16].



Obrázek 20 - Srovnání závislosti koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Kotlářská, období s významnou intenzitou provozu [16]

Průběh koncentrace PM<sub>10</sub> v období s nízkou intenzitou provozu – obrázek 21 vykazuje v tomto případě trend obdobný s předešlými grafy, a nejsou zde žádné výrazné odchylky. Z průběhu sledované závislosti je možno určit rychlost větru při změně trendu závislosti PM<sub>10</sub> z klesající na rostoucí, 2,7 m/s. Tato hodnota je mírně vyšší, než bylo stanoveno pro období s vysokou hustotou provozu. I v nočních hodinách je patrný nárůst koncentrace PM<sub>10</sub> se zvyšující se rychlostí větru při překročení 2,7 m/s [16].



Obrázek 21 - Srovnání závislostí koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Kotlářská, období s nízkou intenzitou provozu [16]

## 4 Praktická část

Pro zjištění vlivu meteorologických podmínek na koncentrace znečišťujících látek a tím na zhoršování kvality ovzduší v okolí dopravních zdrojů byl použit program QC – Expert 2.5, modul lineární regrese.

Data byla za poplatek získána od Českého hydrometeorologického ústavu Praha (ČHMÚ). Poplatek 3.000 Kč byl uhrazen z prostředků Institutu Jana Pernera, o. p. s., Regionální středisko Česká Třebová.

Jednalo se o hodinové koncentrace  $PM_{10}$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ , směru a rychlosti větru, teploty, intenzity slunečního záření, relativní vlhkosti a množství srážek za období 5. - 11. 6. 2010 a 8. - 14. 1. 2011. Na stanici v lokalitě Praha 5 – Smíchov (obrázek 22).



Obrázek 22 – Měřící lokalita Praha 5 – Smíchov [19]

### 4.1 QC – Expert

Interaktivní statistický systém pro analýzu dat off-line. Je určen pro všechna pracoviště, kde je třeba vyhodnocovat provozní, laboratorní, nebo ekonomická data. Software obsahuje pečlivě vybrané statistické metody vyžadované jak normami a předpisy ISO 9000, 14000, QS 9000, VDA 6.x a metodikami TQM, tak i praktickými specifickými potřebami, které jmenovanými normami obvykle nejsou řešeny. Tento software je součástí komplexní metodiky zpracování dat. Použité statistické techniky jsou zvoleny tak, aby pokryly celou problematiku ve standardních situacích i při

porušení základních předpokladů o datech, jako je normalita, homogenita, nebo nezávislost [18].

QC – Expert obsahuje Statistické moduly, jako jsou:

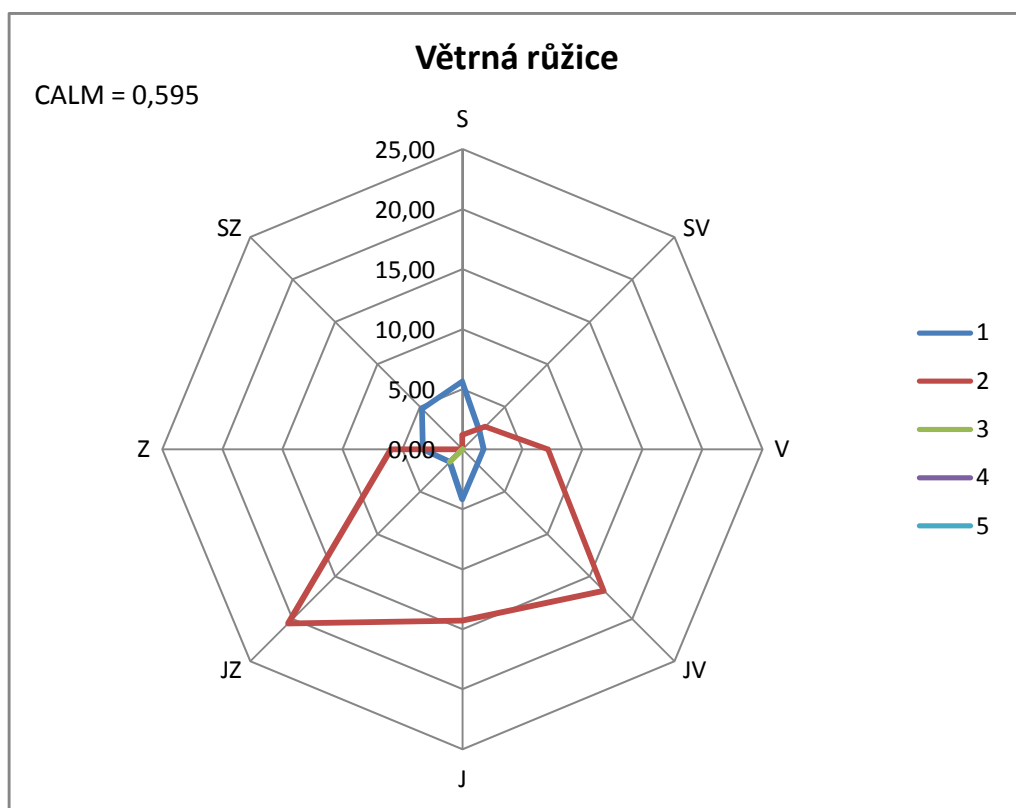
- Porovnání 2 výběrů
- Pravděpodobnostní modely
- Transformace dat
- Statistické testování
- Kontingenční tabulky
- Simulace
- Vícerozměrná analýza
- Lineární regrese
- Nelineární regrese
- Neuronové sítě
- Paretova analýza
- Statistická přejímka porovnáním, a další [18].

## 4.2 Větrná růžice

Větrná růžice pro lokalitu Praha 5 – Smíchov byla vypočtena z hodinových průměrů směrů a rychlostí větru. V tabulce 4 je procentuální zastoupení směrů a rychlostí větru za dobu měření. Z obrázku 23 je patrné, že převládající směr větru byl z jižních směrů (JZ, J a JV) s intenzitou 2 (rychlost větru 0,5-7,5 m/s<sup>2</sup>).

Tabulka 4 – Průměrná větrná růžice za celou dobu měření

rychlost větru	síla větru	S	SV	V	JV	J	JZ	Z	SZ	calm
m/s		%								
0,00	0,50	1	5,65	2,08	1,79	1,79	4,17	1,49	3,27	4,76
0,50	2,50	2	1,19	2,68	7,14	16,67	14,29	20,54	5,95	0,00
2,50	7,50	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	0,00	0,00
7,50	10,00	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
> 10		5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00										0,60

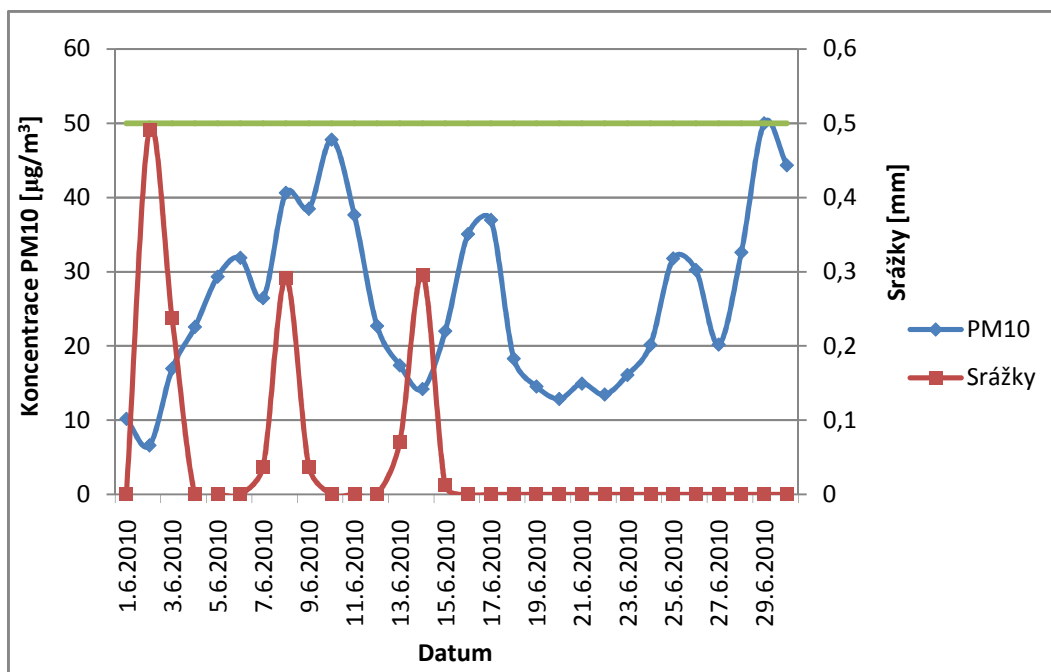


Obrázek 23 – Grafické znázornění větrné růžice

### 4.3 Koncentrace $PM_{10}$

Průběh koncentrací  $PM_{10}$  za měsíc červen 2010 ze stanice v Praze 5 – Smíchov je uveden na obrázku 24. V grafu je vyneseno i průběh srážek za daný měsíc. Zelenou přímkou je zobrazen imisní limit  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  stanovený v nařízení vlády 597/2006 Sb. Jak je z grafu patrné za celý měsíc tento limit nebyl překročen. Vliv srážek na koncentrace  $PM_{10}$  není, stejně jako u výzkumu CDV (kapitola 3.3), zcela prokazatelný, i když po nárůstu množství srážek většinou druhý den měření následoval pokles obsahu  $PM_{10}$  v ovzduší.

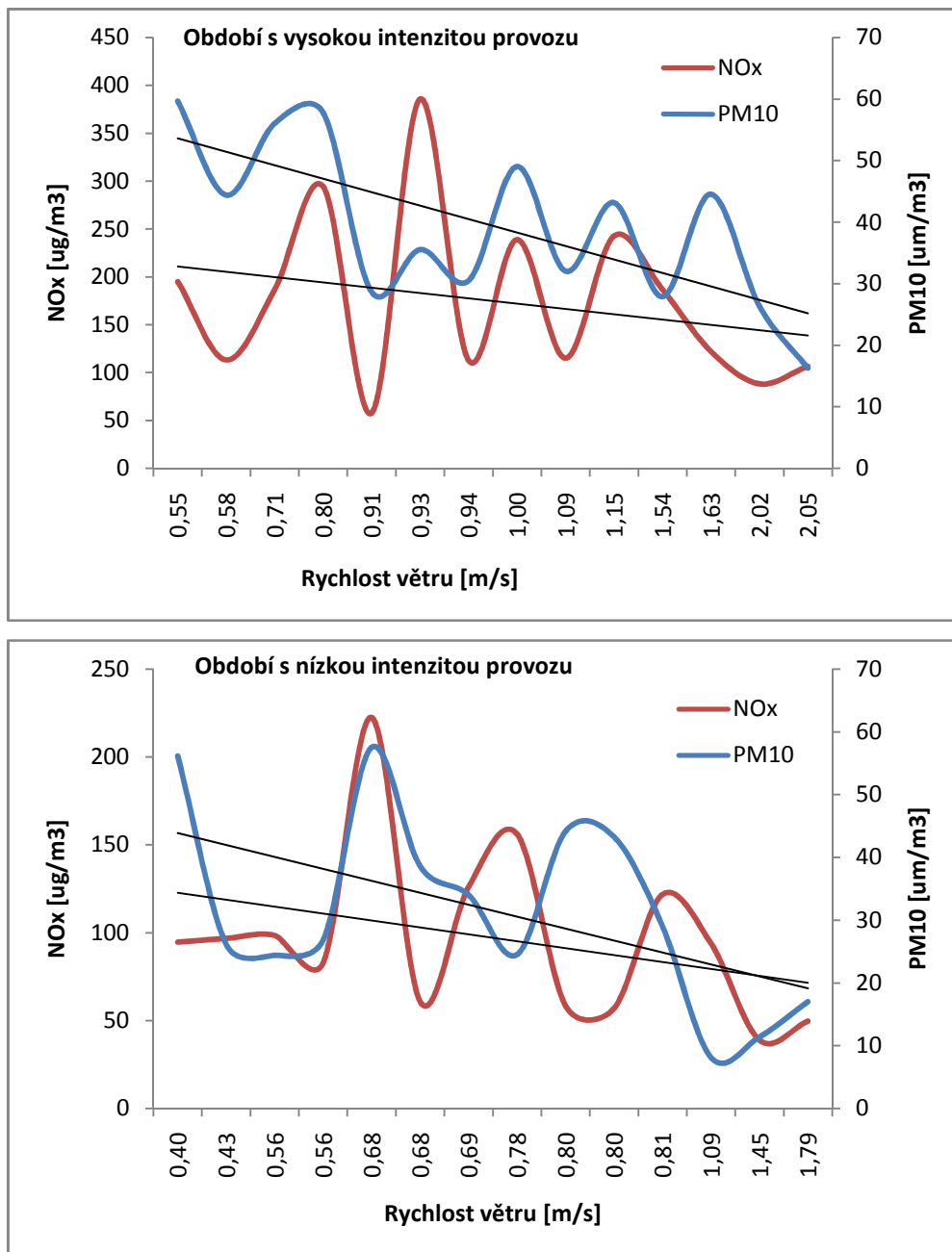




Obrázek 24 – Průběh koncentrací PM<sub>10</sub> v lokalitě Praha 5 - Smíchov

#### 4.4 Hodnocení závislosti rychlosti větru a koncentrací PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub>

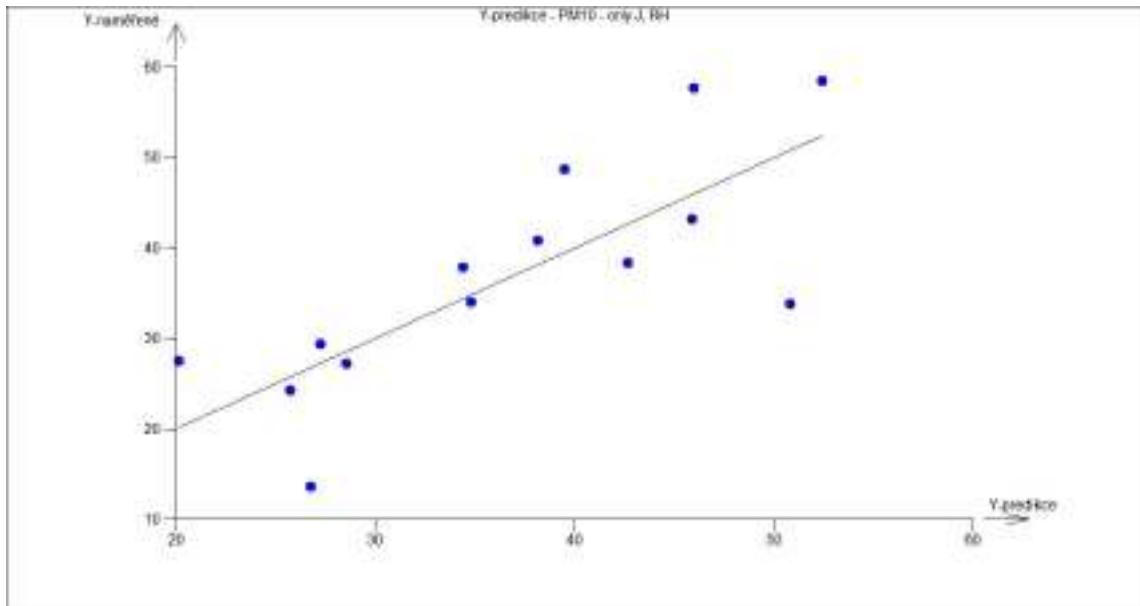
Zvyšování rychlosti proudění obecně způsobuje lepší ředění emisních látek. Z tohoto důvodu je očekáváno snižování koncentrace PM<sub>10</sub> v ovzduší při vyšší rychlosti větru. Pro toto hodnocení byla použita hodinová data za období 5. - 11. 6. 2010 a 8. - 14. 1. 2011 na stanici v lokalitě Praha 5 – Smíchov. Data byla stejně jako u výzkumu prováděného CDV rozdělena na období se zvýšenou intenzitou provozu 6:00 – 21:50 a období s nízkou intenzitou provozu 22:00-5:50. Z grafů na obrázku 25 je vidět, že předpoklad snižování koncentrace s vyšší rychlostí větru je správný. Z důvodu nedostatku dat, způsobeného nedostatečnou délkou měření (pouze dva týdny) a velkého odstavu měření od sebe (půl roku), nelze provést bližší hodnocení vlivu rychlosti větru na koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub>.



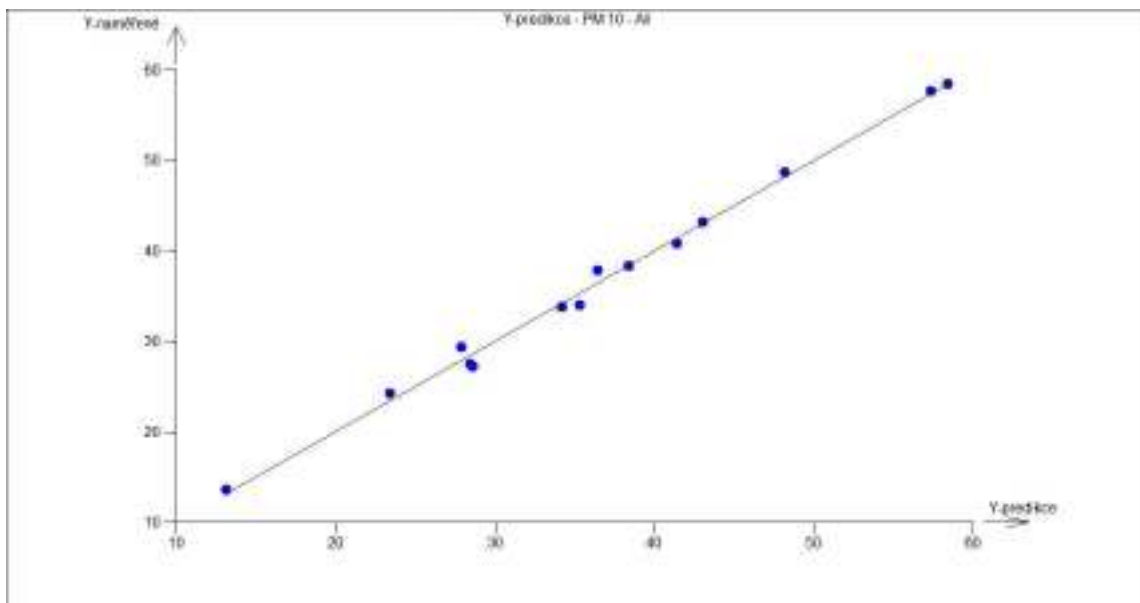
Obrázek 25 - Porovnání závislostí koncentrace PM<sub>10</sub> a NO<sub>x</sub> na rychlosti větru pro období s vysokou intenzitou provozu (nahore) a s nízkou intenzitou (dole)

#### 4.5 Vliv meteorologických podmínek na PM<sub>10</sub>

Byly hledány meteorologické podmínky (vstupní nezávisle proměnné podmínky), které mají vliv na šíření PM<sub>10</sub> (vstupní závislá proměnná) [23]. Úvodní výpočet byl proveden pro všechny meteorologické podmínky (viz. úvod praktické části). Pro porovnání je na obrázku 26 znázorněn graf Y - predikce pro jednoduchou lineární regresi koncentrací PM<sub>10</sub> a hodnot J (jižní směr větru) a RH (relativní vlhkost), na obrázku 27 graf Y - predikce se zahrnutím všech podmínek.



Obrázek 26 – Jednoduchá lineární regrese  $PM_{10}$  a J, RH



Obrázek 27 – Lineární regrese  $PM_{10}$  a všech meteorologických podmínek

Z obou obrázků vyplývá oprávněnost použití vícerozměrné regrese pro konstrukci modelu popisujícího závislost koncentrací  $PM_{10}$  na meteorologických podmínkách.

Podmínky výpočtu:

Hladina významnosti :	0,05
Absolutní člen :	Ano
Počet platných řádků :	14
Počet parametrů :	13
Metoda :	Nejmenší čtverce

#### Odhady parametrů:

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	339,4852692	118,6877	Nevýznamný	0,214113059	-1168,58	1847,555
SV	-2,582929827	1,490743	Nevýznamný	0,333238709	-21,5246	16,35876
V	-1,878903672	1,390949	Nevýznamný	0,405694184	-19,5526	15,79478
JV	-0,988539011	1,425466	Nevýznamný	0,613991924	-19,1008	17,12372
J	-1,643841802	1,651312	Nevýznamný	0,501443287	-22,6258	19,33807
JZ	-1,697291909	1,454932	Nevýznamný	0,451149299	-20,184	16,78937
Z	1,553908021	1,66824	Nevýznamný	0,522579873	-19,6431	22,75091
SZ	-3,047702759	1,389209	Nevýznamný	0,272272571	-20,6993	14,60387
S	-0,744745058	1,610856	Nevýznamný	0,724306007	-21,2126	19,72312
T	-1,515934053	0,767191	Nevýznamný	0,298258673	-11,264	8,232155
IS	0,212771442	0,063531	Nevýznamný	0,184722166	-0,59447	1,020009
RH	2,854802421	0,527727	Nevýznamný	0,116369322	-3,85061	9,560213
RAIN	-1,865802834	2,029204	Nevýznamný	0,526691403	-27,6493	23,91767

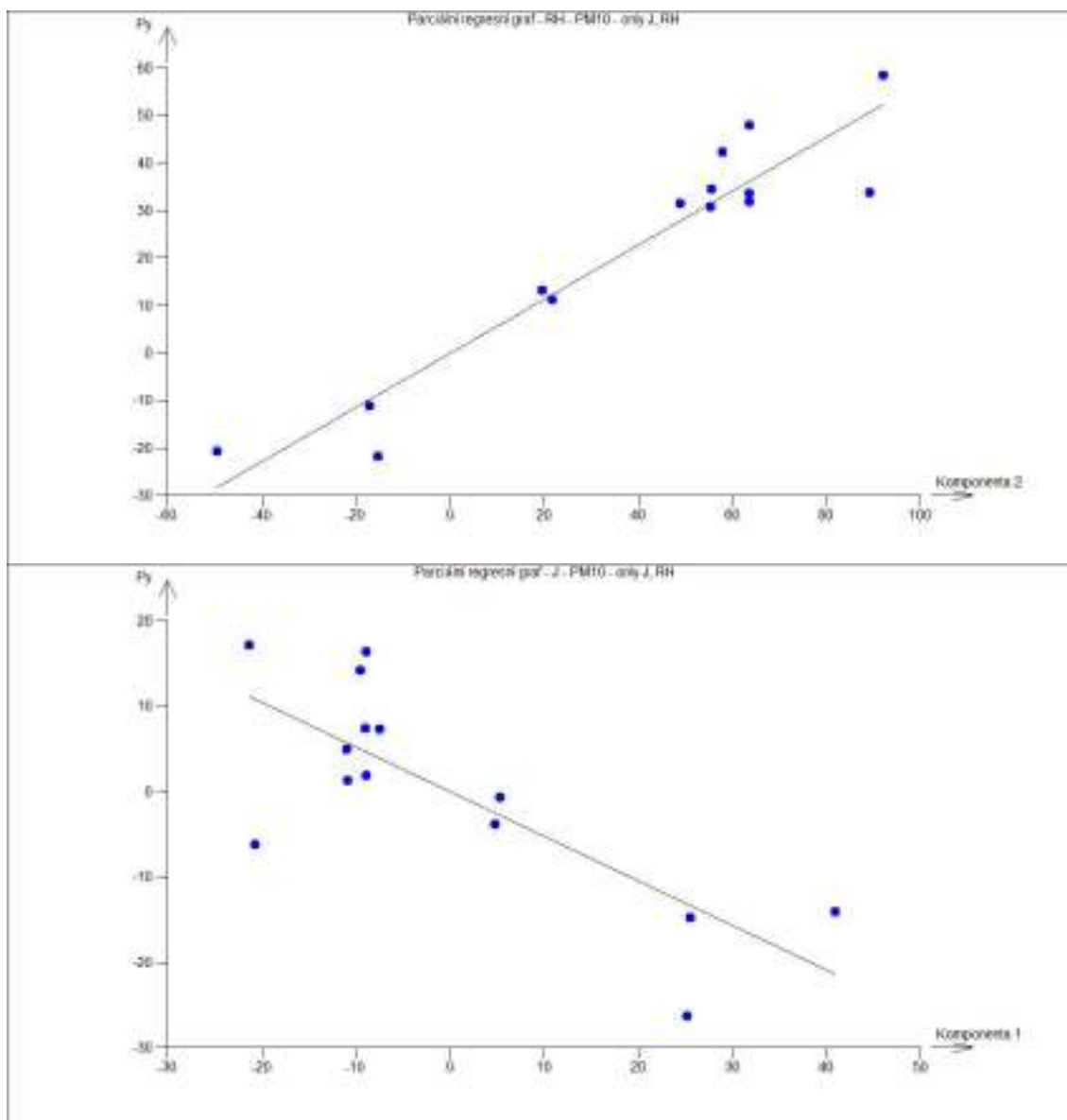
Všechny parametry v tomto případě vyšly nevýznamné. Jejich počet byl tedy postupně snižován odebráním nejméně významných proměnných (s nejvyšší pravděpodobností) [24]. Tímto postupem byl nalezen model, který obsahuje pouze dvě nezávisle proměnné: J a RH.

#### Podmínky výpočtu:

Hladina významnosti :	0,05
Absolutní člen :	Ne
Počet platných řádků :	14
Počet parametrů :	2
Metoda :	Nejmenší čtverce

#### Odhady parametrů:

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodob.	Spodní mez	Horní mez
J	-0,522457044	0,123549	Významný	0,001170597	-0,79165	-0,25327
RH	0,569884391	0,039476	Významný	6,02E-09	0,483874	0,655895



Obrázek 28 – parciální regresní grafy pro RH a J

Oba parciální grafy ukazují na lineární model.

Statistické charakteristiky regrese:

Vícenásobný korelační koeficient R :	0,77236339
Koeficient determinace $R^2$ :	0,596545207
Predikovaný korelační koeficient $R_p$ :	0,135294665
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	92,82423449
Akaikeho informační kritérium :	61,14246619

Testování regresního tripletu:

Fisher-Snedecorův test významnosti modelu:

Hodnota kritéria F :	17,74310926
Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m) :	4,747225347
Pravděpodobnost :	0,001205362

Závěr : Model je významný

Scottovo kritérium multikolinearity:

Hodnota kritéria SC : -0,843084291

Závěr : Model je korektní.

Cook-Weisbergův test heteroskedasticity:

Hodnota kritéria CW : 1,026313138

Kvantil  $\chi^2(1-\alpha,1)$  : 3,841458829

Pravděpodobnost : 0,311026181

Závěr : Rezidua vykazují homoskedasticitu.

Jarque-Berrův test normality:

Hodnota kritéria JB : 1,075454224

Kvantil  $\chi^2(1-\alpha,2)$  : 5,991464547

Pravděpodobnost : 0,58407428

Závěr : Rezidua mají normální rozdělení.

Waldův test autokorelace:

Hodnota kritéria WA : 0,353142974

Kvantil  $\chi^2(1-\alpha,1)$  : 3,841458829

Pravděpodobnost : 0,552339338

Závěr : Autokorelace je nevýznamná

Durbin-Watsonův test autokorelace:

Hodnota kritéria DW : -1

Kritické hodnoty DW : 0

Závěr : Negativní autokorelace reziduí není prokázána.

Znaménkový test reziduí

Hodnota kritéria Sg : 0,83452296

Kvantil  $N(1-\alpha/2)$  : 1,959963999

Pravděpodobnost : 0,403986355

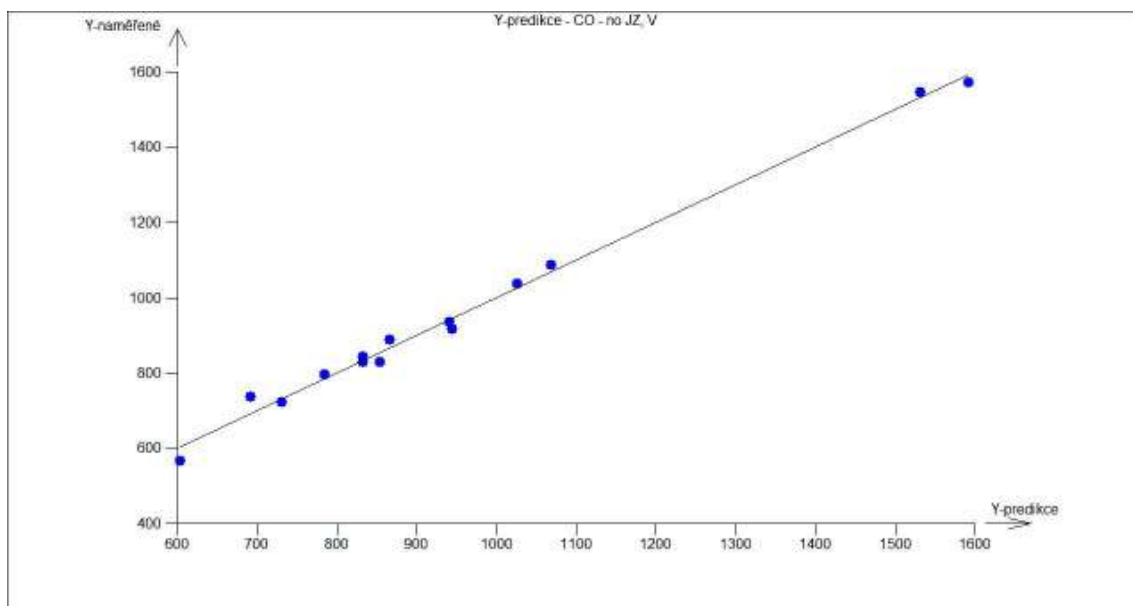
Závěr : V reziduích není trend.

Výsledky testování jsou vyhovující, proto lze tento model považovat za vhodný. Jako významné parametry na koncentraci  $PM_{10}$  byly určeny:

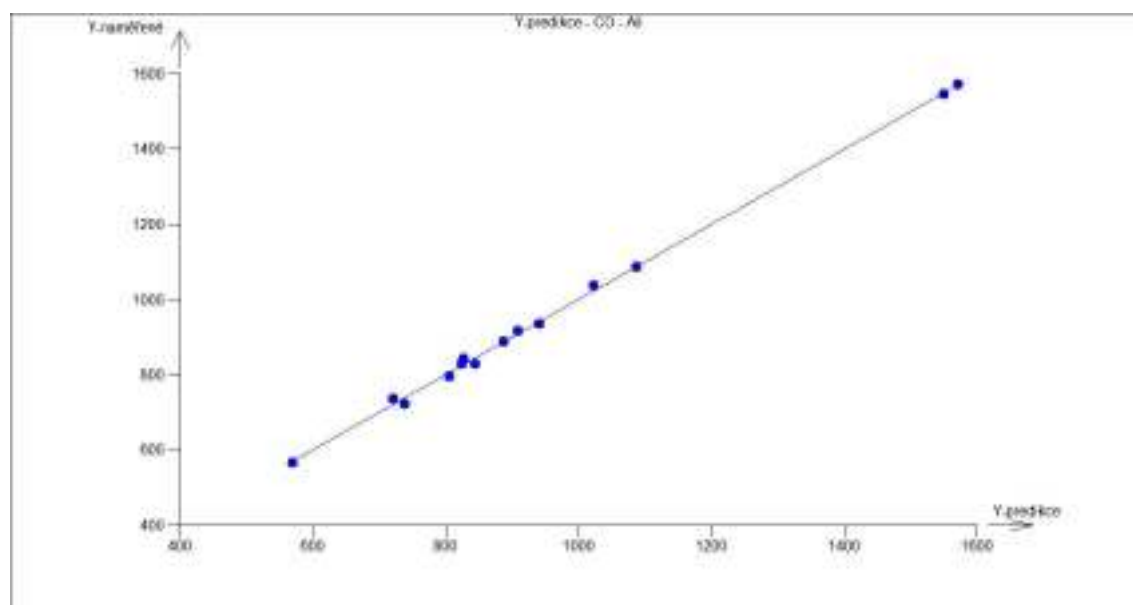
- J (jižní směr větru) - směr od vjezdů a výjezdů Strahovského tunelu a tunelu Mrázovka,  $PM_{10}$  z tohoto směru patrně nevystoupají nad úroveň vjezdu do tunelu
- RH (relativní vlhkost) - vyjadřuje zvyšování koncentrace  $PM_{10}$  se stoupající vlhkostí.

## 4.6 Vliv meteorologických podmínek na CO

Byly hledány meteorologické podmínky (vstupní nezávisle proměnné podmínky), které mají vliv na šíření CO (vstupní závislá proměnná). Úvodní výpočet byl proveden pro všechny meteorologické podmínky. Pro porovnání je na obrázku 29 uveden graf Y - predikce pro jednoduchou lineární regresi koncentrací CO a hodnot meteorologických podmínek vyjma JZ a V, na obrázku 30 graf Y - predikce se zahrnutím všech podmínek.



Obrázek 29 – Jednoduchá lineární regrese CO a meteorologických podmínek vyjma JZ a V



Obrázek 30 – Lineární regrese CO a všech meteorologických podmínek

Postupným snižováním nejméně významných parametrů byl nalezen model, který obsahuje proměnné: Abs, SV, JV, J, Z, SZ, S, T, IS, RH, RAIN.

Podmínky výpočtu:

Hladina významnosti :	0,05
Absolutní člen :	Ano
Počet platných řádků :	14
Počet parametrů :	11
Metoda :	Nejmenší čtverce

Odhady parametrů:

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	17549,53889	1766,304	Významný	0,002169	11928,37	23170,71
SV	-31,22063489	4,692497	Významný	0,00692	-46,1543	-16,287
JV	11,42381351	2,319119	Významný	0,016034	4,043343	18,80428
J	17,34340618	4,03166	Významný	0,023114	4,512865	30,17395
Z	71,72546239	9,046707	Významný	0,004184	42,9348	100,5161
SZ	-28,50536054	2,98482	Významný	0,002435	-38,0044	-19,0063
S	29,53801635	4,252675	Významný	0,006121	16,00411	43,07193
T	-82,46384037	7,904518	Významný	0,00188	-107,62	-57,3081
IS	6,720911393	0,773675	Významný	0,00321	4,258732	9,18309
RH	61,17357396	7,460685	Významný	0,003796	37,43034	84,9168
RAIN	-124,4950536	23,61048	Významný	0,013298	-199,634	-49,356

Parciální grafy (příloha 1, obrázek P1) ukazují na lineární model.

Statistické charakteristiky regrese:

Vícenásobný korelační koeficient R:	0,996758693
Koeficient determinace R <sup>2</sup> :	0,993527892
Predikovaný korelační koeficient R <sub>p</sub> :	0,679369787
Střední kvadratická chyba predikce MEP:	13613,67907
Akaikeho informační kritérium:	109,0408927

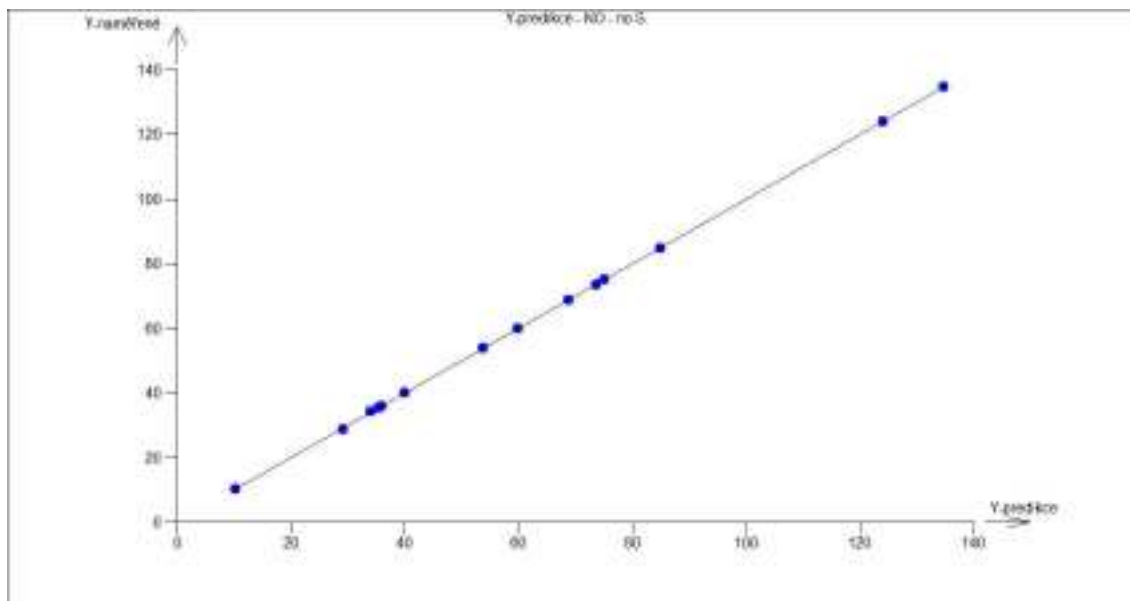
Výsledky testování (příloha 1, tabulka P1) jsou vyhovující, proto lze tento model považovat za vhodný. Model můžeme označit za vhodný. Významné parametry jsou všechny vyjma JZ a V. Rostoucí hodnoty SV, SZ, T a RAIN snižují koncentrace CO a JV, J, Z, S, IS a RH přispívají ke zvyšování koncentrace CO v ovzduší. Lze předpokládat, že se uplatňují různou měrou zdroje CO z různých směrů, vyjma JZ a V.

#### **4.7 Vliv meteorologických podmínek na NO**

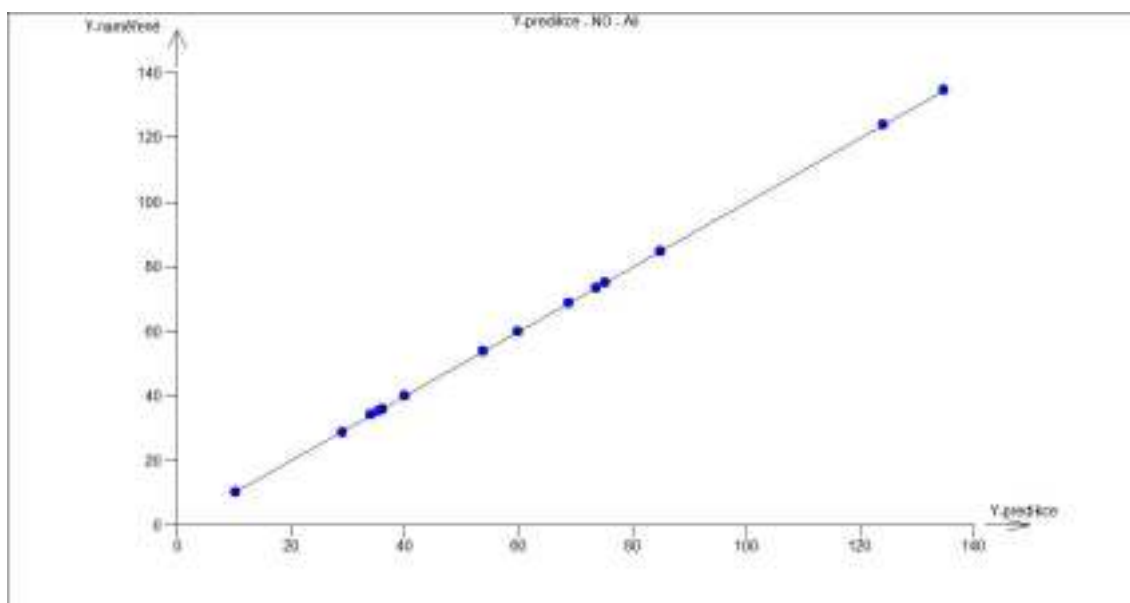
Byly hledány meteorologické podmínky (vstupní nezávisle proměnné podmínky), které mají vliv na šíření NO (vstupní závislá proměnná). Úvodní výpočet byl proveden pro všechny meteorologické podmínky. Pro porovnání je na obrázku 31 uveden graf Y -



predikce pro jednoduchou lineární regresi koncentrací NO a hodnot meteorologických podmínek vyjma S, na obrázku 32 graf Y - predikce se zahrnutím všech podmínek.



Obrázek 31 – Jednoduchá lineární regrese NO a meteorologických podmínek vyjma S



Obrázek 32 – Lineární regrese NO a všech meteorologických podmínek

Postupným snižováním nejméně významných parametrů byl nalezen model, který obsahuje proměnné: Abs, SV, V, JV, J, JZ, Z, SZ, , T, IS, RH, RAIN.

Podmínky výpočtu:

Hladina významnosti :	0,05
Absolutní člen :	Ano
Počet platných řádků :	14
Počet parametrů :	12
Metoda :	Nejmenší čtverce

Odhady parametrů:

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	1252,793	13,04237	Významný	0,000108	1196,677	1308,91
SV	-7,20188	0,043494	Významný	3,65E-05	-7,38902	-7,01474
V	-2,92341	0,037062	Významný	0,000161	-3,08288	-2,76394
JV	0,646148	0,023912	Významný	0,001367	0,543262	0,749035
J	0,69144	0,026168	Významný	0,001429	0,578849	0,804031
JZ	-2,16876	0,028892	Významný	0,000177	-2,29307	-2,04445
Z	10,90642	0,055928	Významný	2,63E-05	10,66578	11,14706
SZ	-7,16892	0,051774	Významný	5,22E-05	-7,39169	-6,94616
T	-8,16041	0,056332	Významný	4,76E-05	-8,40279	-7,91803
IS	1,025921	0,006048	Významný	3,47E-05	0,999899	1,051942
RH	12,72446	0,058228	Významný	2,09E-05	12,47393	12,97499
RAIN	-16,5267	0,169461	Významný	0,000105	-17,2558	-15,7976

Parciální grafy (příloha 1, obrázek P2) ukazují na lineární model.

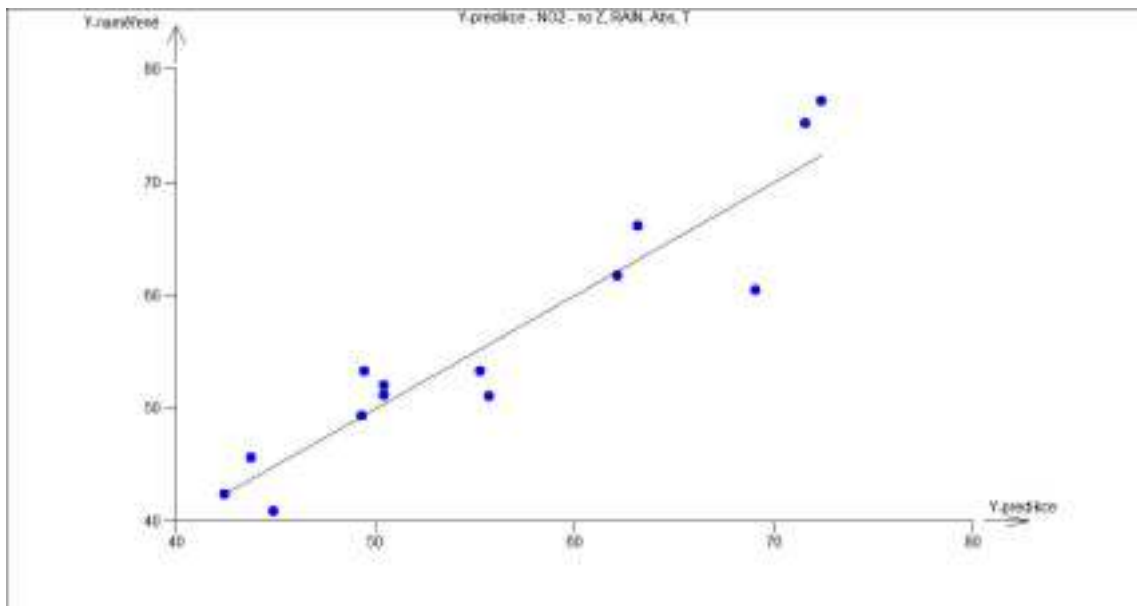
Statistické charakteristiky regrese:

Vícenásobný korelační koeficient R :	0,999992
Koeficient determinace R <sup>2</sup> :	0,999984
Předikovaný korelační koeficient Rp :	0,994782
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	3,077492
Akaikeho informační kritérium :	-31,787

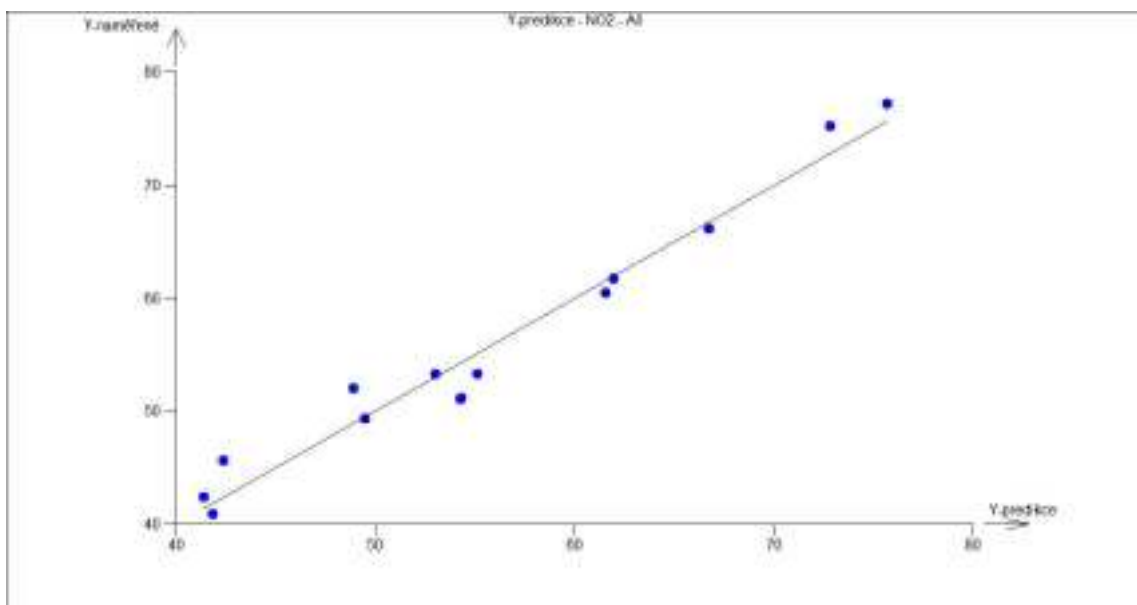
Výsledky testování (příloha 1, tabulka P2) jsou vyhovující, proto lze tento model považovat za vhodný. Významné parametry jsou všechny vyjma S. Rostoucí hodnoty SV, V, JZ, T a RAIN snižují koncentrace NO a JV, J, Z, S, IS a RH přispívají ke zvyšování koncentrace NO v ovzduší. Jako v předchozím případě lze předpokládat, že se uplatňují různou měrou zdroje NO z různých směrů, vyjma severního.

#### **4.8 Vliv meteorologických podmínek na NO<sub>2</sub>**

Byly hledány meteorologické podmínky (vstupní nezávisle proměnné podmínky), které mají vliv na šíření NO<sub>2</sub> (vstupní závislá proměnná). Úvodní výpočet byl proveden pro všechny meteorologické podmínky. Pro porovnání je na obrázku 33 uveden graf Y - predikce pro jednoduchou lineární regresi koncentrací NO<sub>2</sub> a hodnot SV, V, JV, J, JZ, SZ, S, IS a RH, na obrázku 34 graf Y - predikce se zahrnutím všech podmínek.



Obrázek 33 – Jednoduchá lineární regrese NO<sub>2</sub> a SV, V, JV, J, JZ, SZ, S, IS a RH



Obrázek 34 – Lineární regrese NO<sub>2</sub> a všech meteorologických podmínek

Postupným snižováním nejméně významných parametrů byl nalezen model, který obsahuje proměnné: SV, V, JV, J, JZ, SZ, S, IS a RH.

Podmínky výpočtu:

Hladina významnosti :	0,05
Absolutní člen :	Ne
Počet platných řádků :	14
Počet parametrů :	9
Metoda :	Nejmenší čtverce

Odhady parametrů:

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
SV	-4,08344	1,045941	Významný	0,011362	-6,77211	-1,39476
V	-2,74748	0,962755	Významný	0,035666	-5,22231	-0,27264
JV	-2,11286	0,593191	Významný	0,016183	-3,63771	-0,58802
J	-2,77336	0,759724	Významný	0,014741	-4,7263	-0,82043
JZ	-3,10408	0,818058	Významný	0,0127	-5,20697	-1,0012
SZ	-3,81894	1,078588	Významný	0,01655	-6,59154	-1,04634
S	-3,14255	0,842394	Významný	0,013564	-5,30799	-0,97711
IS	0,176827	0,049051	Významný	0,015462	0,050738	0,302916
RH	3,547678	0,777994	Významný	0,006057	1,547782	5,547575

Parciální grafy (příloha 1, obrázek P3) ukazují na lineární model.

Vícenásobný korelační koeficient R :	0,941764
Koeficient determinace $R^2$ :	0,886919
Predikovaný korelační koeficient $R_p$ :	0,018114
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	99,8775
Akaikeho informační kritérium :	53,96381

Výsledky testování (příloha 1, tabulka P3) jsou vyhovující, proto lze tento model považovat za vhodný. Významné parametry jsou všechny vyjma S. Rostoucí hodnoty SV, V, JV, J, JZ, SZ a S snižují koncentrace  $\text{NO}_2$  a IS a RH přispívají ke zvyšování koncentrace NO v ovzduší. Jako v předchozích případech lze předpokládat, že se uplatňují různou měrou zdroje NO z různých směrů, vyjma západního.

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením vlivu meteorologických podmínek na škodliviny v ovzduší, které jsou typické pro dopravu.

V teoretické části práce byl vypracován rešeršního přehled současného stavu poznatků o vlivu meteorologických podmínek (teplota, vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru, doba a intenzita slunečního svitu) a intenzity dopravy na koncentrace vybraných škodlivin v ovzduší. Byl zpracován souhrn informací o snižování škodlivých emisí z dopravních prostředků.

Z Českého hydrometeorologického ústavu v Praze byla zajištěna data vhodná pro analýzu vlivu meteorologických podmínek na škodliviny pocházející z dopravy. Byla navržena a ověřena metodika jejich statistického hodnocení s využitím programu QC Expert (TriloByte Statistical Software, s.r.o., Pardubice). Výsledky byly porovnány s výstupy hodnocení, které provedlo v období 2007–2008 CDV Brno.

Na základě výsledků analýzy dat, která byla hodnocena v rámci této diplomové práce, lze konstatovat:

- Protože  $\text{NO}_2$  vzniká sekundárně z  $\text{NO}$ , jeho vznik je pravděpodobně pomalý a jakýkoliv vítr ho tedy rozptyluje.
- Pokud jsou  $\text{NO}$  a  $\text{CO}$  statisticky významné, mají vždy stejná znaménka regresních koeficientů. To znamená stejný zdroj obou škodlivin, nejpravděpodobněji dopravu.
- Vyšší koncentrace primárních plynných škodlivin se vyskytují ve dnech s nižšími teplotami a vyšší relativní vlhkostí, ale s vyšší intenzitou slunečního záření. Vliv srážek u těchto škodlivin se projevuje jejich poklesem s jejich rostoucím denním úhrnem.
- Chování  $\text{PM}_{10}$  se liší od chování plynných škodlivin. Jedná se totiž o heterogenní směs částic různé velikosti. Problém by mohla objasnit regrese různých frakcí  $\text{PM}$  s meteorologickými podmínkami, např. zvlášť frakce  $\text{PM}_{10-2.5}$  a  $\text{PM}_{2.5}$ . Tato data však nejsou k dispozici v takové míře, aby byla statistická analýza proveditelná.

Vliv směru větru se projevoval následujícím způsobem:

- SZ, SV, JZ a V – většinou záporné regresní koeficienty: pokud fouká vítr z těchto směrů, koncentrace škodlivin klesají (park Sacré coeur, plochy zeleně, žádné dopravní zdroje)
- S – regresní koeficienty nevýznamné nebo kladné i záporné: blízkost budov Městské policie Praha pravděpodobně ruší vliv větru
- J – směr od vjezdů a výjezdů Strahovského tunelu a tunelu Mrázovka, PM10 z tohoto směru patrně nevystoupají nad úroveň vjezdu do tunelu. Koncentrace CO a NO se příspěvkem větru z tohoto směru podle očekávání zvyšují vlivem emisí z vozidel vjíždějících a vyjíždějících z tunelů.
- JV – regresní koeficienty převážně kladné, pravděpodobně vliv komunikace Kartouzská
- Z - regresní koeficienty převážně kladné, pravděpodobně vliv komunikací, případně i zástavby na západ od místa měření.

Přínosem této práce je ověření možnosti použití statistického softwaru QC Expert pro hodnocení vlivu meteorologických podmínek na koncentrace vybraných škodlivin z dopravy.

## Použité informační zdroje:

[1] Česká republika. Zákon ze dne 14. února 2002 o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší). In *Sbírka zákonů*. 2002, 86, s. 1786 - 1840. Dostupný také z WWW:

<[http://portal.gov.cz/wps/portal/\\_s.155/701/.cmd/ad/.c/313/.ce/10821/.p/8411/\\_s.155/701?PC\\_8411\\_number1=86/2002&PC\\_8411\\_l=86/2002&PC\\_8411\\_pi=0&PC\\_8411\\_ps=50#](http://portal.gov.cz/wps/portal/_s.155/701/.cmd/ad/.c/313/.ce/10821/.p/8411/_s.155/701?PC_8411_number1=86/2002&PC_8411_l=86/2002&PC_8411_pi=0&PC_8411_ps=50#)>.

[2] Česká republika. Nařízení vlády o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší. In *Sbírka zákonů*. 2006, 188, 597, s. 7945 - 7958. Dostupný také z WWW:

<[http://portal.gov.cz/wps/portal/\\_s.155/701/.cmd/ad/.c/313/.ce/10821/.p/8411/\\_s.155/701?PC\\_8411\\_number1=597/2006&PC\\_8411\\_l=597/2006&PC\\_8411\\_ps=50#10821](http://portal.gov.cz/wps/portal/_s.155/701/.cmd/ad/.c/313/.ce/10821/.p/8411/_s.155/701?PC_8411_number1=597/2006&PC_8411_l=597/2006&PC_8411_ps=50#10821)>.

[3] Pevné částice. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. Wikipedia Foundation, last modified on 2. 2. 2011 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW:

<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Pevn%C3%A9\\_%C4%8D%C3%A1stice#cite\\_note-0](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pevn%C3%A9_%C4%8D%C3%A1stice#cite_note-0)>.

[4] *DieselNet* [online]. 1999, 2010.03 [cit. 2011-04-30]. Emission Standards: Europe: Cars and Light Trucks. Dostupné z WWW:

<<http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>>.

[5] DUNCAN R.C.; YOUNQUIST, W. Encircling the peak of world oil production. *Natural Resources Research*, 1999. Stránky 219–232.

[6] OMAN, H. Energy sources for the worlds post petroleum era. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2003. Stránky 35–39.

[7] CHAPMAN, Lee. Transport and climate change: a review Original Research Article *Journal of Transport Geography*, Volume 15, Issue 5, září 2007. Stránky 354 - 367.

[8] BONNAFOUS, A.; RAUX, C. Transport energy and emissions: rail. In: Hensher, D.A., Button, K.J. (Eds.), *Handbooks in Transport 4: Handbook of Transport and the Environment*. Elsevier, pp, 2003. Stránky 293–308.

[9] CONOR, Walsh; JAKEMAN, Phil; MOLES, Richard; O'REGAN, Bernadette. A comparison of carbon dioxide emissions associated with motorised transport modes and cycling in Ireland Original Research Article *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 13, Issue 6, srpen 2008. Stránky 392-399.

- [10] BADŽGOŇ, Petr Bc. *Modelové hodnocení emisí ze silniční dopravy a jejich škodlivé účinky na lidské zdraví*. [s.l.], 2010. 91 s. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní Fakulta Jana Pernera.
- [11] MACHALÍKOVÁ, Jaroslava Doc. RNDr. Přednáška č. 9. In *Životní prostředí a doprava*. 2007/2008.
- [12] *Časopis TRIBOTECHNICKÉ INFORMACE 1/2009*. online].[cit. 30. dubna 2010]. Dostupné na WWW : <<http://www.tribotechnika.cz/doc/TTI%201-2009.pdf>>.
- [13] KOUSOULIDOU, Marina; NTZIACHRISTOS, Leonidas; MELLIOS; Giorgos; SAMARAS, Zissis. Road-transport emission projections to 2020 in European urban environments Original Research Article Atmospheric Environment, Volume 42, Issue 32, říjen 2008. Stránky 7465-7475.
- [14] *Hluk & Emise* [online]. 2007 [cit. 2011-05-16]. Vliv emisí na zdraví. Dostupné z WWW: <<http://hluk.eps.cz/hluk/emise/vliv-emisi-na-zdravi/>>.
- [15] *CHMI* [online]. 2000 [cit. 2011-04-22]. Základní informace - ÚOČO. Dostupné z WWW: <<http://chmi.eu/uoco/struct/index.html>>.
- [16] ADAMEC, V., HUZLÍK, J., LIČBINSKÝ, R., DUFEK, J., JEDLIČKA, J., PROVALILOVÁ, I., ADAMCOVÁ, M., JÍCHA, M., POSPÍŠIL, J., KATOLICKÝ, J., BENCKO, V., PETANOVÁ, J., NOVOTNÝ, L. Prašnost dopravy a její vlivy na imisní zatížení ovzduší suspendovanými částicemi (Výroční zpráva projektu VaV 1F54H/098/520 za rok 2007). Brno: CDV, 2008, 110 s.
- [17] *Stavební technika* [online]. 2005 [cit. 2011-04-30]. Motory Euro 4 – EGR nebo SCR?. Dostupné z WWW: <<http://stavebni-technika.cz/clanky/motory-euro-4-egr-nebo-scr/>>.
- [18] *TriloByte Ltd. Statistical Software* [online]. 2011 [cit. 2011-05-18]. QC - Expert 3.2. Dostupné z WWW: <<http://www.trilobyte.cz/Nase-Produkty/QC-Expert.html>>.
- [19] *CHMI* [online]. 2010, 14. 04. 2011 [cit. 2011-05-02]. Informace o kvalitě ovzduší v ČR, Seznam lokalit, kde se měří znečištění ovzduší. Dostupné z WWW: <[http://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web\\_generator/locality/pollution\\_locality/locality\\_lo c\\_ASMI\\_CZ.html](http://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/locality/pollution_locality/locality_lo c_ASMI_CZ.html)>.



- [20] WANG, Michael . Well-to-Wheels Energy and Emission Impacts of Vehicle/Fuel Systems. [online]. 2003, [cit. 2011-05-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/273.pdf>>.
- [21] Skleníkový efekt. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, , last modified on 8. 3. 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C3%ADkov%C3%BD\\_efekt](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C3%ADkov%C3%BD_efekt)>.
- [22] UHEREK, Elmar; HALENKA, Tomas; BORKEN-KLEEFELD, Jens; BALKANSKI, Yves; BERNRSEN, Terje; BORREGO, Carlos; GAUSS, Michael; HOOR, Peter; JUDA-REZLER, Katarzyna; LELIEVELD, Jos; MELAS, Dimitrios; RYPDAL, Kristin; SCHMID, Stephan. Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport Original Research Article Atmospheric Environment, Volume 44, Issue 37, December 2010. Stránky 4772-4816.
- [23] MELOUN, M., MILITKÝ, J., HILL, M. Statistická Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech. ACADEMIA Praha, 2005, 450 s.
- [24] MELOUN, M., MILITKÝ, J. Statistické zpracování experimentálních dat. 2. Vydání, East Publishing Praha, 1998, 840 s.

## Seznamy

### *Seznam zkratek:*

CDV – Centrum dopravního výzkumu

v. v. i. – veřejná výzkumná instituce

EN – evropská norma

CO – oxid uhelnatý

HC (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) – uhlovodíky

NO<sub>x</sub> – oxidy dusíku

NO – oxid dusnatý

NO<sub>2</sub> – oxid dusičitý

CO<sub>2</sub> – oxid uhličitý

SO<sub>2</sub> – oxid siřičitý

PM – pevné částice

ISKO – informační systém kvality ovzduší

ČHMÚ – Český hydrometeorologický úřad

EURO – Evropské emisní standardy

EU – Evropská unie

LPG – propan – butan

CNG – stlačený zemní plyn

LNG – zkapalněný zemní plyn

DART – Dublin Area Rapid Transit – elektrická vlaková doprava

SUV - sportovně užitkové vozidlo

EGR – Exhaust Gas Recirculation (recirkulace výfukových plynů)

DPF – Diesel Particulate Filter (filtr pevných částic)

SCR – Selectiv Catalytic Reduction (selektivní katalytická redukce)

CLE – stávající právní předpisy

MFR – předpisy s maximálním možným technickým snížením

PC – osobní automobil

LDV – lehké užitkové vozidlo

HDV – těžké nákladní vozidlo

Pt – Platina

Rh – Rhodium

Pd – Palladium

Zn – Zinek

Cu – Měď

Mn – Mangan

Sn – Cín

Ni – Nikl

Cr – Chrom

Pb – Olovo

Cd – Kadmium

As – Arzen

Ba – Baryum

V – Vanad

AIM – integrovaný monitoring kvality ovzduší

ISO - International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardizaci)

QS 9000 – oborová norma automobilového průmyslu vypracovaná skupinou Chrysler/Ford/General Motors

VDA – normy výrobců automobilů (používány především v Německu)

TQM – Total Quality Management (totální řízení kvality)

Abs – absolutní člen

SV – severovýchodní směr větru

V – východní směr větru

JV – jihovýchodní směr větru

J – jižní směr větru

JZ – jihozápadní směr větru

Z – západní směr větru

SZ – severozápadní směr větru

S – severní směr větru

CALM - bezvětří

T – teplota 2 m nad zemí

IS – intenzita slunečního svitu

RH – relativní vlhkost

RAIN – množství srážek

## ***Seznam obrázků:***

Obrázek 1 - (a) použití paliv v sektoru dopravy v zemích OECD (Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj), (b) podíly dopravy v zemích OECD [7] .....	15
Obrázek 2 - Systém EGR [17] .....	19
Obrázek 3 – Vývoj průměrných emisí NO <sub>x</sub> pro jednotlivé druhy dopravních prostředků [13].....	21
Obrázek 4 – Vývoj průměrných emisí NO <sub>2</sub> pro jednotlivé druhy dopravních prostředků [13].....	22
Obrázek 5 - Vývoj průměrných emisí PM <sub>2,5</sub> pro jednotlivé druhy dopravních prostředků [13].....	22
Obrázek 6 - Prachový mrak na pomezí Indie a Bangladéše [3].....	23
Obrázek 7– Průběh koncentrací PM <sub>10</sub> [16].....	25
Obrázek 8 – Průběh koncentrací PM <sub>2,5</sub> na lokalitách 1 a 2 [16].....	25
Obrázek 9 - Průběh koncentrací PM <sub>1,0</sub> na lokalitách 1 a 2 [16] .....	26
Obrázek 10 - Velikostní distribuce PM na lokalitě 1 v březnu 2007 [16] .....	27
Obrázek 11 - Velikostní distribuce PM na lokalitě 1 v dubnu 2007 [16].....	27
Obrázek 12 - Vývoj průměrných týdenních koncentrací PM <sub>1,0</sub> [μg.m <sup>-3</sup> ] [16].....	28
Obrázek 13 – Distribuce vybraných prvků ve frakci PM <sub>10</sub> na lokalitě 1 (vlevo) a lokalitě 2 (vpravo) [16] .....	29
Obrázek 14 - Umístění měřicí lokality Brno - Tuřany.....	31
Obrázek 15 - Umístění měřicí lokality Brno - křižovatka Kotlářská/Kounicova .....	31
Obrázek 16 - Porovnání závislostí koncentrace PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Tuřany [16] .....	32
Obrázek 17 - Srovnání závislostí koncentrace PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Tuřany, období s významnou intenzitou provozu [16].....	33
Obrázek 18 - Ukázka grafického vyhodnocení závislostí koncentrace PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Tuřany, období s nízkou intenzitou provozu [16] .....	34
Obrázek 19 - Vyhodnocení závislostí koncentrace PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> – Kotlářská/Kounicova [16].....	35
Obrázek 20 - Srovnání závislostí koncentrace PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Kotlářská, období s významnou intenzitou provozu [16].....	36
Obrázek 21 - Srovnání závislostí koncentrace PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> na rychlosti větru – stanice Kotlářská, období s nízkou intenzitou provozu [16].....	37

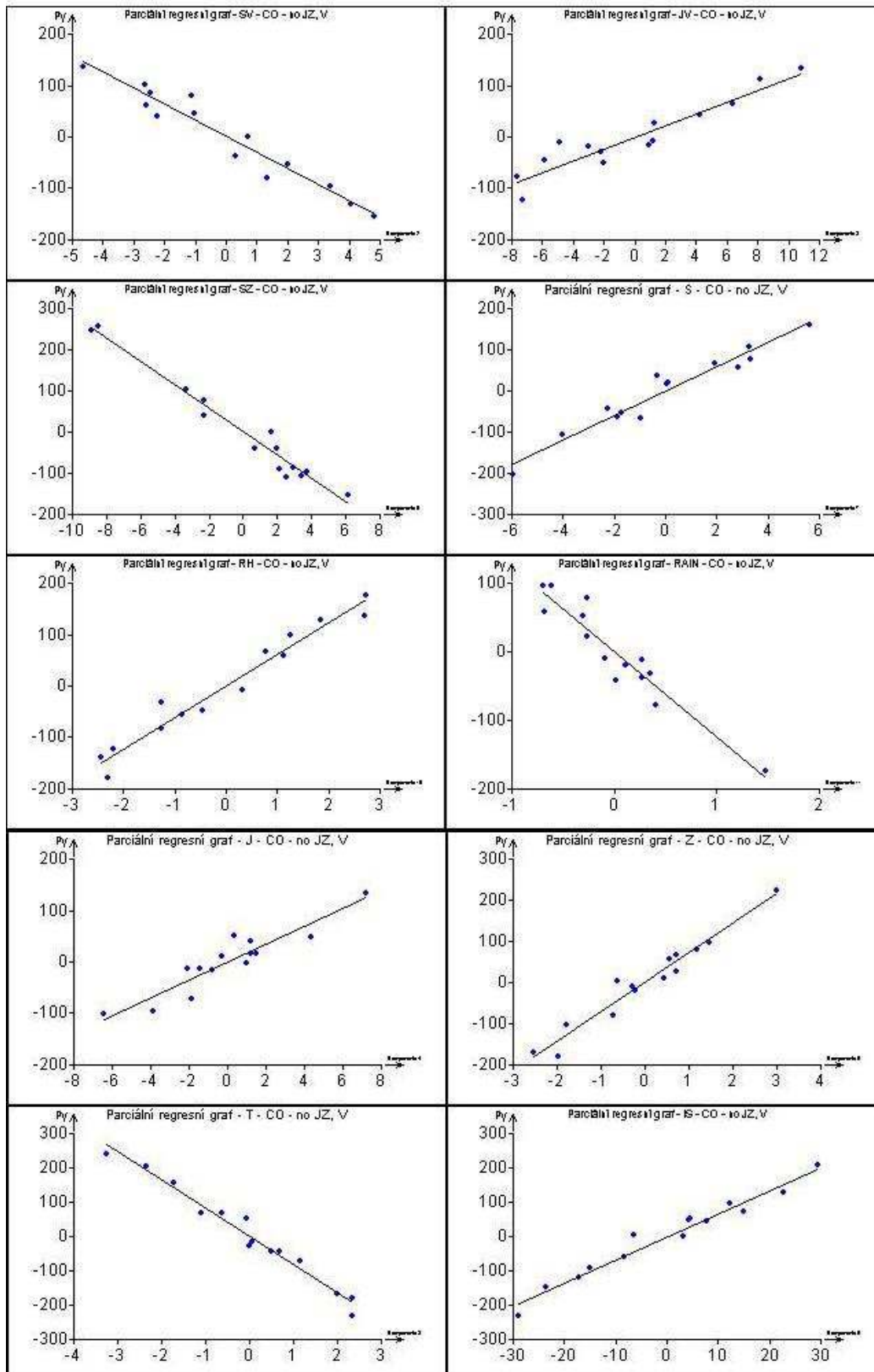
Obrázek 22 – Měřicí lokalita Praha 5 – Smíchov [19] .....	38
Obrázek 23 – Grafické znázornění větrné růžice.....	40
Obrázek 24 – Průběh koncentrací PM <sub>10</sub> v lokalitě Praha 5 - Smíchov.....	41
Obrázek 25 - Porovnání závislostí koncentrace PM <sub>10</sub> a NO <sub>x</sub> na rychlosti větru pro období s vysokou intenzitou provozu (nahore) a s nízkou intenzitou (dole).....	42
Obrázek 26 – Jednoduchá lineární regrese PM <sub>10</sub> a J, RH.....	43
Obrázek 27 – Lineární regrese PM <sub>10</sub> a všech meteorologických podmínek.....	43
Obrázek 28 – parciální regresní grafy pro RH a J .....	45
Obrázek 29 – Jednoduchá lineární regrese CO a meteorologických podmínek vyjma JZ a V .....	47
Obrázek 30 – Lineární regrese CO a všech meteorologických podmínek .....	47
Obrázek 31 – Jednoduchá lineární regrese NO a meteorologických podmínek vyjma S .....	49
Obrázek 32 – Lineární regrese NO a všech meteorologických podmínek .....	49
Obrázek 33 – Jednoduchá lineární regrese NO <sub>2</sub> a SV, V, JV, J, JZ, SZ, S, IS a RH.....	51
Obrázek 34 – Lineární regrese NO <sub>2</sub> a všech meteorologických podmínek .....	51

### ***Seznam tabulek:***

Tabulka 1: Software pro modelování imisí [2] .....	13
Tabulka 2: Tabulka emisních norem pro osobní automobily (Veškeré údaje jsou uváděny v g/km, tabulka převzata z [4] a zkrácena).....	14
Tabulka 3: Celkové emise CO <sub>2</sub> na osobu na kilometr [9] .....	17
Tabulka 4 – Průměrná větrná růžice za celou dobu měření.....	39

# Přílohy

## Příloha 1



Obrázek P1 – Parciální regresní grafy pro závislost meteorologických podmínek a CO

Tabulka P1 – Testování regresního tripletu CO:

Fisher-Snedecorův test významnosti modelu:

Hodnota kritéria F :	46,05275032
Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m) :	8,785524711
Pravděpodobnost :	0,004625824
Závěr :	Model je významný

Scottovo kritérium multikolinearity:

Hodnota kritéria SC :	-0,136985033
Závěr :	Model je korektní.

Cook-Weisbergův test heteroskedasticity:

Hodnota kritéria CW :	0,050941742
Kvantil $\chi^2(1-\text{alfa},1)$ :	3,841458829
Pravděpodobnost :	0,8214326
Závěr :	Rezidua vykazují homoskedasticitu.

Jarque-Berrův test normality:

Hodnota kritéria JB :	0,232268427
Kvantil $\chi^2(1-\text{alfa},2)$ :	5,991464547
Pravděpodobnost :	0,890355717
Závěr :	Rezidua mají normální rozdělení.

Waldův test autokorelace:

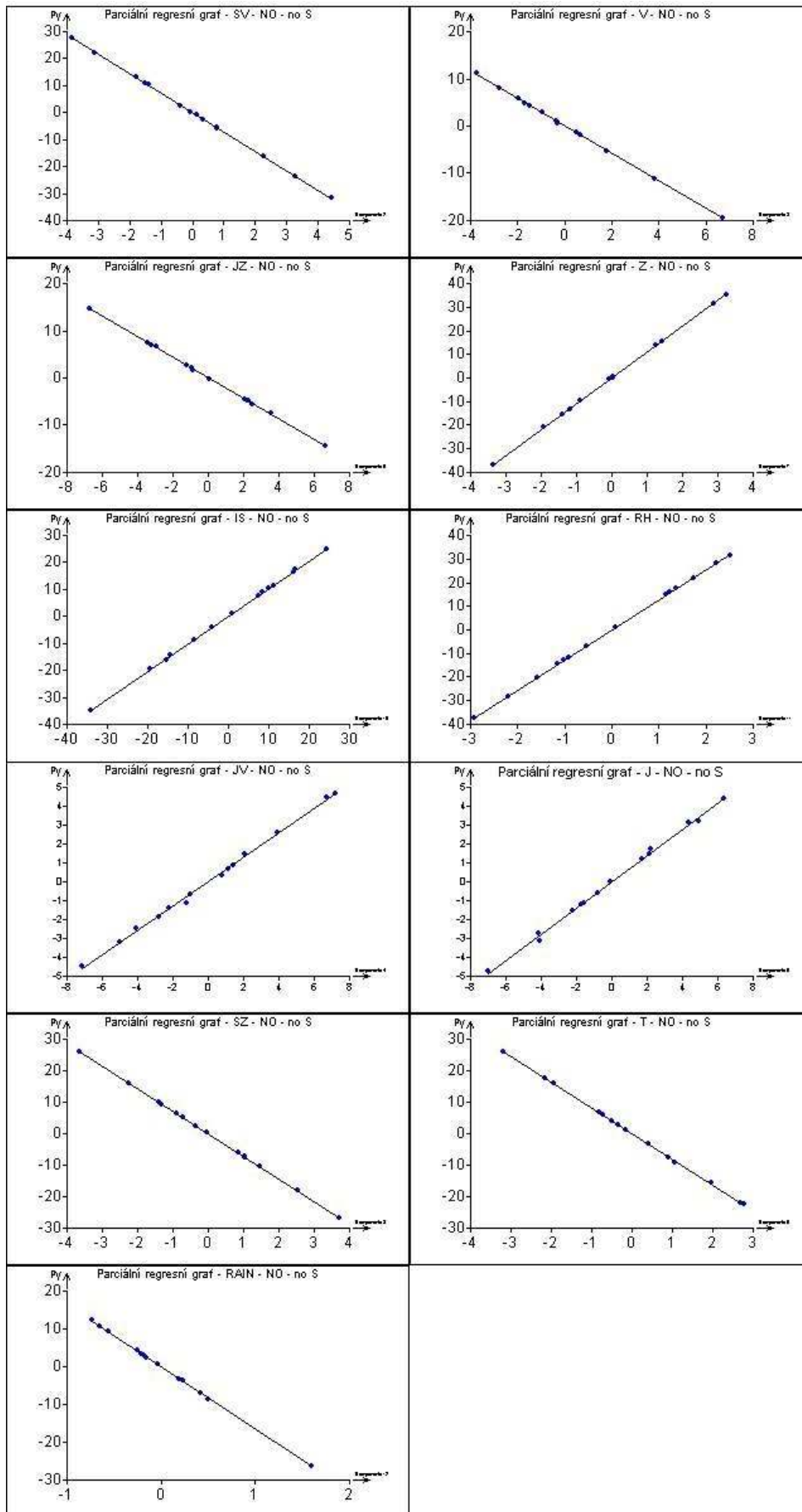
Hodnota kritéria WA :	0,019772986
Kvantil $\chi^2(1-\text{alfa},1)$ :	3,841458829
Pravděpodobnost :	0,888172952
Závěr :	Autokorelace je nevýznamná

Durbin-Watsonův test autokorelace:

Hodnota kritéria DW :	-1
Kritické hodnoty DW	0
Závěr :	Negativní autokorelace reziduí není prokázána.

Znaménkový test reziduí:

Hodnota kritéria Sg :	0,27817432
Kvantil $N(1-\text{alfa}/2)$ :	1,959963999
Pravděpodobnost :	0,780878547
Závěr :	V reziduích není trend.



Obrázek P2 – Parciální regresní grafy pro závislost meteorologických podmínek a NO



Tabulka P2 – Testování regresního tripletu NO:

Fisher-Snedecorův test významnosti modelu:

Hodnota kritéria F :	11517,50502
Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m) :	19,40495796
Pravděpodobnost :	8,68E-05
Závěr :	Model je významný

Scottovo kritérium multikolinearity:

Hodnota kritéria SC :	-0,215534003
Závěr :	Model je korektní.

Cook-Weisbergův test heteroskedasticity:

Hodnota kritéria CW :	0,014970997
Kvantil $\chi^2(1-\text{alfa},1)$ :	3,841458829
Pravděpodobnost :	0,902617065
Závěr :	Rezidua vykazují homoskedasticitu.

Jarque-Berrův test normality:

Hodnota kritéria JB :	1,066523398
Kvantil $\chi^2(1-\text{alfa},2)$ :	5,991464547
Pravděpodobnost :	0,586688245
Závěr :	Rezidua mají normální rozdělení.

Waldův test autokorelace:

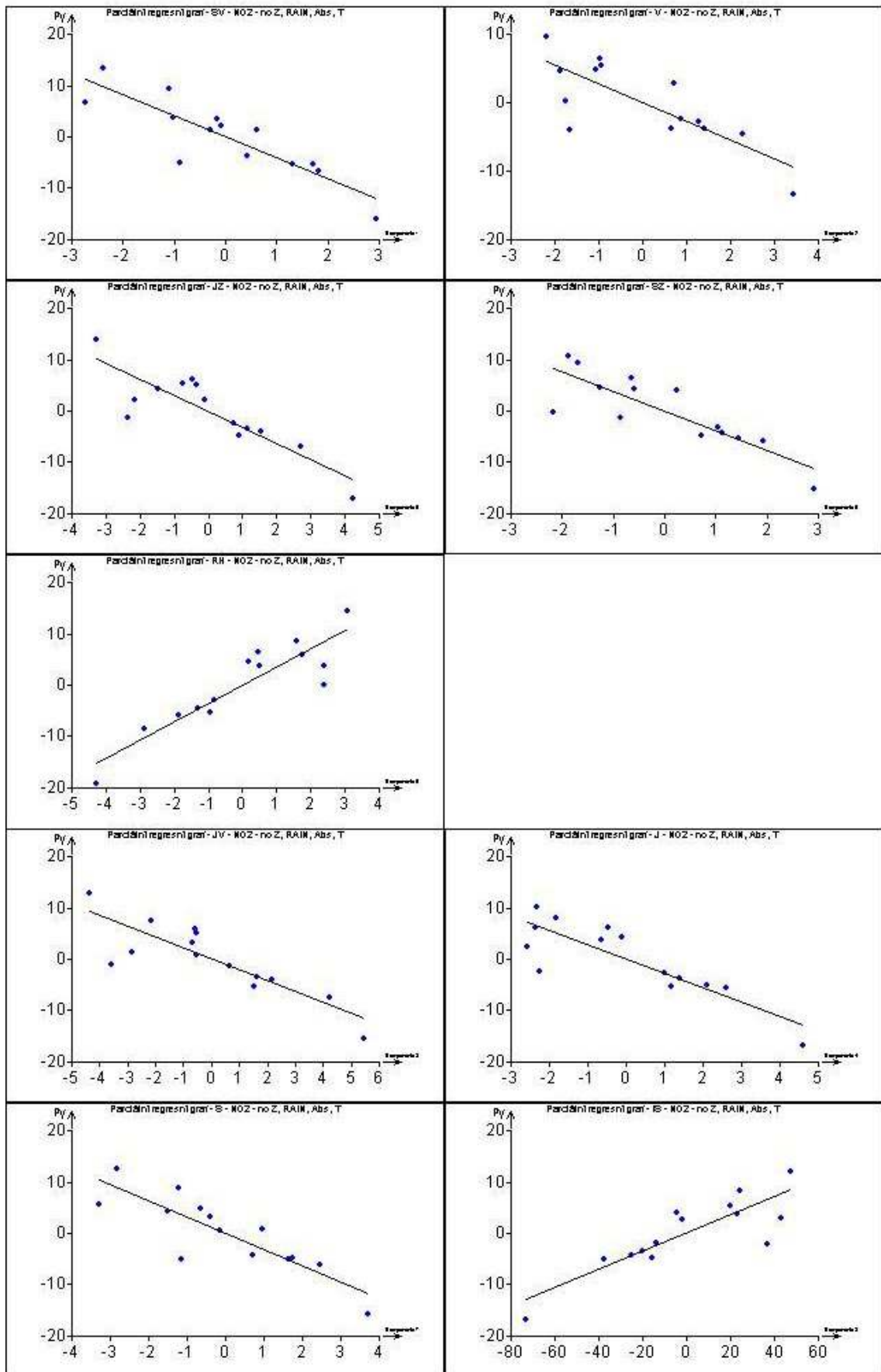
Hodnota kritéria WA :	0,014807074
Kvantil $\chi^2(1-\text{alfa},1)$ :	3,841458829
Pravděpodobnost :	0,90314903
Závěr :	Autokorelace je nevýznamná

Durbin-Watsonův test autokorelace:

Hodnota kritéria DW :	-1
Kritické hodnoty DW	0
Závěr :	Negativní autokorelace reziduí není prokázána.

Znaménkový test reziduí:

Hodnota kritéria Sg :	1,503594947
Kvantil $N(1-\text{alfa}/2)$ :	1,959963999
Pravděpodobnost :	0,132685693
Závěr :	V reziduích není trend.



Obrázek P3 – Parciální regresní grafy pro závislost meteorologických podmínek a NO<sub>2</sub>

Tabulka P3 – Testování regresního tripletu NO<sub>2</sub>:

Fisher-Snedecorův test významnosti modelu:

Hodnota kritéria F :	4,902017439
Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m) :	4,818319536
Pravděpodobnost :	0,04832074
Závěr :	Model je významný

Scottovo kritérium multikolinearity:

Hodnota kritéria SC :	-0,470101437
Závěr :	Model je korektní.

Cook-Weisbergův test heteroskedasticity:

Hodnota kritéria CW :	0,485178801
Kvantil Chi <sup>2</sup> (1-alfa,1) :	3,841458829
Pravděpodobnost :	0,48608585
Závěr :	Rezidua vykazují homoskedasticitu.

Jarque-Berrův test normality:

Hodnota kritéria JB :	1,748132564
Kvantil Chi <sup>2</sup> (1-alfa,2) :	5,991464547
Pravděpodobnost :	0,417251433
Závěr :	Rezidua mají normální rozdělení.

Waldův test autokorelace:

Hodnota kritéria WA :	0,0146191
Kvantil Chi <sup>2</sup> (1-alfa,1) :	3,841458829
Pravděpodobnost :	0,90376274
Závěr :	Autokorelace je nevýznamná

Durbin-Watsonův test autokorelace:

Hodnota kritéria DW :	-1
Kritické hodnoty DW	0
Závěr :	Pozitivní autokorelace reziduí není prokázána.

Znaménkový test reziduí:

Hodnota kritéria Sg :	0,772116324
Kvantil N(1-alfa/2) :	1,959963999
Pravděpodobnost :	0,440045535
Závěr :	V reziduích není trend.