



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

# **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**

**Praktické limity detekce vozidel  
s nadměrnými emisemi dálkovým měřením  
s odběrem vzorku**

**Practical limits of high emitter detection using  
roadside measurements**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2022**

**Bc. Ondřej VYŠTEIN**

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301T047 Dopravní letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vyštejn** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **473676**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**  
Specializace: **Spalovací motory**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Praktické limity detekce vozidel s nadměrnými emisemi dálkovým měřením s odběrem vzorku**

Název diplomové práce anglicky:

**Practical limits of high emitter detection using roadside measurements**

Pokyny pro vypracování:

Dálkové měření emisí metodou odběru vzorku z blízkosti jízdní dráhy je jednou z navrhovaných metod detekce vozidel s nadměrnými výfukovými emisemi v běžném provozu. Tato metoda umožňuje měření malých částic, obtížně detekovatelných spektrometrickým měřením s otevřenou dráhou paprsku. Cílem práce je analyzovat data z dálkového měření na zkušební okruhu v rámci evropského projektu City Air Remote Emissions Sensing, případně i další dostupná data z dálkových měření. Výsledkem by mělo být kritické zhodnocení podmínek, za kterých je měření proveditelné, s ohledem zejména na časové rozestupy mezi vozidly, rychlost jízdy a akcelerace vozidla, předchozí průjezdy vozidel s vysokými emisemi, pozadové koncentrace, a příspěvek vozidla k okamžitým koncentracím CO<sub>2</sub>. Předmětem kritické diskuze by měla být také mez kvantifikace CO, NO/NO<sub>2</sub> a částic, a to jak potřebná, tak skutečně dosažitelná.

Seznam doporučené literatury:

Bernard, Y., German, J., & Muncrief, R. (2019). Worldwide use of remote sensing to measure motor vehicle emissions. The International Council on Clean Transport. // Bishop, G. A., et al. (2015). Environmental science & technology, 49(3), 1639-1645. // Preble, C. V., Kirchstetter, T. W., & Harley, R. A. (2019). Measuring real-world emissions from the on-road heavy-duty truck fleet. California Environmental Protection Agency, Air Resources Board. // Quiros, D. C., et al. (2018). Journal of the Air & Waste Management Association, 68(9), 969-987. // Shen, Y., et al. (2022). Science of The Total Environment, 816, 151609. // Vojtíšek-Lom, M., et al. (2020). Science of the Total Environment, 738, 139753.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **13.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce:

  
prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

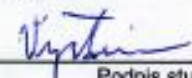
  
doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis držitele(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

20.4.2022  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## Anotační záznam

Jméno autora: Bc. Ondřej Vyštein

Název práce: Praktické limity detekce vozidel s nadměrnými emisemi  
dálkovým měřením s odběrem vzorku

Anglický název: Practical limits of high emitter detection using roadside  
measurements

Rozsah práce:

93 stran

23 obrázků

9 tabulek

69 grafů

4 přílohy

Akademický rok: 2021/2022

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových  
vozidel

Studijní program: Dopravní a transportní technika

Vedoucí práce: prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.

Klíčová slova: Spalovací motory, emise, ovzduší, dálkové měření emisí,  
praktické limity detekce, časové rozestupy, mez kvantifikace, příspěvek CO<sub>2</sub>, pevné částice,  
oxidy dusíku, FTIR, EEPS, mini-PEMS, OPUS, projekt CARES

Key words: Internal combustion engines, emissions, air quality, remote  
sensing, roadside measurement, practical limits of high emitter detection, time intervals  
between test vehicles, limit of quantification, CO<sub>2</sub> contribution, particulate number,  
particulate matter, nitrogen oxides, FTIR, EEPS, mini-PEMS, OPUS, CARES project



## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá analýzou dat z dálkového měření emisí s odběrem vzorku z blízkosti jízdní dráhy, pořádaného v rámci evropského projektu City Air Remote Emissions Sensing (CARES) v nizozemském Lelystadu. V teoretické části je popsána problematika emisí produkovaných automobily a uvedeny základní poznatky o metodě dálkového měření emisí včetně přiblížení zde analyzovaného experimentu. V praktické části jsou naměřená data zpracována a na jejich základě jsou vyhodnoceny a upřesněny podmínky, za kterých je měření proveditelné s vypovídajícími výsledky. Kromě toho jsou příslušné naměřené koncentrace porovnány s výsledky jiných měřících přístrojů.

## Abstract

This diploma thesis is focused on the analysis of data from roadside measurements, organized as part of the European project City Air Remote Emissions Sensing (CARES) in Lelystad, Netherlands. In the theoretical part of the thesis the problem of emissions produced by cars is described and the method of remote sensing of motor vehicle exhaust emissions is presented, including details of this particular experiment. In the practical part of the thesis, the measured data are processed and, based on them, the practical limits of high emitter detection using roadside measurement are evaluated and specified. In addition, the measured concentrations in question are compared with the results of other measuring devices.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Praktické limity detekce vozidel s nadměrnými emisemi dálkovým měřením s odběrem vzorku” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: .....

.....

(podpis autora)



## Poděkování

V první bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu prof. Michalu Vojtíškovi, M.S., Ph.D. za odborné vedení, vždy ochotnou pomoc a přínosné konzultace. Dále musím vzpomenout pana doc. Ing. Martina Pechouta, Ph.D. z České zemědělské univerzity, jehož pomoc při zpracování takového množství dat byla neocenitelná. A nesmím opomenout poděkovat také své rodině a vlastně všem, kteří mi nějakým způsobem pomáhali během celého studia.



# Obsah

1 Úvod.....	9
2 Problematika emisí.....	11
2.1 Přehled hlavních limitovaných škodlivin .....	12
2.1.1 Oxid uhelnatý CO .....	12
2.1.2 Oxid uhličitý CO <sub>2</sub> .....	13
2.1.3 Oxidy dusíku NO <sub>x</sub> .....	13
2.1.4 Nespálené uhlovodíky HC .....	14
2.1.5 Pevné částice .....	14
2.2 Opatření k omezení škodlivin.....	15
2.2.1 Opatření u motoru.....	15
2.2.2 Opatření za motorem .....	18
2.2.2.1 Trojcestný katalyzátor .....	18
2.2.2.2 Oxidační katalyzátor .....	19
2.2.2.3 SCR systém.....	20
2.2.2.4 Filtr pevných částic .....	21
2.3 Emisní standardy .....	22
3 Dálkové měření emisí.....	28
3.1 Možnosti využití.....	28
3.2 Základní metody.....	29
3.2.1 Spektrometrické měření s otevřenou dráhou paprsku .....	29
3.2.2 Odběr vzorku z blízkosti jízdní dráhy.....	30
3.3 Současná omezení .....	31
3.3.1 Měřicí místa.....	32
3.3.2 Vyhodnocování dat.....	32
4 Testovací měření v Lelystadu.....	34
4.1 Popis měřicího stanoviště .....	34
4.2 Použité přístroje .....	36
4.2.1 Rychlý klasifikátor velikosti částic (EEPS).....	36
4.2.2 Infračervený spektrometr s Fourierovou transformací (FTIR) .....	37
4.2.3 Zmenšený systém PEMS (mini-PEMS).....	37
4.3 Testovaná vozidla .....	38
5 Zpracování naměřených dat.....	39
5.1 Časová synchronizace dat.....	40
5.2 Mez detekce průjezdu.....	41
5.3 Vyhodnocení jednotlivých průjezdů .....	43
5.3.1 Přehled použitých metod vyhodnocení .....	44
5.3.2 Emisní faktory.....	46
5.3.3 Porovnání s emisními standardy.....	47
6 Výsledky měření .....	49
6.1 Limity dálkového měření .....	49
6.1.1 Místo odběru vzorku výfukových plynů.....	49
6.1.2 Rychlost a akcelerace vozidla .....	50
6.1.3 Časové rozestupy mezi projíždějícími vozidly.....	51



6.1.4 Příspěvek vozidel k okamžitým koncentracím CO <sub>2</sub> .....	54
6.2 Výsledné použitelné průjezdy jednotlivých vozidel .....	61
6.2.1 Vozidlo „Motorbike“ .....	62
6.2.1.1 Emise plyných složek.....	62
6.2.1.2 Emise pevných částic .....	63
6.2.2 Vozidlo „Scooter“ .....	64
6.2.2.1 Emise plyných složek.....	64
6.2.2.2 Emise pevných částic .....	65
6.2.3 Vozidlo „Caddy“ .....	66
6.2.3.1 Emise plyných složek.....	66
6.2.3.2 Emise pevných částic .....	66
6.2.4 Vozidlo „Transporter“ .....	67
6.2.4.1 Emise plyných složek.....	67
6.2.4.2 Emise pevných částic .....	68
6.2.5 Vozidlo „Touran“ .....	69
6.2.5.1 Emise plyných složek.....	69
6.2.5.2 Emise pevných částic .....	69
6.2.6 Vozidlo „Truck“ .....	70
6.2.6.1 Emise plyných složek.....	70
6.2.6.2 Emise pevných částic .....	71
6.2.7 Vozidlo „Plume chaser“ .....	72
6.2.7.1 Emise plyných složek.....	72
6.2.7.2 Emise pevných částic .....	73
6.3 Porovnání s výsledky jiných měřících přístrojů.....	74
6.3.1 Mini-PEMS vs. FTIR ČZU.....	74
6.3.2 OPUS vs. FTIR ČZU .....	78
7 Závěr .....	81
Použitá literatura.....	84
Seznam obrázků .....	88
Seznam tabulek.....	89
Seznam grafů.....	89
Seznam použitých zkratk.....	91
Seznam příloh.....	93





# 1 Úvod

Silniční doprava, potažmo doprava jako celek, je neoddělitelnou součástí našich životů a přináší spoustu výhod nejen ve formě prostého přemístování lidí a zboží z bodu A do bodu B, ale také vytváří pracovní místa a podporuje ekonomický růst. Na druhou stranu má i četné nedostatky, přičemž jedním z nejvíce skloňovaných problémů je bezesporu otázka emisí.

Silniční doprava totiž produkuje téměř jednu pětinu skleníkových plynů v Evropě a je jedním z významných zdrojů znečištění ve většině zastavěných oblastí. Oba tyto efekty poté mají za následek zhoršení lidského zdraví, ať už přímo, či nepřímo prostřednictvím změn klimatických podmínek. A jelikož objem osobní i nákladní silniční dopravy stále stoupá (dle údajů Evropské agentury pro životní prostředí až o 22 % mezi lety 2000 a 2019 [1]), bylo třeba tento problém řešit. V posledních 25 letech bylo dosaženo významného pokroku v omezování hlavních škodlivých složek pomocí kombinace stále se zpřísnujících předpisů nejen emisních limitů, ale také například kvality paliv, a nových technologií, které tyto limity umožnily převést do praxe. [2]

V současnosti jsou tyto limity poměrně přísné a nová vozidla je jsou schopna plnit pouze se speciálními systémy, jež slouží k likvidaci škodlivin. To ovšem znamená, že jakákoliv odchylka od ideálních provozních podmínek může vyústit ve výrazné snížení účinnosti jejich likvidace, což neomylně vede k řádovému nárůstu koncentrace vypouštěných škodlivin. Nemluvě o tom, že může dojít k poruchám těchto systémů nebo dokonce k úmyslné manipulaci za účelem jejich vyřazení. S tím se pojí statistika, podle níž je pouhé 1 % vozidel se vznětovým motorem zodpovědných za 18 % celkových emisí oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a asi 10 % flotily způsobuje až 90 % celkových emisí pevných částic. [2] [3] [4]

Z toho vyplývá, že je třeba tyto vysoké znečišťovatele odhalit, nejlépe během skutečného provozu, a donutit je k nápravě, potažmo je úplně eliminovat. A zde přichází do hry dálkové měření emisí, které je i přes své nedostatky zdrojově a časově nejvýhodnějším způsobem vyhodnocení emisí velkého množství projíždějících vozidel v relativně krátkém čase. Navíc na zdokonalení této metody se stále pracuje, s čímž souvisí i konání různých testovacích měření po celé Evropě v rámci evropského projektu City Air Remote Emissions Sensing (dále CARES), které by měly pomoci nalézt limity této metody a tím stanovit vhodné podmínky měření, při nichž lze získat korektní a dostatečně přesné výsledky.



Kromě obecného shrnutí problematiky emisí ze spalovacích motorů a stručného představení možností měření emisí za provozu včetně několika různých koncepcí je právě analýza dat z takového měření hlavním předmětem této diplomové práce, přičemž výsledkem by mělo být kritické zhodnocení podmínek, za kterých je měření proveditelné s ohledem na mnoho parametrů, jež mohou ovlivnit výsledky. Cílem je tedy najít praktické limity této metody.

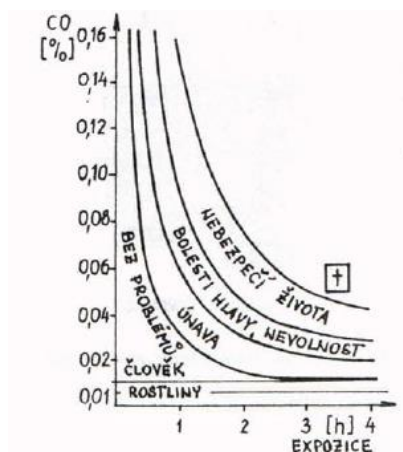


## 2 Problematika emisí

Pro porozumění řešené problematice je nezbytné být seznámen s nejčastějšími škodlivinami a orientovat se v základech principu jejich tvorby a možných opatření k jejich snížení. Proto je na začátek práce zařazena právě tato kapitola.

Automobilové emise lze teoreticky rozdělit do 3 kategorií – emise z otěrů, z vypařování a z výfukových plynů. Emise z otěru, jak název napovídá, jsou způsobeny třením a korozí jednotlivých dílů. Hlavními škodlivinami jsou pevné částice a v nich obsažené těžké kovy. Nejzásadnějším zdrojem jsou spojka, brzdy a pneumatiky. Emise z vypařování jsou produktem výparů z palivového systému obsahujících různé uhlovodíky. Kvůli jejich těkavosti mohou být emitovány vždy, když je v nádrži palivo čili dokonce i bez chodu motoru. A v neposlední řadě to jsou emise výfukových plynů, jež jsou podrobněji popsány níže, jelikož se z převážné většiny právě jimi zabývá v této práci popsané dálkové měření. [2]

Vlivem nemožnosti dokonalého spalování uhlovodíkových paliv vznikají ve spalovacích motorech škodliviny, které jsou následně vypouštěny do ovzduší. Celkem je to více než 1000 různých složek jednotlivých škodlivých látek, ovšem legislativa se zaměřuje pouze na ty hlavní, které budou blíže představeny později. Platí, že u všech škodlivých vlivů je důležitá nejen koncentrace polutantů, ale též místo působení a doba expozice škodlivé látky (obr. 1). Samozřejmě výsledné složení škodlivin ve výfukových plynech je závislé na typu spalovacího motoru, jeho stavu, také na provozních podmínkách spalování a v dnešní době hrají velmi významnou roli i zařízení pro dodatečnou likvidaci škodlivin za motorem. [2] [5] [6]

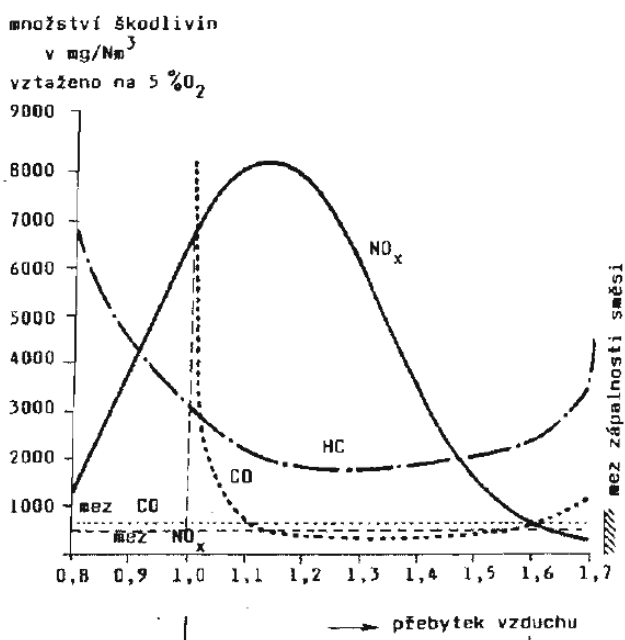


Obr. 1 - Působení CO na člověka [6]

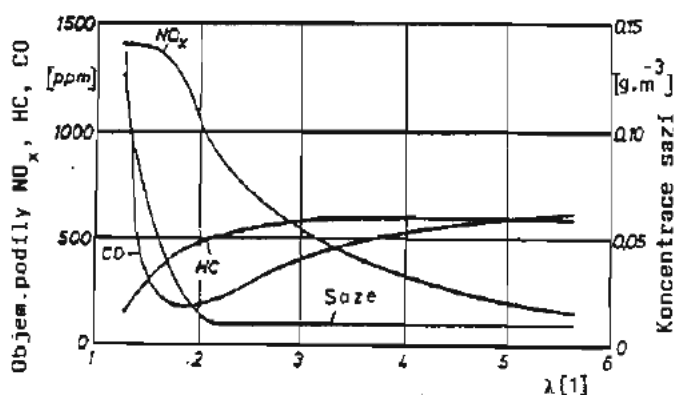


## 2.1 Přehled hlavních limitovaných škodlivin

Základní škodliviny a ty, kterým se věnuje největší pozornost, jsou  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$  a u vznětových motorů a zážehových motorů s přímým vstřikem ještě pevné částice. Jejich koncentrace ve výfukových plynech jsou závislé především na součiniteli přebytku vzduchu  $\lambda$ , jak je dobře patrné z obrázků 2 a 3. Podrobnější informace o jednotlivých složkách včetně mechanismu vzniku a působení na okolí jsou v následujících podkapitolách. Vedle nich jsou ještě určité složky emisí jako  $\text{Pb}$  nebo  $\text{SO}_2$ , které jsou limitovány nepřímo, a to prostřednictvím požadavků na složení paliva. [5] [6]



Obr. 2 - Závislost hlavních škodlivin v závislosti na  $\lambda$  – zážehový motor [5]



Obr. 3 - Závislost hlavních škodlivin v závislosti na  $\lambda$  – vznětový motor [5]

### 2.1.1 Oxid uhelnatý CO

Vzniká především při spalování bohatých směsí s nedostatkem kyslíku, tedy u zážehových motorů, podle následující rovnice:



kde hraje klíčovou roli  $\text{OH}$  radikál, který při nedostatku kyslíku chybí, kvůli čemuž se nestihne tvořit  $\text{CO}_2$ . Dalšími mechanismy vzniku jsou disociace  $\text{CO}_2$  u chudých směsí při vysokých teplotách během spalování nebo tzv. zamrznutí obsahu  $\text{CO}$  ve výfukových plynech během rychlého poklesu teploty. [6] [7]



Sám o sobě je bezbarvý a bez zápachu, blokuje přenos kyslíku krví, jelikož se rychle váže na hemoglobin. Jeho účinek je navíc zvýšen za vyšších koncentrací CO<sub>2</sub>. [5]

### 2.1.2 Oxid uhličitý CO<sub>2</sub>

Oproti oxidu uhelnatému je hodnota CO<sub>2</sub> největší při stechiometrickém poměru ( $\lambda=1$ ), jelikož oxid uhličitý je produkt dokonalého spalování. Není jedovatý, jeho hodnota má značnou vypovídající hodnotu o stavu motoru a také o spotřebě paliva, protože jeho množství lze redukovat pouze omezením množství spáleného paliva. Je také bez chuti a bez zápachu, pro člověka je nebezpečný pouze v takové koncentraci, při níž by vytěsňoval z dýchacího ústrojí kyslík. Zásadní negativní vliv má ovšem na životní prostředí, jelikož se jedná o druhý nejúčinnější skleníkový plyn podle množství podílu po vodní páře. [6] [8]

### 2.1.3 Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>

Oxidy dusíku NO<sub>x</sub> jsou zastřešujícím označením pro širokou škálu dusíkatých sloučenin. Z hlediska škodlivin ve výfukových plynech se uvažují NO, NO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub>O, přičemž ten následující je ve výsledném oblaku zastoupen vždy přibližně o řád méně než ten předchozí. Největší podíl tak má právě oxid dusnatý NO, jenž z převážné části vzniká pomalými reakcemi tzv. Zeldovičova mechanismu, který doplnil Lavoie třetí rovnicí zohledňující obsah radikálů při spalování uhlovodíků: [5] [7]



Právě hydroxylový radikál OH s vysokou chemickou aktivitou je velmi důležitý pro zdárné proběhnutí reakce, stejně jako dostatečně vysoká teplota (alespoň 1700 K), přičemž platí, že není důležitá pouze teplota plamene, ale také další teplotní historie spalin v určitém místě. Nejvyšších teplot se během spalování dosahuje při mírně bohatých směsích, ovšem v takovém případě relativně pomalá reakce vzniku NO naráží na nedostatek kyslíku. Z toho důvodu je maximum tvorby NO při mírně chudé směsi ( $\lambda \approx 1,1$ ). [5]

Díky charakteru směsi jsou u zážehových motorů emise NO celkem vysoké, ale emise NO<sub>2</sub> velmi nízké. To se trochu mění u vznětových motorů, jež díky výrazně méně



homogennímu teplotnímu poli produkují, především tedy při nízkých otáčkách a zatíženích, více  $\text{NO}_2$  (přesto je běžný podíl  $\text{NO}_2$  v  $\text{NO}_x$  v řádu jednotek procent). Platí, že pro vznětové motory jsou právě oxidy dusíku nejzávažnější plynou škodlivinou. Ve vysokých koncentracích mají totiž negativní dopady jak na životní prostředí, jelikož oxidy dusíku obecně bývají součástí kyselých dešťů a také přispívají k tvorbě přízemního ozonu, tak i na lidské zdraví, kdy expozice vyšším koncentracím  $\text{NO}_x$ , zejména  $\text{NO}_2$ , může způsobit respirační problémy a vést k závažným zdravotním problémům. Oxid dusný  $\text{N}_2\text{O}$  je navíc jedním ze skleníkových plynů. A protože je silniční doprava z více než 50 % zodpovědná za člověkem vytvořené emise oxidů dusíku, není divu, že jsou tyto látky omezovány příslušnými normami. [7] [9]

#### **2.1.4 Nespálené uhlovodíky HC**

Do této kategorie spadají všechny organické těkavé látky. Vznikají v lokálních místech s nízkou teplotou plamene a s pomalou rychlostí hoření vlivem příliš chudé nebo bohaté směsi, jako jsou hlavně štěrby mezi pístem, pístními kroužky a stěnou válce. Další příčinou vzniku nespálených uhlovodíků je také vytrhávání kapek oleje z olejového filmu na stěně válce a tím pronikání oleje dále do spalovacího prostoru. [6] [7]

U vznětových motorů je jejich tvorba mírně odlišná kvůli rozdílnému tvoření směsi a jinému chemickému složení paliva, přičemž dnes platí, že u běžně pracujícího dieselového motoru jsou hodnoty nespálených uhlovodíků výrazně nižší než u motorů zážehových. [7]

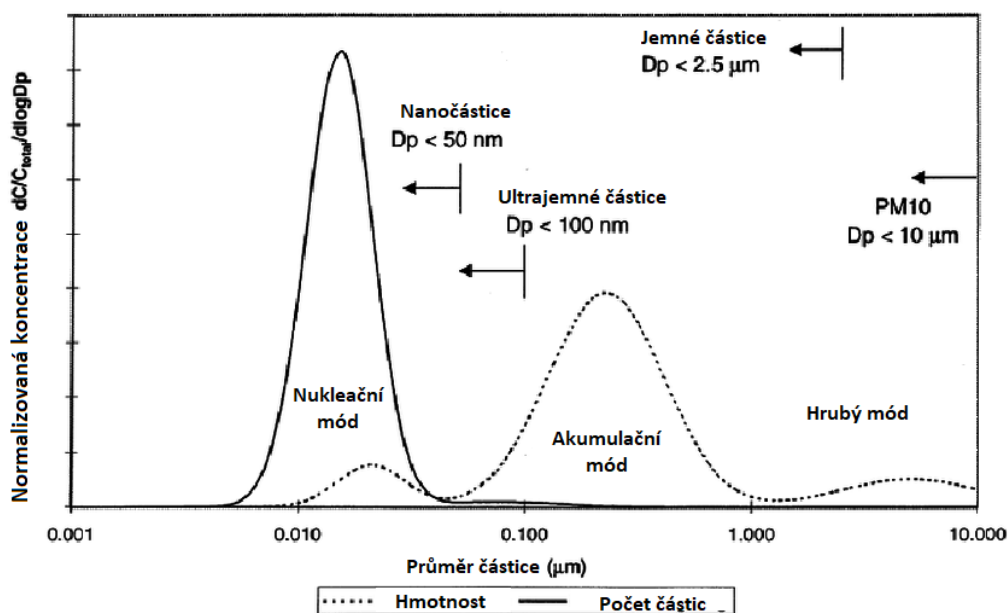
Jelikož se jedná o souhrnné označení více než 200 různých sloučenin, jsou mezi nimi jak neškodné látky jako alkany a alkeny, tak i vysoce nebezpečné až karcinogenní látky, jako jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), které nejenže mohou způsobovat tvorbu nádorů, ale také mohou ohrozit správný vývoj ještě nenarozeného plodu. [5] [10]

#### **2.1.5 Pevné částice**

Základem pevných částic (PM) je jádro z čistého uhlíku, které je často nazýváno jako saze kvůli tomu, že může tvořit charakteristický černý kouř. Vdechnutí takového jádra není samo o sobě příliš škodlivé, ale to má ještě jednu nepříjemnou schopnost, a to je navázat na sebe další částice. Toto je právě největší nebezpečí PM, jelikož na jejich uhlíkovém jádře mohou být navázány škodlivé uhlovodíky, jež jsou tak právě díky těžkému jádru schopné se dostat do vzduchu. Nejnebezpečnější jsou pevné částice o poloměru



menším než 20 nm, které se mohou dostat přímo do krve. A jak je vidět na obrázku 4, převážný počet emitovaných PM je právě podobných rozměrů. K tomu je ještě třeba dodat, že jejich negativní efekt je navíc zesilován přítomností oxidů dusíku. [7]



Obr. 4 - Rozdělení koncentrace pevných částic podle velikosti [11] (přeloženo)

Saze jsou tvořeny za vysokých teplot při velmi malých přebytecích vzduchu či při lokálním nedostatku vzduchu tepelným rozkladem neodpařeného paliva, přičemž jejich tvorba se zvětšuje s klesajícím součinitelem přebytku vzduchu. Samotné reakce tvorby sazí jsou složité a pomalé, problém představují především u motorů s vnitřní tvorbou směsi, tedy u motorů vznětových a v poslední době také přímovstříkových zážehových motorů. [5] [6]

## 2.2 Opatření k omezení škodlivin

Obecně lze rozdělit opatření k omezení škodlivin ve výfukových plynech spalovacího motoru na opatření před motorem, které mají zajistit co nejjemnější rozprašení a tím i co nejrychlejší odpaření paliva a tím tvorbu více homogenní směsi paliva se vzduchem, k čemuž je rovněž důležité sledovat vlastnosti paliva, dále na opatření přímo ve válci motoru, a především na dodatečná opatření za motorem. [6]

### 2.2.1 Opatření u motoru

Základní cíl opatření před motorem už byl nastíněn výše, a tak se dostáváme rovnou k přehledu opatření přímo u motoru. Ovlivňování průběhu spalování umožňuje snižovat



především emise nespálených uhlovodíků zejména díky potlačování tzv. zhášecích zón, kde typicky vznikají, a oxidů dusíku prostřednictvím snížení teploty spalování. Samozřejmě platí, že nelze využít jediný univerzální prostředek pro požadované snížení všech základních škodlivin, je třeba jednotlivá opatření vhodně nakombinovat. [6]

A mezi tato opatření patří: [6]

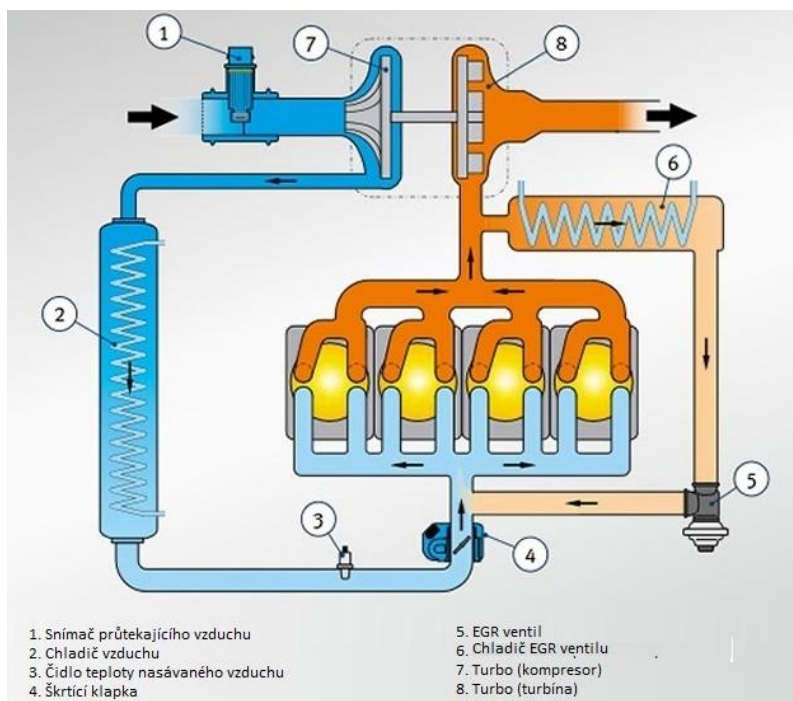
- snížení kompresního poměru, což má za následek snížení maximálních teplot, díky čemuž dochází k redukci oxidů dusíku plus se příznivě projevuje likvidací HC v okolí stechiometrické směsi, to celé ovšem za cenu snížení výkonu a tepelné účinnosti
- zmenšování předstihu zapalování, což má za následek pokles maximální teploty (výhodné z hlediska  $\text{NO}_x$ ) a zároveň stoupající teplotu výfukových plynů (výhodné z hlediska HC), na druhou stranu ale dochází ke zhoršení termické účinnosti a růstu měrné spotřeby
- vrstvení směsi s rozdílným přebytkem vzduchu v různých částech spalovacího prostoru, což může mít také za následek snížení obou již zmíněných škodlivin
- především recirkulace výfukových plynů, čímž je možné poměrně výrazně snížit emise  $\text{NO}_x$  a navíc lehce zvýšit účinnost motoru (u zážehových motorů je recirkulací výfukových plynů při částečných zatíženích snížena potřeba škrcení)

Recirkulovat určité množství výfukových plynů je výhodné proto, jelikož obsahují malé množství  $\text{O}_2$ , díky čemuž je lze považovat za plyny inertní, tedy nezúčastňující se žádné reakce. Po smísení s čerstvou směsí se tak neúčastní spalování, přejímají teplo a tím snižují maximální teplotu, přičemž rozlišujeme recirkulaci vnitřní a vnější. [6]

Vnitřní recirkulace probíhá čistě v rámci prostoru válce, kdy jsou výfukové plyny tlačeny zpět do sacího kanálu výtlačným pohybem pístu. Tento jev je závislý na velikosti úhlu překrytí otevření sacího a výfukového ventilu. Ten se ovšem nemůže libovolně navyšovat, protože by došlo ke zhoršení stability chodu motoru. Navíc k dosažení požadované minimalizace emisí  $\text{NO}_x$  vnitřní recirkulace obvykle nestačí, kvůli čemuž se rozšířila recirkulace vnější. [6]

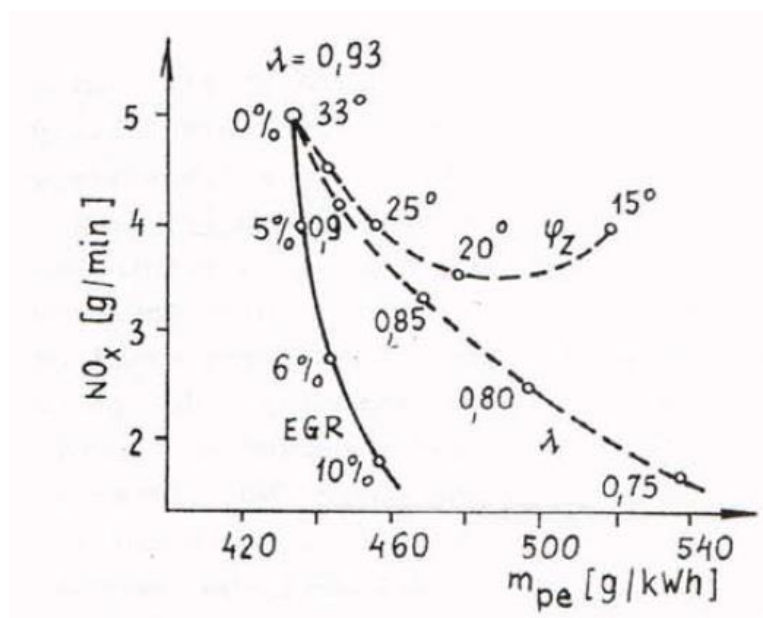
Princip vnější recirkulace spalin je patrný z obrázku 5. Přes EGR ventil, který je dnes většinou ovládán elektromotorem se šoupátkem na základě informací od řídicí jednotky motoru, je část výfukových spalin před turbínou turbodmychadla vrácena zpět do sání za kompresor. [6] [12]





Obr. 5 - Princip funkce EGR u přeplňovaného motoru [12]

Recirkulující množství spalin je označováno EGR %, v závislosti na míře recirkulace je i přes mírné zvýšení vylučovaných nespálených uhlovodíků možné dosáhnout snížení emisí oxidů dusíku až o polovinu, přičemž přibližně do EGR 10 % není třeba počítat s výrazným zvýšením měrné spotřeby. Z následujícího grafu (obr. 6) je patrné, že právě vnější recirkulace je v závislosti na měrné spotřebě nejvýhodnější variantou pro redukcí  $\text{NO}_x$ , i když je třeba jej brát spíše ilustrativně, protože dnes se dostáváme na mnohem menší hodnoty měrné spotřeby  $m_{pe}$ . [6]



Obr. 6 - Vliv různých opatření u motoru na redukcí  $\text{NO}_x$  [6]



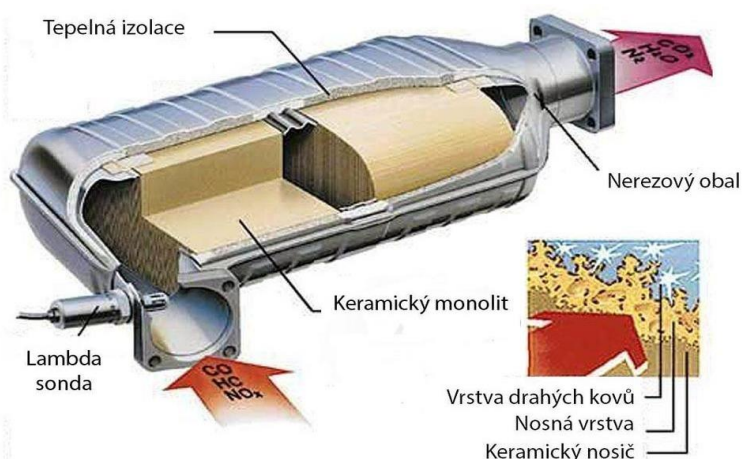
## 2.2.2 Opatření za motorem

Díky velice přísným emisním požadavkům je dnes nutné přidat za motor ještě tzv. aftertreatment systémy, které dodatečně likvidují škodliviny ve výfukových plynech. Vedle recirkulace spalin je tedy u zážehových motorů už nezbytný tzv. trojcestný katalyzátor (a u moderních přímovstříkových motorů i filtr pevných částic DPF), vznětové motory se oproti tomu neobejdou bez oxidačního katalyzátoru, SCR systému a filtru pevných částic.

### 2.2.2.1 Trojcestný katalyzátor

Nejdříve je třeba ujasnit názvosloví, jelikož vžitě označení tohoto zařízení je nepřesné vlivem chybného překladu z anglického označení Three Way Catalyst (TWC). Správným překladem by měl totiž být katalytický konvertor či reaktor, jelikož katalyzátor je označení aktivní látky, která urychluje probíhající chemické reakce, ovšem sama se jich neúčastní. [6]

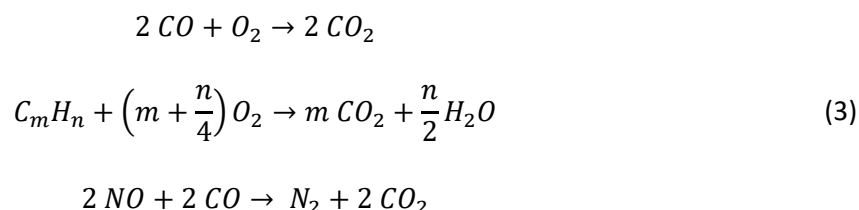
Pro případ likvidace škodlivin je nezbytně nutné, aby požadované reakce probíhaly co nejrychleji, s čímž souvisí požadavek na vysokou chemickou aktivitu katalyzátoru, dokonce i při nižších teplotách. Toho jsme schopni dosáhnout použitím ušlechtilých kovů jako platina, palladium či rhodium, což ale celkem výrazně zvyšuje cenu tohoto zařízení. S ohledem na snahu o vytvoření co největší aktivní plochy v katalytickém reaktoru se tyto prvky nanášejí na vnější povrch dvou tzv. nosičů, monolitů připomínajících včelí plástve z chemicky inertních materiálů. Toto celé je poté uzavřeno do plechového obalu, jak je i dobře vidět na obrázku 7. Pro správnou funkci reaktoru navíc není důležitá pouze plocha aktivní hmoty, ale také rychlost zahřátí na provozní teplotu, protože pouze při ní má požadovanou účinnost (kolem 95 %). [6] [13]



Obr. 7 - Řez trojcestným katalytickým reaktorem [13] (přeloženo)

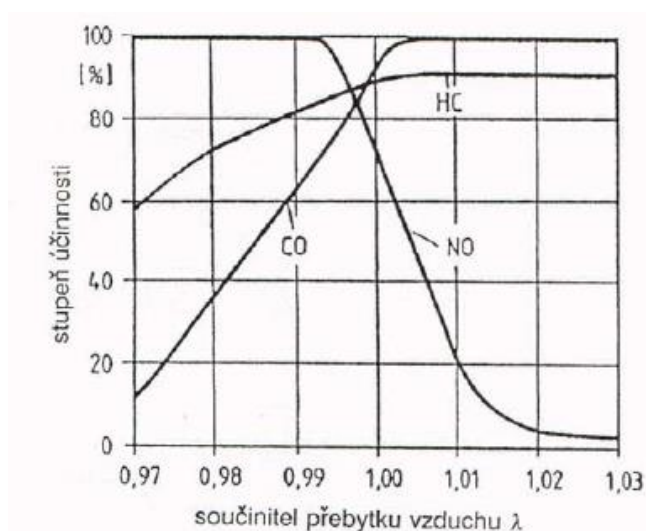


Katalytický reaktor používaný u zážehových motorů není trojcestný proto, že by jím vedly tři rozdílné cesty, ale nazývá se tak, jelikož neutralizuje všechny tři hlavní škodliviny – tedy CO, NO<sub>x</sub> a HC. A činí tak pomocí těchto základních reakcí:



kde první dvě reakce, tedy snižování koncentrace oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků, probíhají ideálně při dostatku kyslíku, kdežto při dodatečné redukci NO je velké množství kyslíku nežádoucí. Z toho vyplývá, že je velmi důležité regulovat součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ , jelikož tyto reakce probíhají najednou a celý proces je poměrně složitý. [6] [13]

Ten je nutné udržovat ve velice úzkém pásmu kolem hodnoty  $\lambda \approx 1$ , jen v tom případě je totiž reaktor schopen neutralizovat všechny škodliviny, jak je patrné z obrázku 8. Toho lze docílit pouze při použití uzavřeného regulačního okruhu s řízením výsledného směšovacího poměru pomocí elektrického signálu čidla obsahu kyslíku ve výfukových plynech – tzv.  $\lambda$  – sondy. [6]



Obr. 8 - Vliv součinitele přebytku vzduchu na účinnost trojcestného katalytického reaktoru [6]

### 2.2.2.2 Oxidační katalyzátor

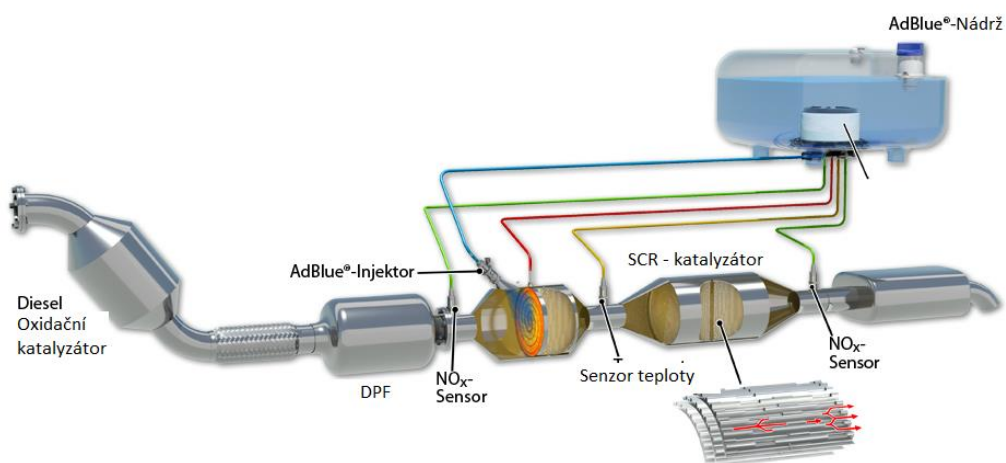
Oxidační katalytický reaktor se dnes používá u vznětových motorů, protože ty pracují s vysokým přebytkem vzduchu. Z toho důvodu nemají problém zajistit první 2



reakce ze vztahu (3), tedy neutralizaci CO a HC s asi 90% účinností. Navíc v něm při vysoké teplotě může docházet k dodatečnému spalování polotěkavých látek usazených na pevných částicích ve výfukových plynech díky přebytečnému kyslíku. Likvidaci NO<sub>x</sub> už je ale třeba řešit dalším zařízením, přičemž dnes je nejčastějším řešením tzv. selektivní katalytická redukce (SCR). [14]

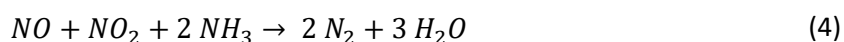
### 2.2.2.3 SCR systém

Zkratka SCR označuje systém čištění spalin vznětových motorů pomocí selektivní katalytické redukce od přebytečných emisí oxidů dusíku. Princip je vidět na obrázku 9, do výfukového potrubí je vestavěn speciální keramický katalyzátor, před který je vstříkováno speciální aditivum, jež je asi nejznámější pod obchodním názvem AdBlue. [15] [16]



Obr. 9 - Princip SCR [16] (přeloženo)

Tento 32,5% vodný roztok močoviny se vstříkne přímo do horkých spalin, což vede k rozkladu močoviny na CO<sub>2</sub> a amoniak (NH<sub>3</sub>). To je velice důležité, protože bez dostatečné teploty spalin nelze dosáhnout optimálních výsledků. Amoniak následně v SCR katalyzátoru reaguje s NO<sub>x</sub> dle rovnice (4) za vzniku dusíku a vodní páry:

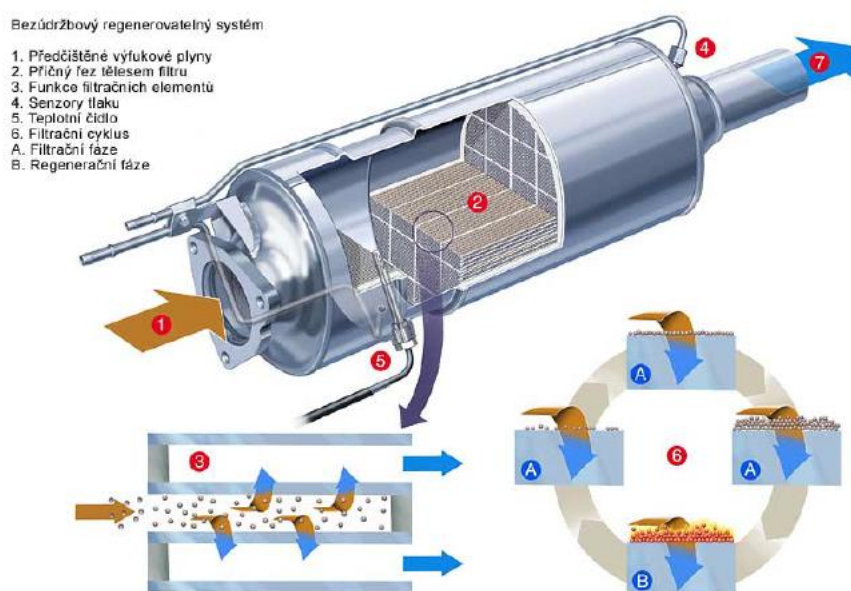


Tento systém je schopen v průměru snížit emise NO<sub>x</sub> o 80 % a v případě těžkých vozidel dokonce i více, což z něj dělá nejúčinnější způsob likvidace škodlivin oxidů dusíku u vozidel se vznětovými motory. [15] [16]



## 2.2.2.4 Filtr pevných částic

Poslední významnou a sledovanou škodlivinou jsou pevné částice. Pro minimalizaci jejich průniku do ovzduší jsou již při současných emisních limitech nutností filtry pevných částic (DPF). Jejich provedení je velmi podobné katalyzátorům (obr. 10), filtrace probíhá prakticky výhradně na fyzikálních principech, a to převážně prostřednictvím difuze (menší částice) nebo impakce (větší částice) či jednoduše tím, že částice fyzicky neprojdou póry v tělese filtru. [7]



Obr. 10 - Řez DPF systémem [15]

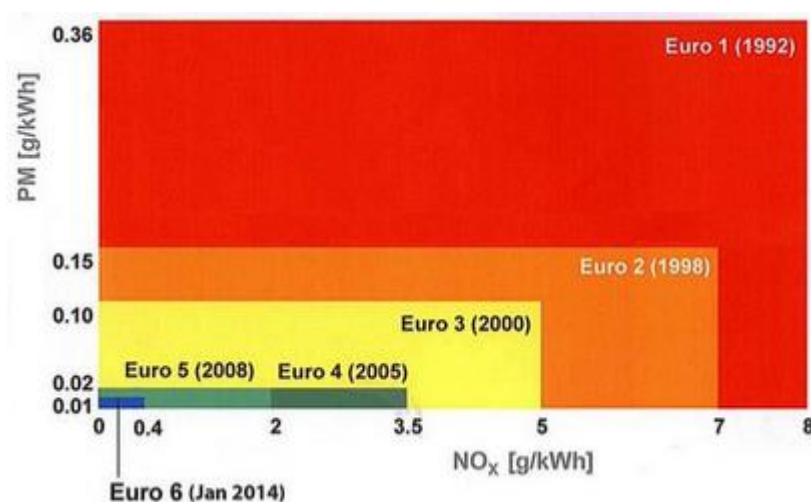
Její konstrukce je dána požadavkem co nejnižší ceny a hydraulických odporů, jelikož zařazení filtru pevných částic do výfukového systému samozřejmě znamená určitou tlakovou ztrátu. Ta se navíc zvětšuje postupným ukládáním částic do jednotlivých kanálků, kvůli čemuž je nutná pravidelná regenerace. Dle principu lze rozdělit proces regenerace na pasivní a aktivní. K pasivní regeneraci dochází, pokud motor pracuje po delší dobu v režimu vyššího zatížení. V tom případě pak mají výfukové plyny teplotu vyšší, než je teplota potřebná ke vznícení pevných částic (okolo 600 °C). Tuto teplotu lze snížit třeba katalyzátory přidanými do paliva (např. ferrocen), katalytickou vrstvou ušlechtilých kovů (např. mangan) nebo pomocí NO<sub>2</sub>, jenž vzniká oxidací NO v oxidačním katalyzátoru. Aktivní regenerace je poté nutná v případě, kdy během provozu nenastanou vhodné podmínky k regeneraci pasivní, ať už z důvodu krátkých tras po městě nebo provozu v nízkém zatížení motoru. Její zahájení určuje řídicí jednotka motoru, která může do motoru dodat větší množství nafty pozdním vstřikem během expanze, než je obvyklé při běžném chodu motoru, v důsledku



čehož palivo dohořívá až ve výfukovém systému a tím dochází k dostatečnému zvýšení teploty pro vypálení naakumulovaných částic. [6] [15]

## 2.3 Emisní standardy

Emise výfukových plynů motorových vozidel se začaly sledovat již krátce po konci druhé světové války, ovšem první normativní omezení předepisující povolené emisní limity byla vydána v roce 1967 v americkém státě Kalifornie. První evropská norma na sebe nenechala dlouho čekat, v roce 1971 vstoupila v platnost vyhláška EHK 15. První emisní norma s označením Euro, jak ji známe dnes, přišla v roce 1992 a byla postupně nahrazována stále striktnějšími emisními standardy, jak je výmluvně ilustrováno na obrázku 11, přičemž nyní je v Evropě v platnosti norma Euro 6d a netrpělivě se očekává ohlášení nové Euro 7. [2] [17] [18]



Obr. 11 - Vývoj emisních předpisů v čase – vznětové motory [19] (přeloženo)

Konkrétní limity jednotlivých norem jsou v následujících tabulkách, je z nich patrný postupný vývoj legislativy nejen ve formě již zmiňovaného výrazného snížení jednotlivých limitů, ale také ve formě většího počtu sledovaných látek. Lze si též všimnout, že se limity liší dle typu pohonné jednotky a druhu vozidla, tedy dělení na vozidla se zážehovým a vznětovým motorem a na běžná osobní auta, jednostopá vozidla (kategorie L), lehká nákladní auta (kategorie N1 a N2) a v neposlední řadě řeší motory těžkých vozidel. Tyto emisní standardy jsou většinou vyjádřeny v gramech na ujetý kilometr (g/km), jedinou výjimku představují těžká vozidla nad 3,5 tuny a nesilniční motory, u nichž se emise vyjadřují v gramech na kilowatthodinu vynaložené energie (g/kWh). [20]



Tabulka 1 - emisní Euro normy pro osobní auta [20]

Osobní auta (kategorie M)							
Norma	Rok 1. zavedení	CO	HC	HC + NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	PN
		[g/km]					
Vznětové motory							
Euro 1	1992	2,72	-	0,97	-	0,14	-
Euro 2	1996	1,0	-	0,7	-	0,08	-
Euro 3	2000	0,66	-	0,56	0,5	0,05	-
Euro 4	2005	0,5	-	0,3	0,25	0,025	-
Euro 5a	2009	0,5	-	0,23	0,18	0,005	-
Euro 5b	2011	0,5	-	0,23	0,18	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
Euro 6	2014	0,5	-	0,17	0,08	0,045	6·10 <sup>11</sup>
Zážehové motory							
Euro 1	1992	2,72	-	0,97	-	-	-
Euro 2	1996	2,2	-	0,5	-	-	-
Euro 3	2000	2,3	0,2	-	0,15	-	-
Euro 4	2005	1,0	0,1	-	0,08	-	-
Euro 5a	2009	1,0	0,1	-	0,06	0,005	-
Euro 5b	2011	1,0	0,1	-	0,06	0,0045	-
Euro 6	2014	1,0	0,1	-	0,06	0,0045	6·10 <sup>11</sup>

Tabulka 2 - emisní Euro normy pro jednostopá vozidla [20]

Motorová vozidla zpravidla s méně než čtyřmi koly (kategorie L)						
Norma	Rok 1. zavedení	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	Nemetanové uhlovodíky (NMHC)
		[g/km]				
Euro 1	1999	13	3,0	0,3	-	-
Euro 2	2003	5,5	1,0	0,3	-	-
Euro 3	2006	2,0	0,3	0,15	-	-
Euro 4	2016	1,14	0,17	0,09	-	-
Euro 5	2020	1,0	0,1	0,06	0,0045	0,068



Tabulka 3 - emisní Euro normy pro lehká nákladní vozidla se vznětovým motorem [20]

Lehká nákladní auta (kategorie N1 a N2) – vznětové motory							
Norma	Rok 1. zavedení	CO	HC	HC + NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	PN
		[g/km]					[1/km]
Kategorie N1 I. třída ≤ 1 305 kg							
Euro 1	1993	2,72	-	0,97	-	0,14	-
Euro 2	1997	1,0	-	0,7	-	0,08	-
Euro 3	2000	0,64	-	0,56	0,5	0,05	-
Euro 4	2005	0,5	-	0,3	0,25	0,025	-
Euro 5	2009	0,5	-	0,23	0,18	0,005	6·10 <sup>11</sup>
Euro 6	2014	0,5	-	0,17	0,08	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
Kategorie N1 II. třída (1 305 ÷ 1 760) kg							
Euro 1	1993	5,17	-	1,4	-	0,19	-
Euro 2	1998	1,25	-	1,0	-	0,12	-
Euro 3	2001	0,8	-	0,72	0,65	0,07	-
Euro 4	2006	0,63	-	0,39	0,33	0,04	-
Euro 5	2010	0,63	-	0,295	0,235	0,005	6·10 <sup>11</sup>
Euro 6	2015	0,63	-	0,195	0,105	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
Kategorie N1 III. Třída + kategorie N2 (1 760 ÷ 3 500) kg							
Euro 1	1993	6,9	-	1,7	-	0,25	-
Euro 2	1998	1,5	-	1,2	-	0,17	-
Euro 3	2001	0,95	-	0,86	0,78	0,1	-
Euro 4	2006	0,74	-	0,46	0,39	0,06	-
Euro 5	2010	0,74	-	0,35	0,28	0,005	6·10 <sup>11</sup>
Euro 6	2015	0,74	-	0,215	0,125	0,0045	6·10 <sup>11</sup>





Tabulka 4 - emisní Euro normy pro lehká nákladní vozidla se zážehovým motorem [20]

Lehká nákladní auta (kategorie N1 a N2) – zážehové motory								
Norma	Rok 1. zavedení	CO	HC	NMHC	HC + NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	PN
		[g/km]						[1/km]
Kategorie N1 I. třída ≤ 1 305 kg								
Euro 1	1993	2,72	-	-	0,97	-	-	-
Euro 2	1997	2,2	-	-	0,5	-	-	-
Euro 3	2000	2,3	0,2	-	-	0,15	-	-
Euro 4	2005	1,0	0,1	-	-	0,08	-	-
Euro 5	2009	1,0	0,1	0,068	-	0,06	0,005	-
Euro 6	2014	1,0	0,1	0,068	-	0,06	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
Kategorie N1 II. třída (1 305 ÷ 1 760) kg								
Euro 1	1993	5,17	-	-	1,4	-	-	-
Euro 2	1998	4,0	-	-	0,6	-	-	-
Euro 3	2001	4,17	0,25	-	-	0,18	-	-
Euro 4	2006	1,81	0,13	-	-	0,1	-	-
Euro 5	2010	1,81	0,13	0,09	-	0,075	0,005	-
Euro 6	2015	1,81	0,13	0,09	-	0,075	0,0045	6·10 <sup>11</sup>
Kategorie N1 III. třída + kategorie N2 (1 760 ÷ 3 500) kg								
Euro 1	1993	6,9	-	-	1,7	-	-	-
Euro 2	1998	5,0	-	-	0,7	-	-	-
Euro 3	2001	5,22	0,29	-	-	0,21	-	-
Euro 4	2006	2,27	0,16	-	-	0,11	-	-
Euro 5	2010	2,27	0,16	0,108	-	0,082	0,005	-
Euro 6	2015	2,27	0,16	0,108	-	0,082	0,0045	6·10 <sup>11</sup>



Tabulka 5 - emisní Euro normy pro motory těžkých vozidel [20]

Motory těžkých vozidel (kategorie N3 a M3)								
Norma	Rok 1. zavedení	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	NH <sub>3</sub>	PN	kouřivost
		[g/kWh]				[ppm]	[1/kWh]	[m <sup>-1</sup> ]
Euro I	1992 < 85 kW	4,5	1,1	8,0	0,612	-	-	-
	1992 > 85 kW	4,5	1,1	8,0	0,36	-	-	-
Euro II	1995	4,0	1,1	7,0	0,25	-	-	-
	1997	4,0	1,1	7,0	0,15	-	-	-
Euro III	1999 (pouze tzv. EEV motory)	1,5	0,25	2,0	0,02	-	-	0,15
	2000	2,1	0,66	5,0	0,1	-	-	0,8
Euro IV	2005	1,5	0,46	3,5	0,02	--	-	0,5
Euro V	2008	1,5	0,46	2,0	0,02	-	-	0,5
Euro VI	2012 – cyklus WHSC	1,5	0,13	0,4	0,01	10	8·10 <sup>11</sup>	-
	2012 – cyklus WHTC	4,0	0,16	0,46	0,01	10	6·10 <sup>11</sup>	-

Bohužel i přes to, že jsou Euro emisní standardy v platnosti 30 let, mnoho studií ukázalo, že množství oxidů dusíku emitovaných z dieselových vozidel za běžného provozu je mnohonásobně větší než povolená hodnota dle emisních limitů. Do roku 2017 totiž docházelo ke schvalování nových vozidel pouze na základě laboratorních testů za předem stanovených podmínek, které byly stanovené již nevyhovujícím cyklem NEDC (New European Driving Cycle). To umožnilo automobilkám připravit se na tyto speciálními režimy, díky kterým nová vozidla splnila požadavky, ovšem v provozu poté limity několikanásobně překračovala. [21] [22]

Reakcí na to byla jednak změna laboratorního testovacího cyklu NEDC na nový, známý pod označením WLTC/WLTP (Worldwide harmonised Light duty Test Cycle/Procedure), jenž lépe reflektuje reálný provoz vozidla, a jednak také zavedení měření emisí za jízdy vozidla (zkratka RDE – Real-Driving Emissions). Toto měření využívá přístroj PEMS (Portable Emission Measurement System), který sbírá emise přímo z výfuku zkoušeného vozu (obr. 12), který je řízen zkušebním řidičem po předem dané trati 90 až 120 minut. Tyto dvě změny vyústily v normu Euro 6d-temp, potažmo nyní platnou Euro 6d,



ve které platí, že při RDE testu nesmí emise překročit 1,5násobek předepsaného Euro 6 limitu. [21] [22]



*Obr. 12 - Ukázka zařízení PEMS [23]*

Výsledkem těchto změn by mělo být minimalizování rozdílů mezi emisemi naměřenými v laboratoři při homologaci a následně v běžném provozu. Nicméně stále je třeba situaci pozorně monitorovat, jelikož i RDE test je stále pouze normalizovaná zkouška, čili existuje možnost, že řídicí jednotka pozná, že jede tuto trasu a upraví podle toho chování motoru. Proto je dle posledního rámcového nařízení Evropské unie od září 2020 předepsána jednotlivým členským státům i Evropské komisi provádět nezávislá měření za provozu, aby se zajistilo, že provozovaná vozidla opravdu odpovídají emisním standardům. Ovšem vzhledem k časové a finanční náročnosti takového měření velkého množství vozidel přístrojem PEMS bylo třeba přejít k alternativnímu řešení, a tím je dálkové měření (anglicky Remote Sensing – RS), jehož popisu je zasvěcena následující kapitola. [21] [22]



## 3 Dálkové měření emisí

Jako dálkové měření je označována taková metoda, kdy měřící systémy nijak fyzicky nepůsobí na měřené vozidlo ani nemají vliv na způsob jeho jízdy. V praxi snímá okamžitou hodnotu emisí v určitý okamžik průjezdu měřeného vozidla, a to za provozu. Tím pádem je de facto v určitých aspektech opakem jak měření v laboratoři, tak i v kapitole 2.3 popsaného měření přístrojem PEMS, jelikož na rozdíl od nich nedokáže dálkové měření nasbírat velké množství dat konkrétního vozidla. Oproti nim ovšem dokáže změřit vzorky emisí tisíců vozidel za den, navíc s tou výhodou, že vozidlo nemůže poznat, že je právě testováno a tím ovlivnit výsledky měření. Je jasné, že dálkové měření nemůže samo o sobě plnohodnotně nahradit již zmíněné postupy, ale může je velmi výhodně doplnit tak, aby se minimalizovaly nedostatky všech metod. [24] [25]

### 3.1 Možnosti využití

Dálkové měření emisí má tak hned několik možných aplikací, které se dají rozčlenit do tří rozdílných okruhů.

První je monitorování vlivu automobilové dopravy na kvalitu ovzduší, tedy měření průměrných flotilových emisí různých typů vozidel s rozličnými emisními standardy, na různých místech a tím za rozdílných podmínek jízdy. Výsledky takovýchto měření poté mohou pomoci při tvorbě vhodné legislativy, která by nevyhovující kvalitu vzduchu měla řešit. [22] [24]

Druhý je poté shromažďování průměrných výfukových emisí jednotlivých výrobců vozidel, potažmo přímo modelů, a to za skutečného provozu ve statisticky reprezentativních vzorcích. Díky tomu je například možné sledovat vývoj účinnosti škodlivin ve výfukových plynech v čase či zaměřit se na výrobce, jejichž vozy jsou dlouhodobě nevyhovující. Dále to může být i významná informace pro potenciální zákazníky. [22] [24]

A v neposlední řadě je to měření jednotlivých projíždějících vozidel, díky čemuž lze odhalit přílišné znečišťovatele, kteří určitě nesplňují platné emisní limity a nadměrně znečišťují ovzduší. Nebo je možné naopak ukázat, že měřené vozidlo má všechny aftertreatment systémy v pořádku a umožnit majiteli vynechat pravidelnou technickou prohlídku, případně v budoucnu umožnit vjezd vozidla do center měst bez poplatků. [22] [24]



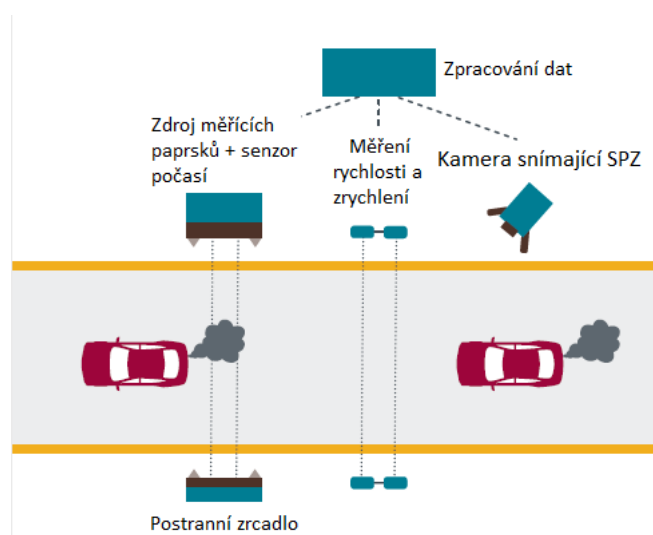
Získat takováto data v laboratoři nebo přístrojem PEMS by bylo jak časově, tak zdrojově velmi náročné, a právě dálkové měření emisí je jejich ekonomicky výhodným a efektivním doplňkem, který navíc nijak nenarušuje plynulost dopravy.

## 3.2 Základní metody

Rozlišují se dvě základní metody dálkového měření emisí. Tou první, která je známá už od 80. let 20. století a dnes stále převládá, je zjištění koncentrací škodlivin ve výfukovém oblaku pomocí spektrometrického měření s otevřenou dráhou paprsku, tou druhou je poté metoda odběru vzorku z blízkosti jízdní dráhy vozidla. [24]

### 3.2.1 Spektrometrické měření s otevřenou dráhou paprsku

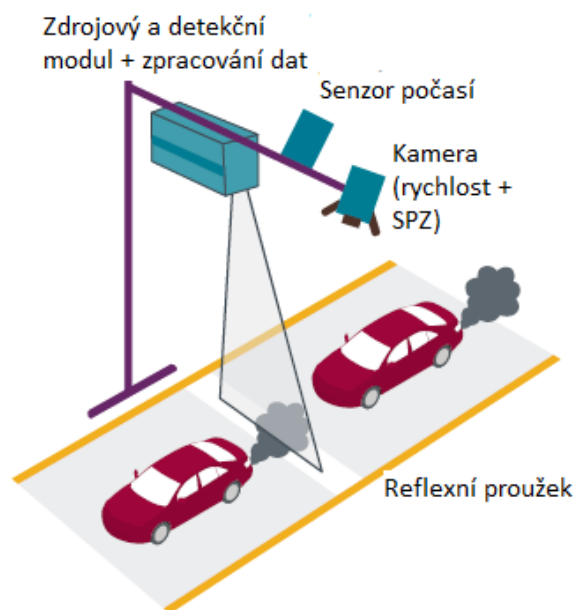
Spektrometrické měření pracuje, jak už napovídá sám název, na principu molekulární spektrometrie. Základní koncepce měřícího stanoviště je k vidění na obrázku 13, kde jsou patrné tři hlavní jednotky, jež mezi sebou musí spolupracovat. První slouží k samotnému měření koncentrací pevných částic a plyných složek ve výfukových plynech projíždějících vozů. K tomu jsou využívány paprsky infračerveného a ultrafialového světla namířené přes vozovku ve výšce ústí výfuku, přičemž dochází k absorpci na daných vlnových délkách díky molekulovým vazbám v měřených látkách, a přístroje tak jsou schopny následně snímat složení plyných emisí. Druhá poté slouží ke zjištění rychlosti a zrychlení měřeného vozidla a třetí je kamera snímající státní poznávací značku měřeného vozu, aby bylo možné zjistit další důležité informace jako rok výroby, objem motoru, typ paliva, emisní standardy nebo typ katalyzátoru. [22] [24]



Obr. 13 - Základní koncepce spektrometrického měření emisí [24] (přeloženo)



Jak už bylo zmíněno výše, takováto koncepce byla známá již ke konci 80. let minulého století, kdy s ní přišli Gary Bishop a Donald Stedman z univerzity v americkém Denveru [26]. Postupem času byl tento systém uveden na trh firmou Envirotest a v poslední době je spojen především se skupinou OPUS. V průběhu let také docházelo k vývoji různých vylepšení, přičemž asi tím nejvýraznějším je použití laserových paprsků jako zdroje světla, díky čemuž došlo k výraznému zvýšení vzorkovací frekvence až na 10 000 Hz. Takové technologie se využívá především při měření z místa nad vozovkou, jež je známé pod označením EDAR od společnosti HEAT (obr. 14). Výhodou tohoto řešení je možnost měření oblaků výfukových plynů v libovolné výšce na víceproudých silnicích. Oproti tomu je použití této technologie mnohem méně flexibilní než klasická koncepce, měřící místa musí mít dlouhodobější charakter. [24] [25]



Obr. 14 - Koncepce systému EDAR [24] (přeloženo)

### 3.2.2 Odběr vzorku z blízkosti jízdní dráhy

Během tohoto měření příslušné analyzátory nasávají přímo část oblaku výfukových plynů projíždějícího vozidla. Výhodou tak je, že přesnost tohoto přístupu je daná přesností použitých analyzátorů, navíc tato metoda umožňuje měření malých částic, jež jsou obtížně detekovatelné klasickým spektrometrickým měřením. Oproti tomu obecně platí, že tímto způsobem nejsme schopni naměřit tak velké množství vozidel za určitý čas jako původní spektrometrickou metodou. [24]



Odběr vzorku může v zásadě probíhat dvěma různými způsoby, jak je také patrné z obrázku 15. Buď jsou koncentrace měřeny pomocí tzv. plume chaser vozidla, což je vůz vybavený potřebnými analyzátoři, který se drží v provozu za zkoumaným vozidlem a tím získává vzorek zředěných výfukových plynů. Anebo je měřící stanoviště postavené na okraji vozovky a škodliviny jsou měřeny z blízkosti jízdní dráhy jednotlivých projíždějících vozidel. Právě tento postup odpovídá testovacímu měření, které je předmětem této práce, a tak bude ještě blíže představeno včetně detailnějšího popisu použitých analyzátorů. [24]



Obr. 15 - Schéma obou přístupů k měření metodou odběru vzorku [24] (přeloženo)

Stejně jako u spektrometrického měření i zde se objevují různá vylepšení, většinou související s omezením vlivu povětrnostních podmínek, jejichž nevypočitatelnost představuje jedno z největších rizik pro korektní provedení měření. Určité příklady jsou k vidění níže (obr. 16 a 17), ať už je to odběr vzorku z tunelu či ze speciálních stanů. [27] [28]



Obr. 16 - Ukázka odběru vzorku v tunelu [27]



Obr. 17 - Příklad použití stanu při měření [28]

### 3.3 Současná omezení

Ačkoliv je dálkové měření emisí velice zajímavá technologie s poměrně širokými možnostmi využití, tak má stále určité praktické limity, které ji brání využít naplno svůj potenciál a masivněji se rozšířit. Tyto omezení se týkají jak volby vhodné lokality pro



měření, tak použitých přístrojů a analyzátorů, potažmo samotného vyhodnocení naměřených dat. A právě nalezení těchto limitů a zhodnocení podmínek měření je předmětem této práce, a tak se je v následujících kapitolách pokusím přiblížit. [24]

### **3.3.1 Měřící místa**

Volba správného měřicího stanoviště je naprosto zásadní pro korektní průběh dálkového měření, jelikož určuje rozsah jízdních podmínek a zatížení pohonných jednotek projíždějících vozů. Pro získání validních dat je třeba, aby byl motor měřených vozidel pod zátěží, tedy aby jela alespoň konstantní rychlostí, v ideálním případě mírně zrychlovala. Toho se dá docílit umístěním měřicího stanoviště do mírného kopce, kde je minimalizováno riziko toho, že by řidič jel pouze na volnoběh. [22] [24]

Dále je třeba se vyhnout měření po studených startech, aby byly nejen motor, ale také aftertreatment systémy dostatečně zahřáté, a stejně tak je velmi problematické měření na mokré vozovce či v dešti nebo jiných nepříznivých povětrnostních podmínkách, jako je sníh nebo silný vítr. [22] [25]

Ovšem asi největším omezením pro volbu měřicího místa je požadavek na co nejplynulejší dopravu v jednom pruhu s určitými minimálními rozestupy mezi jednotlivými vozidly, protože jinak je velmi obtížné přiřadit konkrétní výfukový oblak určitému vozu, potažmo odhalit, zda naměřené koncentrace odpovídají emisím jednoho vozidla či jsou součtem hned několika průjezdů. Toto omezení částečně řeší již zmíněný systém EDAR, ale i ten pro získání reprezentativních vzorků vyžaduje určité rozestupy mezi vozidly. [24] [25]

### **3.3.2 Vyhodnocování dat**

Další překážkou po nalezení vhodného místa k provedení měření je samotné zpracování a vyhodnocení surových dat, kterých je obvykle velké množství, aby byly výsledky statisticky validní. Základem je správná příprava a kalibrace v určitých případech komplexních měřicích přístrojů a analyzátorů, které je třeba je umístit tak, aby byly co nejméně nápadné a neovlivňovaly tak provoz, ale aby odebraly pokud možno co nejkonzentrovanejší výfukové plyny. [22] [24]

Dalším krokem je časová synchronizace naměřených koncentrací k jednotlivým průjezdům, respektive kamerou zaznamenanému číslu registrační značky. To může být poměrně náročné, jelikož kromě samotného objemu dat se musí pracovat se





spolupracujícími přístroji, jež mají většinou rozdílné časové odezvy. Nemluvě o náročnosti samotného zpracování a vyhodnocení takového množství dat, což bude dále přiblíženo v následujících kapitolách. [22]

V neposlední řadě může být problematické získat specifikace jednotlivých vozidel na základě registrační značky, protože přístup k těmto informacím je ve většině případů omezován příslušnými úřady, přičemž v určitých zemích se k těmto údajům nedá dostat vůbec. [24]

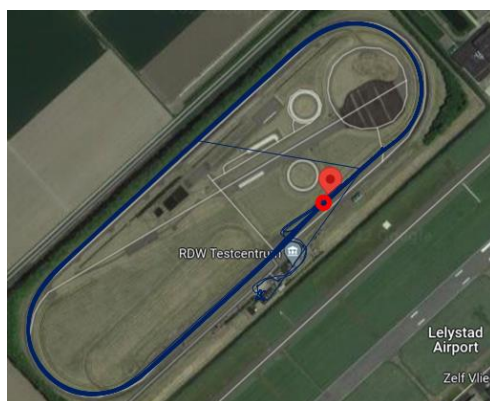


## 4 Testovací měření v Lelystadu

Kvůli nalezení výše popsaných limitů a lepšímu pochopení všech podmínek, za kterých je dálkové měření emisí proveditelné s hodnotnými výsledky, se po celé Evropě v rámci projektu City Air Remote Emissions Sensing (CARES) provádí různá experimentální testovací měření. A jelikož je analýza dat z takového měření předmětem této práce, jsou následujících stránky využity k jeho bližšímu popisu.

### 4.1 Popis měřicího stanoviště

Zmíněný experiment se konal na testovací dráze u letiště v nizozemském Lelystadu na konci června roku 2021, kde hned několik evropských technických univerzit včetně ČVUT měřilo koncentrace pevných částic a plyných složek výfukových plynů z asi třinácti set průjezdů sedmi různých vozidel za různých jízdních podmínek v průběhu čtyř dnů. Tato lokalita, jež je pro lepší představu přiblížena na obrázku 18, byla vybrána, aby bylo možné vytvořit co nejvíce kontrolované prostředí, kde bylo možné ovlivňovat většinu parametrů, které mají vliv na přesnost výsledků, a dostat se tak na hranu (někdy i za hranu) proveditelnosti této metody.



Obr. 18 - Satelitní snímek zkušební trati s vyznačenou dráhou testovaných vozidel z GPS přijímače

Proto byly v testovací matici různé průjezdové rychlosti (30, 50 a 80 km/h) a tři odlišné charaktery zrychlení od udržování konstantní rychlosti přes mírnou akceleraci až po sportovní akceleraci pod maximálním zatížením. K tomu byly mezi jednotlivými vozidly rozdílné rozestupy, konkrétně 2, 4, 7, 10 a 20 sekund. U některých vozidel byla dokonce i v určitých průjezdech zajištěna nadměrná koncentrace škodlivin, ať už pomocí SCR emulátoru, jež vypínal SCR systém, nebo prostřednictvím obtokové trasy umožňující obejítí filtru pevných částic.



Měření probíhalo na dvou stanovištích, jak je patrné z obrázku 19. Na prvním stanovišti se získávaly vzorky přímo ze středu jízdního pruhu pomocí silikonové hadice natažené přes silnici, kdežto na druhém byla data měřena standardně na okraji vozovky. Cílem tohoto rozdělení bylo ověření teze, zda má velký vliv na výsledné koncentrace odběr vzorku přímo v místě, kde má většina vozidel ústí výfuku, nebo jestli je dostatečný odběr z okraje jízdní dráhy, při kterém není třeba nic instalovat na povrch vozovky. Na obou stanovištích byl jak jeden přístroj EEPS, které měří koncentraci pevných částic, tak jeden přístroj FTIR, jenž slouží k měření plynných složek. Jejich bližšímu představení je věnována následující podkapitola, přičemž platí, že ze středu jízdní dráhy měřily přístroje z ČVUT, kdežto na okraji vozovky přístroje z České zemědělské univerzity.



*Obr. 19 - Odběr vzorku ze středu jízdního pruhu*



*Obr. 20 - Celé měřící stanoviště i s ukázkou měřených vozidel*

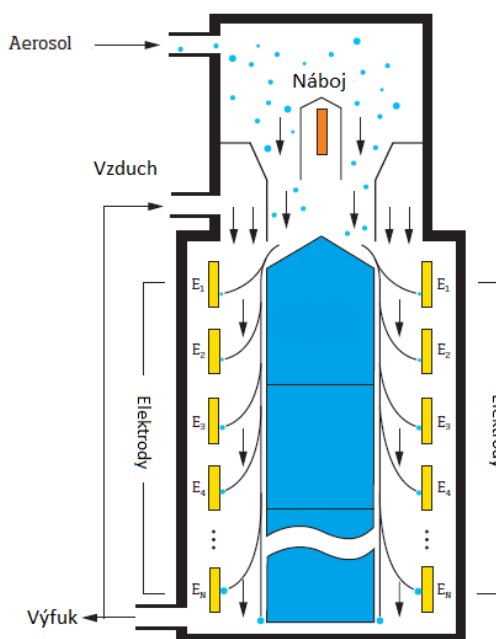


## 4.2 Použité přístroje

Jak je zmíněno výše, na obou měřících stanovištích měřily jeden přístroj EEPS a jeden FTIR. Kromě nich byl v provozu, obsluhován zástupci univerzity v Yorku, ještě klasický přístroj OPUS pracující na principu spektrometrického měření s otevřenou dráhou paprsku, který byl již blíže popsán v kapitole 3.2.1., a k tomu bylo navíc během dvou dnů na jednostopých vozidlech instalované zařízení mini-PEMS měřící plynné emise, taktéž z ČVUT. Výsledky z obou těchto přístrojů sloužily k porovnání s výsledky přístrojů FTIR.

### 4.2.1 Rychlý klasifikátor velikosti částic (EEPS)

EEPS je anglická zkratka pro rychlý klasifikátor velikosti částic, což ve výsledku znamená, že měří počet emitovaných pevných částic, které navíc rozdělí dle velikosti. Princip funkce je na obrázku 21, kde je vidět, jak se vstupující částice nabíjejí a vchází do měřícího válce, v němž je určitý napěťový spád (1 až 2 kV), díky čemuž jsou vychylovány do stran k elektricky izolovaným prstencům, přičemž malé částice s nižší setrvačností jsou vychýleny jako první, oproti tomu větší částice jsou vychylovány později. Výsledné číslo koncentrace je dáno naměřeným elektrickým proudem na jednotlivých elektrodách. Přístroj je poměrně snadný na ovládání, není potřeba přílišné nastavování, jen je třeba jej pravidelně čistit od usazených částic. Na obou měřících stanovištích byl shodně použit model 3090 od výrobce TSI, který měřil s vzorkovací frekvencí 10 Hz. [29]



Obr. 21 - Schéma principu fungování přístroje EEPS [29] (přeloženo)

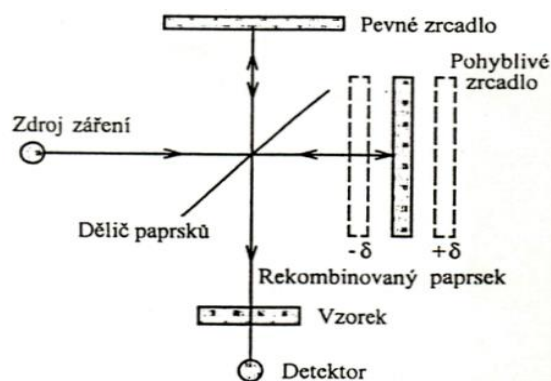


## 4.2.2 Infračervený spektrometr s Fourierovou transformací (FTIR)

FTIR neboli infračervený spektrometr s Fourierovou transformací je přístroj sloužící k měření plynných složek, hlavně oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, oxidů dusíku a nespálených uhlovodíků. To vše záleží na nastavení a na správném softwaru, potřebnému ke zpracování dat, jehož vytvoření může být výzvou i pro vysoce kvalifikovaného uživatele. To se ukázalo i v případě tohoto měření, jelikož přístroj z ČVUT od firmy Nicolet neměřil příliš dobře a výsledná data byla zašuměná, jelikož se přes 90 % optického paprsku ztratilo. Proto je třeba k těmto výsledkům přistupovat s rezervou. Navíc data byla zaznamenávána v průměru pouze třikrát za sekundu, tedy se vzorkovací frekvencí 3 Hz. Druhý přístroj z České zemědělské univerzity od firmy Bruker, který je k vidění na obrázku 22, odebíral vzorky na okraji jízdni dráhy se vzorkovací frekvencí 5 Hz a dával kvalitnější výsledky.



Obr. 22 - Přístroj FTIR – výrobce Bruker [30]



Obr. 23 - Princip Michelsonova interferometru [31]

Základem fungování tohoto zařízení je tzv. Michelsonův interferometr (obr. 23), kdy ze zdroje vycházející záření je polopropustným děličem rozdělené ke dvěma na sebe kolmým zrcadlům, z nichž jedno je pohyblivé a jedno je zafixované. Od obou zrcadel se paprsky odráží a na děliči dochází k interferenci. Interferovaný paprsek poté prochází odebraným vzorkem v kyvetovém prostoru, přičemž část je absorbována a část je přiváděna na detektor dle složení měřeného vzorku, kde je zachycen výsledný signál. [31]

## 4.2.3 Zmenšený systém PEMS (mini-PEMS)

Mini-PEMS je experimentální verze klasického přístroje PEMS určená k měření výfukových emisí motocyklů. Jak už název napovídá, jeho hlavní výhodou jsou kompaktní rozměry a nízká hmotnost pohybující se pod 10 kg včetně potřebných akumulátorů, díky



čemuž je možné jej mít za jízdy instalovaný na měřený motocykl. Během popisovaného experimentu byly měřeny pouze plynné emise se vzorkovací frekvencí 1 Hz.

Toto zařízení pracuje, na rozdíl od výše popisovaných, s nezřetěnými výfukovými plyny. Vzorek je nejdříve ochlazen přirozenou konvekcí, aby se mohla zkondenzovat přebytečná vlhkost, a následně je znovu zahřátý na přibližně 60°C. Takto připravený vzorek jde do tzv. nedisperzního infračerveného analyzátoru (NDIRA), kde jsou změřeny koncentrace oxidu uhličitého, uhelnatého a nespálených uhlovodíků, aby byl následně dopraven do tří elektrochemických buněk, kde jsou zjištěny koncentrace kyslíku a oxidů dusíku NO a NO<sub>2</sub>. [32]

### 4.3 Testovaná vozidla

Jak již bylo uvedeno na začátku části 4.1, během tohoto experimentu byly měřeny výfukové emise celkem sedmi rozdílným testovacím vozidlům. Speciální postavení mezi nimi má, kromě dvou motocyklů, vůz značený „Plume chaser“, který jezdil schválně s minimálními rozestupy za ostatními, aby simuloval tento způsob dálkového měření, jež je popsán v části 3.2.2. Bohužel nejsou k dispozici detailní informace o jednotlivých vozech, jako je jejich přesná specifikace a rok výroby, přesto jsou známy ty nejdůležitější parametry (Tabulka 2). V ní jsou vedle skutečných názvů v závorce uvedeny i zkrácená označení, kterými byla daná vozidla označována v surových datech průjezdů. Kvůli neznámým rokům výroby musely být zde uvedené emisní normy, které by měla testovaná vozidla plnit, stanoveny kvalifikovaným odhadem, ovšem pro požadované výstupy tohoto měření, potažmo i této práce, to není příliš důležité.

Tabulka 6 - Souhrn testovacích vozidel

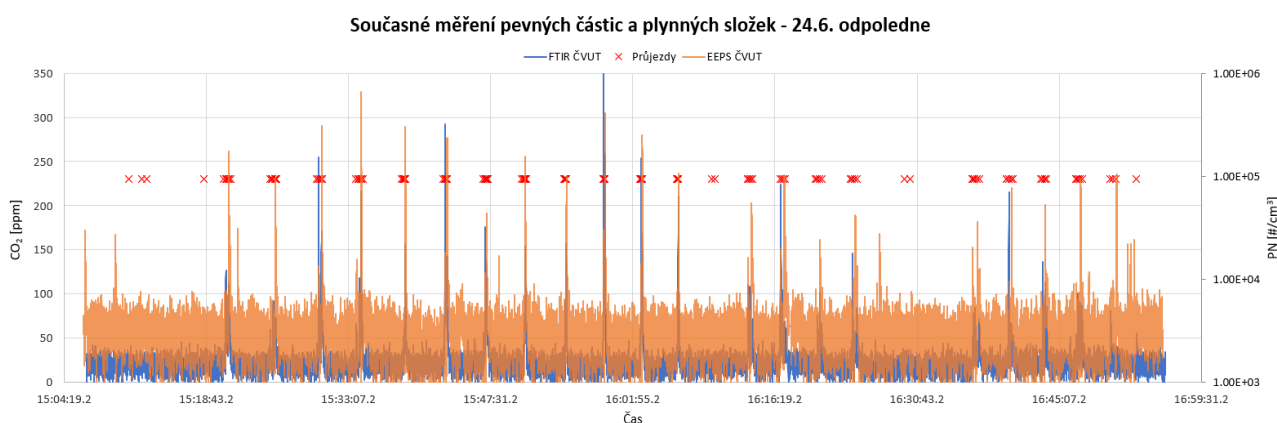
Zkratka	Model (označení)	Kategorie	Typ pohonu	Euro norma
MB	Yamaha MT-07 (Motorbike)	L	Zážehový motor	Euro 5
S	Yamaha N-Max (Scooter)	L	Zážehový motor	Euro 5
C	VW Caddy (Caddy)	N1	Vznětový motor	Euro 5
TR	VW Transporter (Transporter)	N1	Vznětový motor	Euro 5
TN	VW Touran (Touran)	M	Zážehový motor	Euro 5
T	Ford F-Max (Truck)	N3	Vznětový motor	Euro VI
P	VW Crafter (Plume chaser)	N1	Vznětový motor	Euro 5



## 5 Zpracování naměřených dat

Jak už bylo zmíněno, měření probíhalo celkem čtyři dny od úterý 22.6.2021 do pátku 25.6.2021 a data byla rozdělena vždy na dopolední a odpolední blok, tedy s výjimkou posledního dne, kdy se měřilo pouze dopoledne. I ze zkušeností ostatních spolupracujících univerzit se usoudilo, že nejkompaktnější a nejkvalitnější vzorky se podařilo naměřit ve čtvrtek, a tak byla v této práci zpracována právě tato data za účelem zhodnocení všech limitů, se kterými se tato metoda potýká. Kvůli tomu bylo nutné se dívat na data nejen jako na celek, ale postupně se zaměřit i na jednotlivé průjezdy a jejich možné vzájemné ovlivňování. Tento proces je naznačen právě v této kapitole, přičemž ke zpracování surových dat byl využit program MS Excel.

Níže je na grafu 1 k vidění příklad, jak vypadají naměřená data z celého půldenního bloku. Dále je možné si všimnout jednotek, v jakých jednotlivé přístroje zachycovaly koncentrace škodlivin. Přístroj EEPS měřil počet pevných částic v částicích na krychlový centimetr vzduchu [ $\#/cm^3$ ] a infračervený spektrometr udával koncentrace plynných škodlivin v miliontinách celku, tedy v jednotce anglicky označované „parts per million“ [ppm].



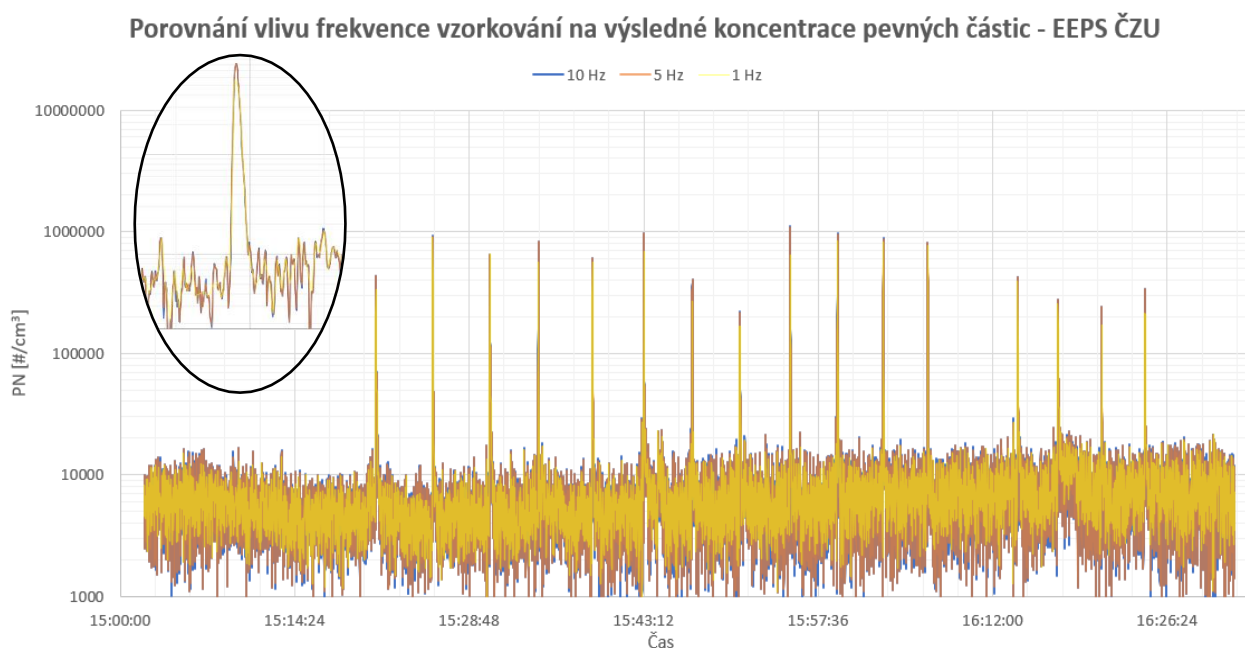
Na tomto grafu jsou také vyznačené časy průjezdů jednotlivých vozidel, díky čemuž lze vypořádat, že naprosté většině průjezdů odpovídá špička jak koncentrace pevných částic, tak i oxidu uhličitého, což dává obsluze jistotu, že přístroje opravdu zaznamenaly průjezd. Na druhou stranu se zde ale objevují i takové případy, kdy tyto nárůsty nejsou tak patrné. A právě pro tyto situace je nutné stanovit určitou dolní hranici naměřené koncentrace, která je dostatečně dobře rozlišitelná jako průjezd vozidla. Ještě předtím je



ale třeba u podobných experimentů, jako je zde popisované dálkové měření emisí, vyřešit problém rozdílných vzorkovacích frekvencí jednotlivých měřících přístrojů.

## 5.1 Časová synchronizace dat

Jak už bylo zmíněno výše v části 4.2, oba čítače částic byly shodné a zachycovaly vzorky desetkrát za sekundu, kdežto u infračervených spektrometrů je situace odlišná. FTIR z České zemědělské univerzity měřilo se vzorkovací frekvencí 5 Hz a druhé FTIR z ČVUT mělo vzorkovací frekvenci ještě nižší, kolem 3 Hz. Pro korektní vyhodnocení je ovšem nutné, aby se naměřené hodnoty jednotlivých přístrojů časově sjednotily. Bylo tedy třeba převzorkovat pomocí lineární interpolace naměřená data na společnou frekvenci. A jelikož tato volba mohla ovlivnit výsledky měření, bylo třeba porovnat jednotlivé možnosti, mezi nimiž byla společná frekvence 10 Hz, 5 Hz a 1 Hz. Toto porovnání je k vidění na grafu 2, kde je dobře patrné, že u dat zapisovaných jednou za sekundu je sice menší šum, ale mohou se ztrácet některé úzké špičky, takže tato varianta se vyloučila. Oproti tomu mezi zbylými dvěma alternativami není žádný viditelný rozdíl, a tak byla velikost společné vzorkovací frekvence stanovena právě na 5 Hz, jelikož zajišťuje dostatečně kvalitní rozlišení dat při zachování možnosti zachycení všech typů jednotlivých peaků.



Graf 2 - Posouzení vlivu rozdílné vzorkovací frekvence na výsledné koncentrace částic

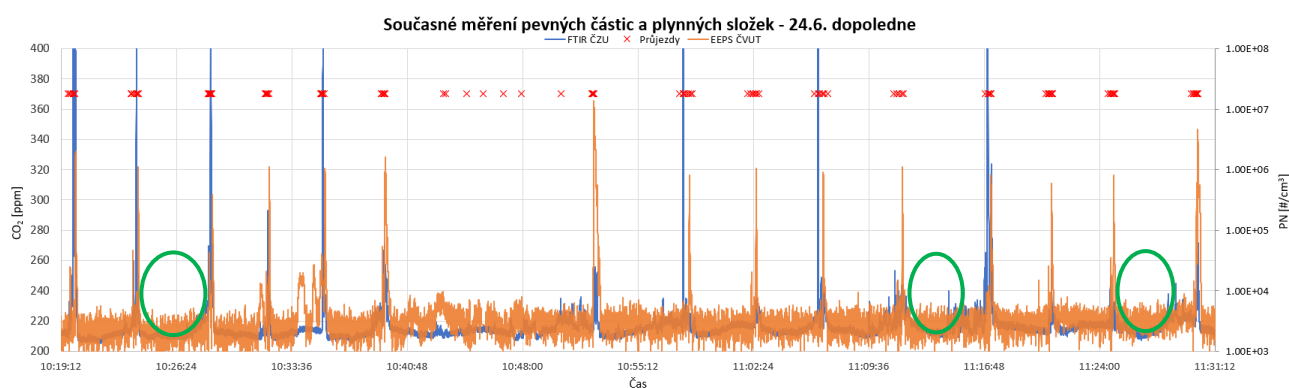




## 5.2 Mez detekce průjezdu

U každého měření v otevřeném prostranství je přirozené, že měřící přístroje detekují v ovzduší určité hodnoty jimi sledovaných složek. Tyto hodnoty jsou nazývány pozadovými koncentracemi a jejich určení je nedílnou součástí podobných typů měření, protože jinak by naměřené koncentrace neodpovídaly skutečným příspěvkům od jednotlivých průjezdů. K jejich správnému vyčíslení je totiž nutné od naměřené maximální koncentrace odečíst právě hodnotu pozadí. Tu je nutné stanovovat v průběhu celého měření, jelikož se může v čase poměrně výrazně měnit, ať už se tak děje vlivem změny povětrnostních podmínek nebo kvůli narůstajícímu množství průjezdů.

Proto byly, jak je vidět na grafu 3, identifikovány několikaminutové úseky v průběhu celého dne, celkem tři dopoledne a tři odpoledne, kdy nejsou v grafu patrné žádné nárůsty a ani v poznámkách nejsou zaznamenány žádné průjezdy. Zpracováním těchto dat metodou pětisekundového klouzavého průměru, tedy zprůměrováním již vypočítaných průměrných hodnot menších intervalů s délkou 5 s, lze získat hodnoty koncentrace měřených látek v okolí. Tento způsob byl zvolen z důvodu zajištění co nejmenšího šumu, klouzavý průměr má totiž tendenci vyhladit náhlé fluktuace a zvýraznit dlouhodobější trend. Výsledné hodnoty jsou pro lepší představu uvedené v tabulkách 7 a 8. V ní je také možné si všimnout, že se pozadové koncentrace měnily v průběhu dne velice mírně, maximálně v řádech jednotek procent, a tak bylo rozhodnuto, že bude stačit stanovit průměrné hodnoty pro dopolední a odpolední blok měření. Je třeba mít ovšem na paměti, že tento experiment probíhal v maximálně kontrolovaném prostředí. V případě měření někde u dálnice nebo v centru města by závěr mohl být odlišný a nárůst koncentrací pozadí v průběhu dne by se musel brát v potaz. [33]



Graf 3 - Vyznačené intervaly využité k určení hodnoty pozadí – 24.6. dopoledne



Ovšem pro určení, zda určitá koncentrace znamená zaznamenaný průjezd vozidla je mnohem významnější hodnota směrodatné odchylky z vybraných dat. Ta totiž vyjadřuje míru šumu, jakým jsou data zatížena, přičemž je možné se dle dvou různých výkladů dopočítat dvou rozdílných hodnot, jak je také patrné z tabulek 7 a 8.

V nich  $\sigma_{5Hz}$  představuje výsledné hodnoty směrodatné odchylky počítané z původních naměřených dat jednotlivými přístroji, jež byly převzorkovány na společnou frekvenci 5 Hz. Takovýto postup je nezbytný při analýze maxima peaku, kdy je třeba vzít chybu právě toho bodu, ve kterém je maximum naměřeno. Oproti tomu  $\sigma_{5s}$  označuje hodnoty šumu počítané z již popsaných pětisekundových klouzavých průměrů. Tento postup je možné použít, pokud je k vyhodnocení měření použita tzv. regresní metoda, která je více přiblížena dále. Ve zkratce lze říci, že touto metodou vyšetřujeme poměr škodliviny ku CO<sub>2</sub> v určitém zvoleném časovém intervalu. Díky tomu je výrazně snížen vliv nejistoty spojené s jedním konkrétním bodem na výsledek, a tak lze směrodatnou odchylku brát právě z hodnot již zprůměrovaných, pokud je velikost intervalu, ve kterém jsou průměrovány, velice blízká velikosti časového okna, v němž je řešena regrese. A jelikož je v této práci, jak bude blíže popsáno, pro zpracování jednotlivých průjezdů využita právě regresní metoda, byly jako výsledné hodnoty šumu zvoleny  $\sigma_{5s}$ . Ve výsledku je ale tento výpočet pouze orientační, protože nejvyšší hodnoty přeci jen ovlivňují výslednou hodnotu regrese, díky čemuž lze předpokládat, že skutečná hodnota šumu bude někde mezi těmi ze zde uvedených výpočtů. Nabízí se tak prostor k budoucím optimalizacím výpočtu, jelikož kvantitativní statistické metody pro tento postup ještě nebyly vypracovány.

Většina hodnot směrodatných odchylek vyšla dle očekávání. Jedinou výjimkou byly nezvykle nízké hodnoty šumu u NO, která bývá obvykle v nízkých desetinách ppm. To bylo způsobeno přebytečným obsahem vody v odebraných vzorcích, která poté sloužila jako interferující prvek a posunula výslednou křivku odezvy přístroje blíže k záporným hodnotám, čímž se ztratila část informace. Řešením pro následující měření tak bude do měřicího řetězce zapojit i sušičku vzduchu, jež by měla podobným problémům zabránit.

A předpokládáme-li, že jsou vybrané statistické soubory přibližně normálně rozdělené, lze využít známé pravidlo tří sigma, které na základě Gaussova normálního rozdělení říká, že se s více než 99% pravděpodobností budou naměřené hodnoty lišit od aritmetického průměru nejvýše právě o tři směrodatné odchylky. Jelikož skutečná data nejsou ideálně normálně rozložena, je tato pravděpodobnost o něco menší, ale i tak byla



výsledná mez detekce, tedy minimální hodnota nárůstu koncentrace, kdy je možné s rozumnou přesností prohlásit, že je onen nárůst způsoben průjezdem vozidla, určena tímto způsobem. [34]

Tabulka 7 - Přehled dopoledních požadových koncentrací i se směrodatnou odchylkou

Měřicí přístroj	Měřená škodlivina											
	CO <sub>2</sub> [ppm]			NO [ppm]			CO [ppm]			PN [# /cm <sup>3</sup> ]		
	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$
FTIR ČZU	213,63	3,26	3,85	0,067	0,033	0,109	0,121	0,022	0,059	-	-	-
FTIR ČVUT	21,64	2,47	7,89	0,036	0,046	0,129	0,007	0,065	0,184	-	-	-
EEPS ČZU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4482	616	1671
EEPS ČVUT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2731	337	833

Tabulka 8 - Přehled odpoledních požadových koncentrací i se směrodatnou odchylkou

Měřicí přístroj	Měřená škodlivina											
	CO <sub>2</sub> [ppm]			NO [ppm]			CO [ppm]			PN [# /cm <sup>3</sup> ]		
	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$	Průměr	$\sigma_{5s}$	$\sigma_{5Hz}$
FTIR ČZU	218,20	1,48	1,86	0,016	0,012	0,052	0,118	0,01	0,053	-	-	-
FTIR ČVUT	17,58	2,63	7,42	0,091	0,047	0,135	0,084	0,059	0,178	-	-	-
EEPS ČZU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6211	877	2744
EEPS ČVUT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2938	443	1014

### 5.3 Vyhodnocení jednotlivých průjezdů

Následně přichází na řadu vyhodnocení kvality zachycení jednotlivých průjezdů a další zpracování naměřených dat. V první řadě bylo nutné zajistit, aby jednotlivé nárůsty v čase odpovídaly zaznamenaným okamžikům průjezdů jednotlivých vozidel, což kvůli rozdílné době odezvy jednotlivých přístrojů nebylo vždy pravidlem. Řešením bylo přičtení



několika sekund (tzv. časový offset) k původnímu času průjezdu v poznámkách tak, aby odpovídal okamžiku špičky naměřených koncentrací.

Obecně se dají výsledné průjezdy rozdělit do pěti základních kategorií, a to už na základě letmého pohledu: [30]

- a) Nárůsty měřené škodliviny i oxidu uhličitého jsou dobře rozeznatelné od pozadí a jejich poměr je konzistentní v celém měřícím časovém okně; tedy ideální typ naměřených průběhů
- b) Oba nárůsty jdou dobře rozpoznat, ovšem jejich vzájemný poměr je v čase proměnlivý; v takovém případě je nutné bližší přezkoumání časových průběhů v grafu, zda není nižší korelace způsobena vlivem dalších průjezdů
- c) Špičku  $\text{CO}_2$  lze snadno detekovat, ale měřenou škodlivinu není možné spolehlivě oddělit od šumu; taková situace je rovněž výsledkem, vozidlo je považováno za vyhovující emisním limitům
- d) Peak měřené škodliviny je dobře patrný, ale na druhou stranu nelze najít nárůst  $\text{CO}_2$ ; v tom případě není možné průjezd dále vyhodnotit, i když takové vozidlo může opravdu být velkým znečišťovatelem
- e) Nárůst  $\text{CO}_2$  ani měřené škodliviny není detekovatelný; což znamená, že se nepodařilo daný průjezd zachytit

Pro důkladnější analýzu je ovšem nutné využít různé matematické postupy, jejichž bližší přiblížení je v následující části textu.

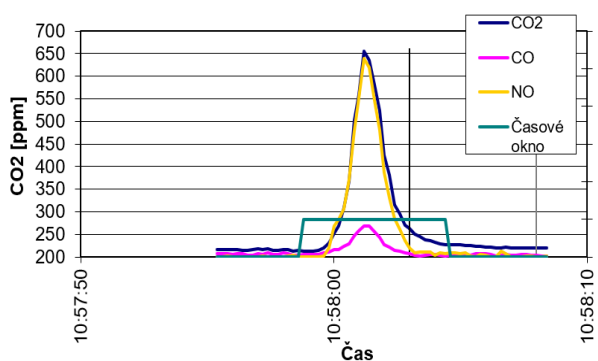
### 5.3.1 Přehled použitých metod vyhodnocení

Pro další zpracování výsledků s ohledem na evropské standardy je nezbytně nutné vyčíslit poměr měřené znečišťující látky k nárůstu koncentrace oxidu uhličitého, v tomto případě tedy  $\text{NO}/\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}/\text{CO}_2$  a  $\text{PN}/\text{CO}_2$ . U tohoto měření k tomu byla využita metoda lineární regrese, kdy daný poměr odpovídá sklonu lineární regrese průběhů měřené koncentrace škodlivé látky a  $\text{CO}_2$  v určitém časovém okně. Velikost tohoto časového okna byla ve většině případů stanovena na 6 s, případně na 4 s v situaci, kdy bylo zaznamenáno několik průjezdů blíž u sebe. Takové hodnoty by měly zajistit zachycení dostatečného množství informací bez toho, aby byly výsledky ve velkém ovlivněny ostatními průjezdy. Navíc tyto intervaly odpovídaly vybranému postupu výpočtu šumu, popsanému v předchozí

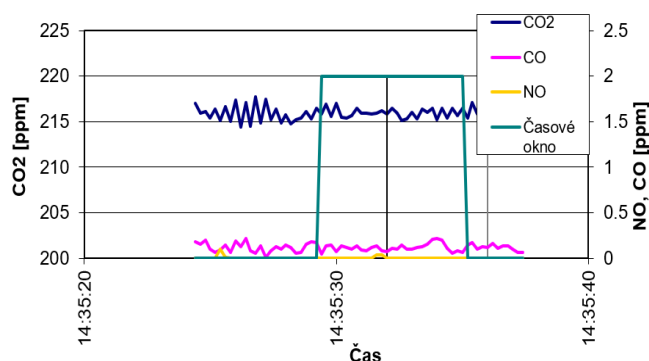


podkapitole. Kromě toho lze tímto způsobem získat ještě informaci o stabilitě určeného poměru, a to prostřednictvím Pearsonova korelačního koeficientu, často označovaného pouze  $R^2$ , jelikož se při těchto měřeních používá v druhé mocnině. Dosahuje tak hodnot v intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ , přičemž nula znamená, že danou měřenou škodlivou látku nelze přiřadit ke konkrétnímu nárůstu koncentrace oxidu uhličitého, a 1 teoreticky vyjadřuje případ, kdy jsou naměřené špičky škodliviny i  $\text{CO}_2$  najisto součástí stejného oblaku výfukových plynů a pouze se mění míra jejich promíchání s okolním vzduchem, což je samozřejmě ideální stav. [30]

Tento postup by měl minimalizovat pravděpodobnost nesprávné identifikace nevyhovujícího vozidla, ovšem na druhou stranu má tato metoda tendenci k většímu množství nedetekovatelných průjezdů. Příklady obou variant jsou vidět na grafech 4 a 5, kde jsou kromě časových průběhů jednotlivých znečišťujících látek zvýrazněná i zvolená časová okna, v nichž je regrese počítána. Je třeba dodat, že u obou těchto grafů se jedná o průjezdy tahače „Truck“.



Graf 4 - Příklad ideální korelace



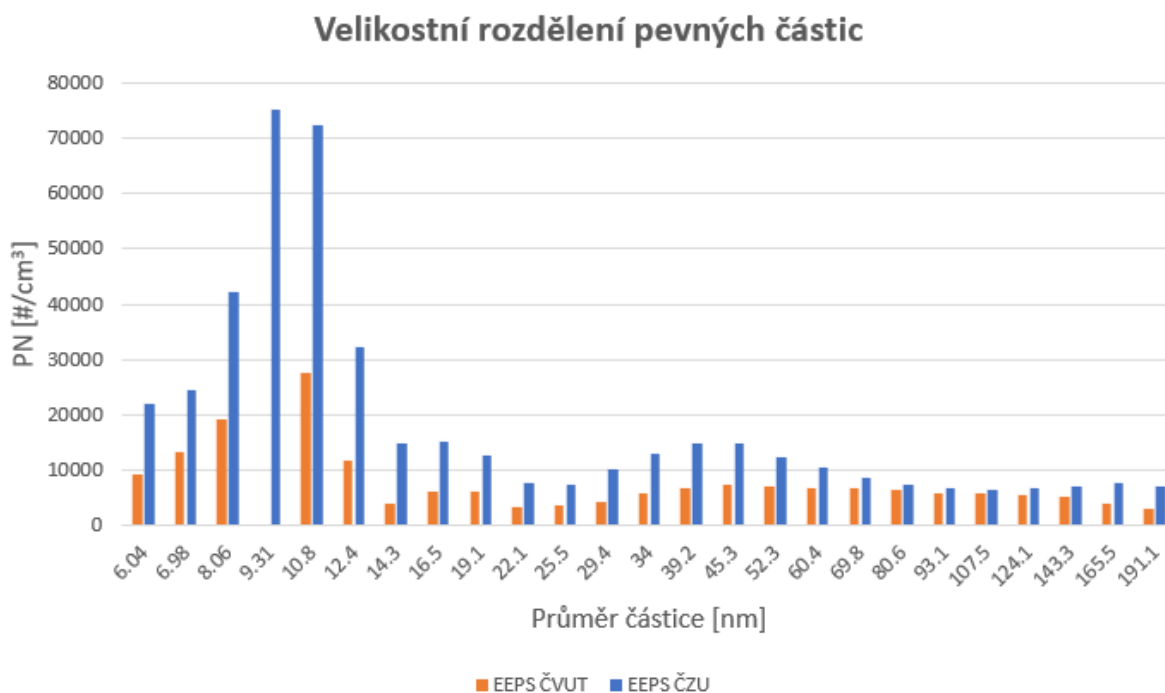
Graf 5 - Příklad nedetekovatelného průjezdu

Mimo těchto poměrů, které lze následně přepočítat na emisní faktory, jež je možné porovnat s příslušnými emisními standardy, byly ještě pro lepší představu jako doplněk vyčísleny i absolutní hodnoty příspěvků škodlivých látek a oxidu uhličitého. K tomu byla použita tzv. metoda maxima příspěvku (angl. peak maximum method), která počítá výsledný nárůst koncentrace jako rozdíl hodnoty rovné 90. percentilu ze souboru naměřených dat během konkrétního průjezdu a vypočtené pozadové koncentrace. [30]

Tento postup je ve své podstatě velice podobný jak pro analýzu plyných složek jako je NO a CO, tak i pro pevné částice. Ovšem díky tomu, že použité přístroje EEPS jsou schopné rozeznat a rozdělit naměřené pevné částice podle velikosti, a to celkem do 25 různých



kanálů od 6,04 nm v průměru po 191,1 nm v průměru, lze u pevných částic sledovat i tento parametr. Příkladem výsledné četnosti velikostí pevných částic je graf 6, přičemž podobná rozdělení byla naměřena u všech testovacích vozidel.



Graf 6 - Rozdělení počtu emitovaných částic dle velikosti pro motocykl „MB“

### 5.3.2 Emisní faktory

Jak už bylo lehce naznačeno výše, dalším krokem je výpočet tzv. emisních faktorů, jež slouží k lepšímu vyhodnocení emisí výfukových plynů jednotlivých konkrétních průjezdů. Klíčovým pro tento výpočet je molární poměr měřené škodliviny ku CO<sub>2</sub>, jelikož dálkovým měřením emisí lze naměřit pouze vzduchem zředěný oblak kouře z výfuku, kde se koncentrace jednotlivých látek mohou měnit, ale jejich poměr k oxidu uhličitému by měl zůstat stejný. Následně již s využitím základních znalostí o spalování uhlovodíkových paliv a z toho vycházejících předpokladů není složité stanovit množství vypuštěných škodlivin na kilogram paliva. [35]

Hodnota hmotnostního zlomku uhlíku v uhlovodíkovém palivu byla stanovena, ať už v případě benzínu či nafty, na 0,863. Dále je předpokládáno, že během měřených průjezdů docházelo k dokonalému spalování, tedy takové situaci, kdy produktem spalování 1 molu uhlíku obsaženého v palivu je 1 mol CO<sub>2</sub>. U moderních (hlavně vznětových) spalovacích motorů je tak CO ve výfukových plynech zastoupen pouze v relativně malých koncentracích, i tak je ovšem nutné zohlednit jeho přítomnost. Také je předpokládáno, že



se veškerý oxid dusnatý (NO) v atmosféře po reakci s kyslíkem přemění na oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>). A v neposlední řadě je při výpočtech s koncentrací pevných částic třeba pracovat s hodnotou molárního objemu vzduchu, díky čemuž lze vyjádřit koncentraci CO<sub>2</sub> v molech na centimetr krychlový, aby bylo korektní ve vztahu (7) pracovat s poměrem  $\frac{PN}{CO_2}$ . Tato hodnota je rovna 22,4 dm<sup>3</sup>/mol. Výsledné vztahy pro výpočet emisních faktorů jsou: [36]

$$EF_{NO} = \frac{m_{NO}}{m_{paliva}} = \frac{NO}{CO_2} \cdot \frac{m_C \cdot M_{NO}}{M_C} \cdot 1000 \text{ [g/kg}_{paliva}] \quad (5)$$

$$EF_{CO} = \frac{m_{CO}}{m_{paliva}} = \frac{CO}{CO_2} \cdot \frac{m_C \cdot M_{CO}}{M_C} \cdot 1000 \text{ [g/kg}_{paliva}] \quad (6)$$

$$EF_{PN} = \frac{N_{PN}}{m_{paliva}} = \frac{PN}{CO_2} \cdot \frac{m_C \cdot V_m}{M_C \cdot \left(1 + \frac{CO}{CO_2}\right)} \cdot 10^{12} \text{ [#/kg}_{paliva}] \quad (7)$$

kde  $m_C$  je hmotnostní zlomek uhlíku,  $M_{NO}$  je molární hmotnost oxidů dusíku, která je za předpokladu přeměny veškerého NO na NO<sub>2</sub> rovna 46 g/mol,  $M_C$  je molární hmotnost uhlíku rovna 12 g/mol,  $M_{CO}$  je molární hmotnost oxidu uhelnatého rovna 28 g/mol a  $V_m$  označuje molární objem vzduchu.

### 5.3.3 Porovnání s emisními standardy

Evropské emisní limity ovšem nejsou vyjádřeny v gramech na kilogram spáleného paliva, a tak je nutné výsledné hodnoty ze vztahů (5), (6) a (7) ještě převést na požadované jednotky, tedy g/kWh a #/kWh u těžkých nákladních vozidel (toto měření – tahač Ford F-Max) a g/km a #/km u ostatních kategorií vozidel (toto měření – zbylých 6 testovacích vozidel), aby je bylo možné porovnat s příslušnou evropskou normou.

Pro těžká nákladní vozidla je tedy přepočítání prováděno podle vztahu: [36]

$$EF \text{ [x/kWh]} = \frac{EF \text{ [x/kg}_{paliva}]}{1000} \cdot BSFC \quad (8)$$

kde *BSFC* je anglická zkratka pro měrnou spotřebu paliva (brake specific fuel consumption), přičemž uvažována byla hodnota 220 g/kWh.

Pro přepočítání u všech ostatních kategorií vozidel je třeba znát hustotu používaného paliva a také přibližnou spotřebu měřeného vozidla, jak je dobře patrné ze vztahu: [36]

$$EF \text{ [x/km]} = \frac{EF \text{ [x/kg}_{paliva}]}{100} \cdot \rho \cdot X \quad (9)$$



kde  $X$  je spotřeba paliva v litrech na 100 km a  $\rho$  je hustota paliva, přičemž ta byla pro benzín uvažována v hodnotě  $0,75 \text{ kg/dm}^3$  a pro naftu ve výši  $0,83 \text{ kg/dm}^3$ . Parametry průměrné spotřeby paliva jednotlivých měřených vozidel byly stanoveny kvalifikovaným odhadem na základě veřejně dostupných informací, přičemž uvažované hodnoty jsou k nahlédnutí v tabulce 9.

*Tabulka 9 - Přehled uvažovaných hodnot spotřeby paliva testovacích vozidel*

Typ vozidla	MB	S	C	TN	TR	P
Spotřeba paliva – průměrné zatížení [l/100km]	3,5	2,3	7	6,5	7,5	9,5





## 6 Výsledky měření

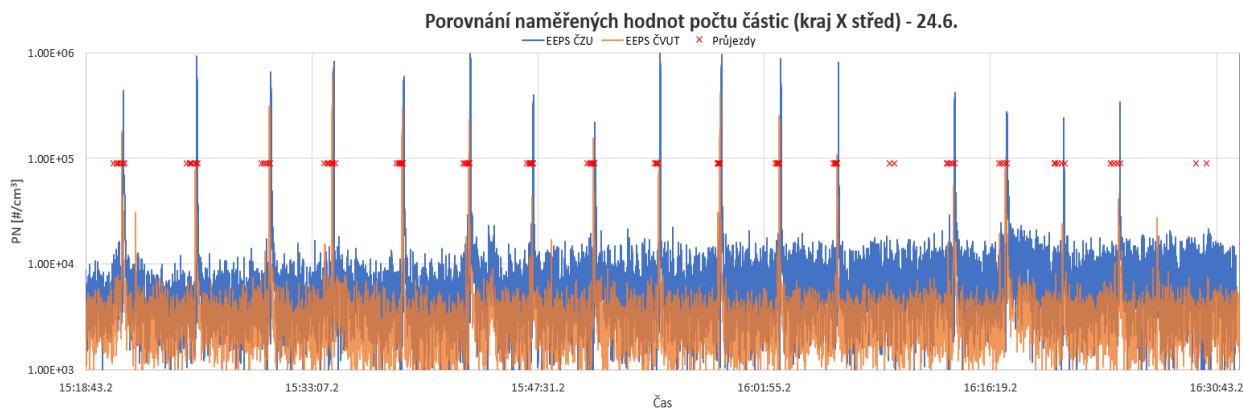
Cílem tohoto experimentu, potažmo i této práce, je na analyzovaných datech vyhodnotit potenciální limity dálkového měření emisí s odběrem vzorku z blízkosti jízdní dráhy a uvést podmínky, za kterých je měření proveditelné. Zhodnocení vlivu jednotlivých omezujících faktorů je tak hlavní součástí této kapitoly. A jelikož se daného experimentu účastnilo hned několik evropských univerzit, bylo možné porovnat výsledná data hned z několika měřících přístrojů, jak je blíže popsáno v části 4.2. Tato porovnání jsou tak také kromě ukázky všech použitelných naměřených průjezdů součástí závěrů prezentovaných v této kapitole.

### 6.1 Limity dálkového měření

#### 6.1.1 Místo odběru vzorku výfukových plynů

Kvůli tomuto bodu byl experiment uspořádán a naplánován tak, aby byl vzorek výfukových spalin odebírán ze dvou různých míst, jak bylo popsáno v kapitole 4.1, tedy ze středu jízdního pruhu a z okraje jízdní dráhy. Díky tomu bylo možné porovnat naměřené nárůsty koncentrací plyných složek i pevných částic v závislosti na měřícím stanovišti a potvrdit, či vyvrátit předpoklad, že odběr vzorku uprostřed jízdního pruhu umožňuje zachycení méně nařaděného oblaku výfukových plynů a tím naměření vyšších přírůstků jednotlivých škodlivin, což usnadňuje rozlišení průjezdů od okolního šumu.

Bohužel, jak už bylo zmíněno, u jednoho z přístrojů FTIR (konkrétně u přístroje z ČVUT měřícího ze středu jízdního pruhu) došlo ke ztrátě více než 90 % optického paprsku, což zapříčinilo vysoký šum výsledných spekter, a tak není možné korektně porovnat vliv místa odběru vzorku na nárůsty koncentrací CO<sub>2</sub>. Nic ovšem nestálo v cestě srovnání nárůstu koncentrací pevných částic, a výsledné průběhy jsou k vidění níže v grafu 7. K tomu je potřeba připomenout, že oranžový průběh označený EEPS ČVUT odpovídá měření ze středu jízdní dráhy a modrý průběh označený EEPS ČZU odpovídá měření z okraje vozovky.



Graf 7 - Naměřené koncentrace pevných částic z obou měřících stanovišť - 24.6. odpoledne

Na tomto grafu je patrné, že i přes to, že měření ze středu jízdního pruhu podléhá menšímu šumu, tak samotné nárůsty koncentrací si jsou během průjezdů testovacích vozidel velice podobné a často je dokonce zaznamenána vyšší špička přístrojem měřícím na okraji. Lze tak konstatovat, že v tomto případě je přínos odběru vzorku uprostřed jízdního proudu oproti konvenčnímu způsobu zanedbatelný. Tento závěr ostatně potvrzuje také graf 6, na němž je rovněž vidět, že přístroj měřící na okraji vozovky naměřil větší koncentrace pevných částic než paralelně měřící EEPS ze středu jízdní dráhy.

### 6.1.2 Rychlost a akcelerace vozidla

Dalším omezením pro korektní provedení dálkového měření emisí je rychlost jízdy měřených vozidel, respektive míra akcelerace, aby bylo zajištěno, že je motor projíždějícího vozu opravdu pod zátěží. Proto byly součástí testovací matice různé průjezdové rychlosti a také celkem tři druhy zrychlení, jak už bylo zmíněno v části 4.1. Ve čtvrtek 24.6., tedy v den, který byl vybrán k analýze v této práci, se střídaly dva druhy zrychlení, a to mírné plynulé zrychlení a poté prudké zrychlení, při kterém byl motor testovacích vozidel pod maximální zátěží. Naneštěstí byl experiment koncipován tak, že průjezdy hraničním typem zrychlení, čili jízdou konstantní rychlostí, byly měřeny pouze úvodní den testovacího měření, kdy se ještě celý proces převážně rozbíhal a výsledky tak z tohoto dne nejsou příliš reprezentativní, tudíž je nelze využít k dalšímu zpracování.

Přestože tak bylo zajištěno, že motory projíždějících vozidel jsou pod zátěží, bylo důležité sledovat vliv velikosti zrychlení na výsledné naměřené koncentrace. Emise se totiž během rozjezdu dynamicky mění, jak si za sebou jedoucí vozidlo táhne svůj oblak výfukových plynů, a není tak úplně jasné, z jaké fáze rozjezdu je ta část spalin, jež byla



zachycena měřicími přístroji. Tento jev je přirozeně zesílen při velmi dynamických režimech jízdy, mezi něž prudká akcelerace bezesporu patří, a tak je obvykle doporučováno, aby měřená vozidla zrychlovala plynule bez větší dynamiky. [22]

Dle výsledků nelze konstatovat, zda je jeden z těchto druhů zrychlení výhodnější. Ukázalo se, že prudká akcelerace většinou znamená mírně vyšší naměřené koncentrace škodlivin a také větší příspěvek k okamžitým koncentracím CO<sub>2</sub>, což je pro vyhodnocení měření poměrně důležité, jak bude vysvětleno dále, ale na druhou stranu se, kvůli již zmíněným dynamickým účinkům, takovýto průjezd v několika případech nepodařilo zachytit. Další překážkou u tohoto typu zrychlení je poté i použitelnost v praxi, jelikož je velice obtížné v běžném provozu najít takové měřicí místo, které by vozidla projížděla s maximálním zrychlením. Důležitějším závěrem z hlediska nalezení praktických limitů dálkového měření emisí je tedy asi to, že rychlost jízdy ani druh zrychlení na proveditelnost metody nemají příliš vliv, a to obzvláště pokud jejich dopad porovnáme například s dalším omezujícím faktorem – časovými rozestupy mezi jednotlivými vozidly, jak bude přiblíženo v následující části.

### **6.1.3 Časové rozestupy mezi projíždějícími vozidly**

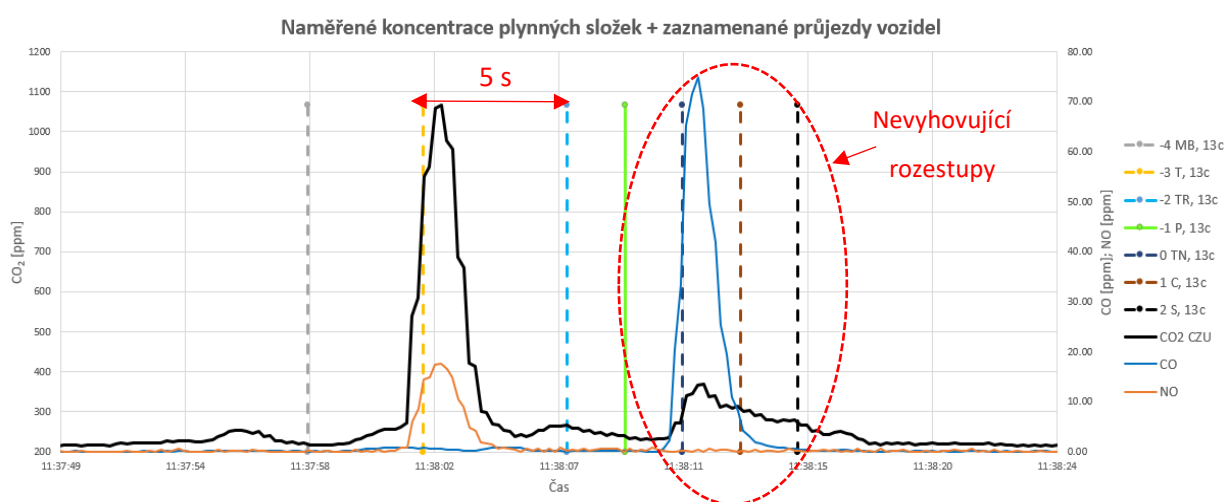
Při zanedbání vlivu proměnlivých povětrnostních podmínek a rozmarů počasí, časové intervaly mezi jednotlivými průjezdy jsou jedním z nejvíce omezujících faktorů dálkového měření emisí. Testovací měření, jako je toto, se tak často zaměřují právě na tento fenomén, aby bylo následně možné stanovit minimální hranici, kdy lze ke konkrétnímu průjezdu přiřadit konkrétní nárůst koncentrace škodlivin.

V testovací matici experimentu tak byly předepsány rozestupy po dvou, pěti, osmi a deseti sekundách, které se zkušební jezdci pokoušeli dodržet. V případě pouhých 2 s bylo dle dosavadních zkušeností předpokládáno, že bude téměř nemožné od sebe takovéto průjezdy rozlišit. A to se potvrdilo, na základě ruční revize naměřených dat z celkem 414 průjezdů byla prahová hodnota časového rozestupu stanovena na 4 s jako hraniční interval, při kterém jsou od sebe jednotlivé nárůsty koncentrací již rozpoznatelné s nejmenším počtem nesprávně vyhodnocených průjezdů, ať už byly falešně eliminovány nebo naopak nebyly i přes zdánlivě dostatečný rozstup rozpoznatelné, jelikož byly spojené do velkého oblaku kvůli průjezdu vozidla s nadměrnými emisemi. V takových případech byly dané průjezdy do množiny dále vyhodnocovaných průjezdů samozřejmě doplněny, respektive

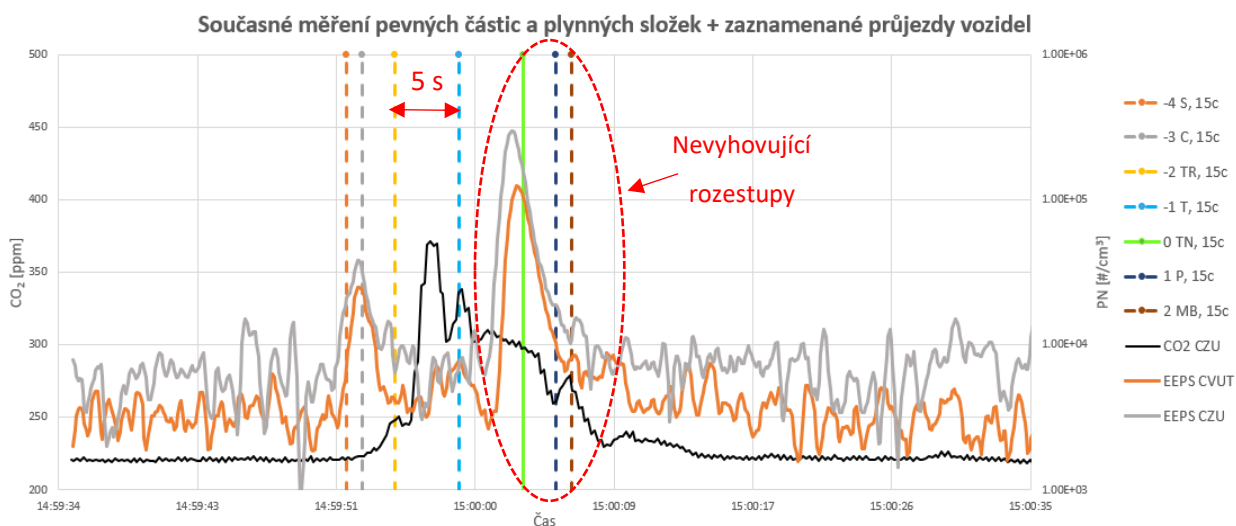


z ní vyňaty. Bohužel se tak potvrdilo, že lidská kontrola každého zaznamenaného průjezdu je stále klíčová a není dost dobře možné měření vyhodnocovat pouze strojově. Nakonec bylo k další analýze z celkových 414 průjezdů vybráno 273 takových, jenž byly dále analyzovány.

Na následujících grafech 8 a 9 jsou zachyceny právě takové průjezdy, jejichž časové rozestupy jsou buď naprosto nevyhovující nebo hraniční, tedy o velikosti 4 s. Lze si tak na vyznačeném místě všimnout, že i když jsou při čtyřsekundových rozestupech jednotlivé peaky rozpoznatelné, koncentrace sledované látky mezi nimi nedosáhne hodnoty pozadí. Výsledky tak mohou být stejně zkreslené a je třeba s tím při dalším vyhodnocení počítat.



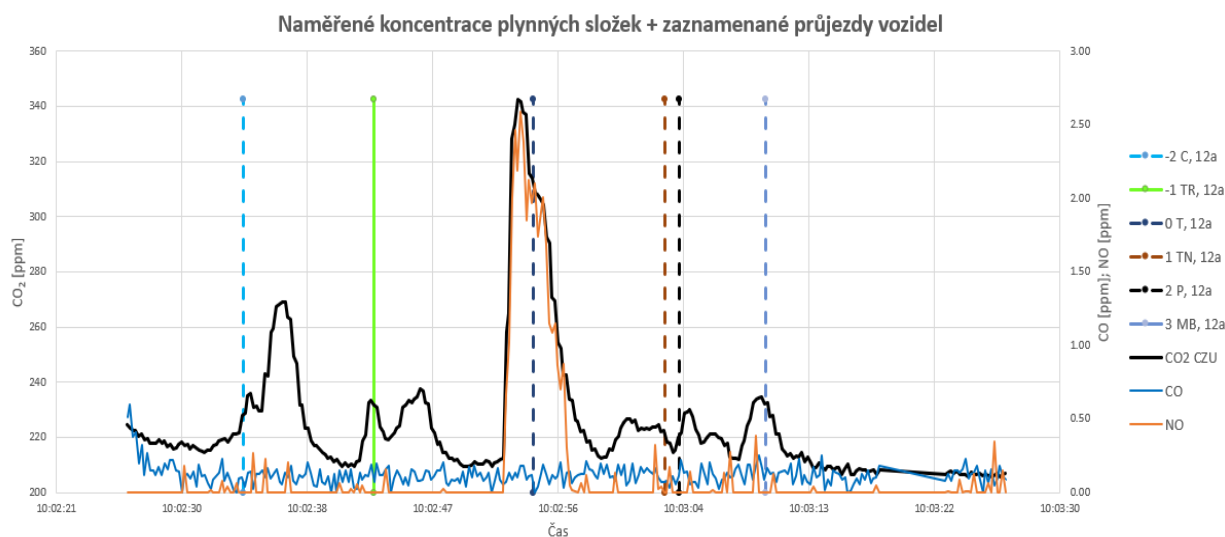
Graf 8 - Příklad příliš malých a hraničních časových rozestupů – FTIR



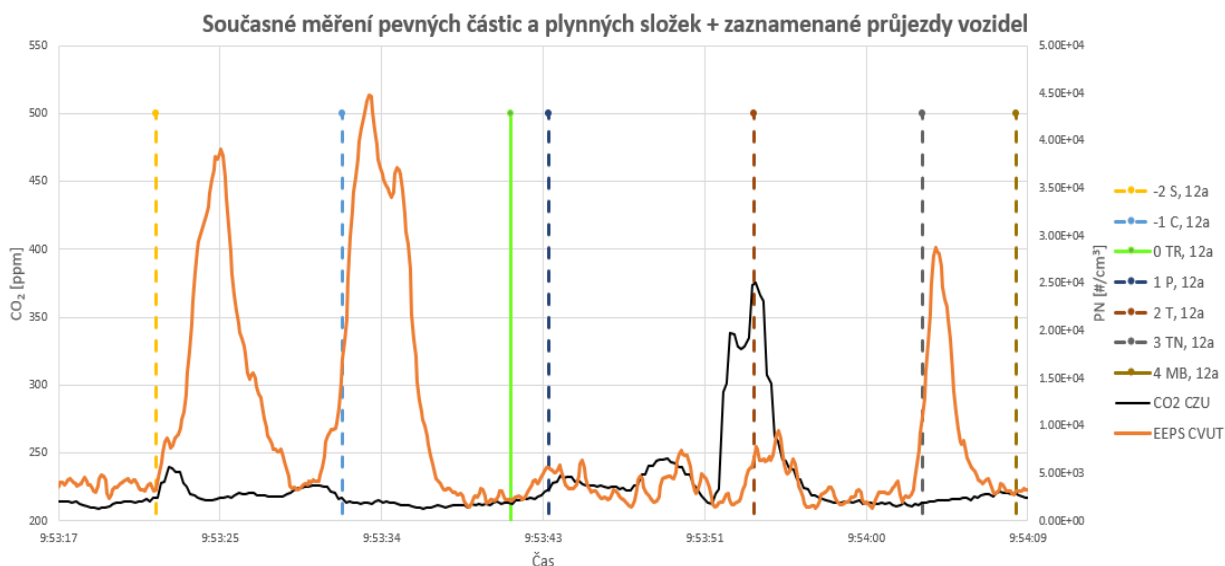
Graf 9 - Příklad příliš malých a hraničních časových rozestupů – EEPS



Vhodnější časové rozestupy jsou tak minimálně pětisekundové, ideálně ještě delší, jak je s výjimkou průjezdů vozidla s označením „Plume chaser“, které si udržovalo minimální rozestupy od ostatních po celý den, vidět na následujících grafech 10 a 11, kde jsou patrné mezery mezi špičkami jednotlivých průjezdů, v nichž klesá koncentrace jak pevných částic, tak i měřených plynných složek na úroveň pozadí. Ovšem při dodržení takto velikých rozestupů mezi vozidly (8s interval odpovídá při rychlosti 50 km/h rozestupu 111 m) by se ztrácela jedna z hlavních výhod dálkového měření emisí, tedy možnost naměřit vzorky z mnohem většího počtu vozidel za určitý čas než při měření v laboratoři či přístrojem PEMS. Vhodným kompromisem mezi tímto požadavkem a praktickou proveditelností měření se tak zdají časové rozestupy o velikosti 4 až 6 s.



*Graf 10 - Příklad vhodně zvolených časových rozestupů – FTIR*



*Graf 11 - Příklad vhodně zvolených časových rozestupů – EEPS*



#### 6.1.4 Příspěvek vozidel k okamžitým koncentracím CO<sub>2</sub>

Druhým převládajícím faktorem, který vytyčuje podmínky, jež je třeba splnit, aby bylo dálkové měření emisí metodou odběru vzorku z blízkosti dráhy proveditelné a jeho výsledky vypovídající, je množství dostatečně málo zředěných výfukových plynů, jež je nasáto měřicími přístroji. Jinak řečeno je třeba zachytit vzorek alespoň o takové koncentraci, kterou je možné kvantifikovat použitými přístroji s dostatečnou statistickou jistotou, tzv. mez kvantifikace. A mez kvantifikace měrných emisí (příslušných emisních faktorů) je závislá především na velikosti příspěvku CO<sub>2</sub> jednotlivých vozidel. [3]

Orientačně se lze k potřebné výši naměřených nárůstů koncentrace oxidu uhličitého (dále pouze CO<sub>2</sub>) dostat úvahou, že hodnota meze detekce sledované škodliviny konkrétního přístroje (trojnásobek směrodatné odchylky pozadí  $\sigma_{5s}$ ) by v poměru ku CO<sub>2</sub> měla být, pokud je cílem dálkového měření detekce nadměrných znečišťovatelů, menší nebo maximálně rovna poměru zvolené minimální hodnoty látkového množství škodliviny, jež chceme být schopni vyhodnotit, a látkového množství oxidu uhličitého obsaženého v 1 kg paliva. A za předpokladu, že nejistota měření CO<sub>2</sub> je poměrně malá oproti prahové hodnotě, kterou je nutné naměřit, je možné provést výpočet tak, jak je ukázáno níže v postupu (10), kde je vyčíslen potřebný příspěvek nákladního vozidla s označením „Truck“ k dalšímu vyhodnocení emisí NO.

V tomto případě byl pro tahač zvolen minimální emisní faktor, který je snaha dálkovým měřením s určitou statistickou jistotou zpracovat, o velikosti 1 g/kWh, což odpovídá přibližně dvojnásobku emisního limitu Euro VI (0,46 g/kWh), který by měl tahač plnit. Tato hodnota by měla vyloučit označení řádně provozovaných vozidel za nadměrné znečišťovatele. Je totiž třeba počítat s tím, že vlivem dynamických jízdních režimů nebude systém SCR vždy pracovat s více než 90% účinností, jak předpokládá norma Euro VI. Oproti tomu je takto zvolená mez kvantifikace přibližně o polovinu nižší, než by bylo možné dosáhnout u motoru bez fungujícího systému SCR pouze s pomocí vnitřní recirkulace (přibližně 2 g/kWh), takže by se zase na druhou stranu nemělo stát, že měřicí systém nezachytí vůz provozovaný bez potřebných aftertreatment systémů.

Tento postup byl učiněn na základě kalifornské studie [37], v níž je tato problematika popsána, a říká nám tedy, že při dané mezi detekce přístroje FTIR ČZU (viz *tabulka 7*) a této konkrétní zvolené limitní hodnotě měřené škodlivé látky v g/kg<sub>paliva</sub>, je ke



splnění nerovnice (10) třeba, aby byl příspěvek projíždějícího vozidla přibližně větší nebo roven 72 ppm CO<sub>2</sub>:

$$p = \frac{\frac{m_{NO}}{M_{NO}}}{\frac{m_{CO_2}}{M_{CO_2}}} = \frac{\frac{4,5}{46}}{\frac{3180}{44}} = 1,367 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{\sigma_{NO}}{CO_2} \leq p \Rightarrow \frac{3 \cdot \sigma_{5sNO}}{CO_2} \leq p \quad (10)$$

$$CO_2 \geq \frac{3 \cdot \sigma_{5sNO}}{p} \rightarrow CO_2 \geq \frac{3 \cdot 0,033}{1,367 \cdot 10^{-3}} \geq 72,42 \text{ ppm}$$

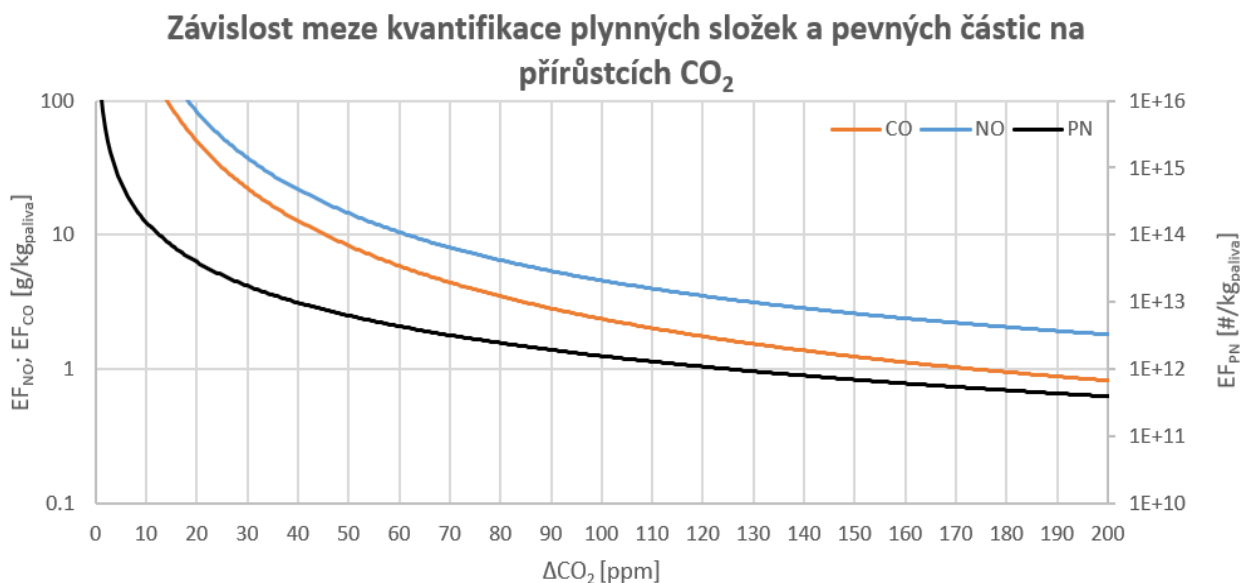
kde  $m_{NO}$  jsou emise NO na 1 kg paliva, přičemž platí, že tato hodnota je přibližně čtyři a půl násobek ekvivalentního údaje v g/kWh při uvažování měrné spotřeby paliva o hodnotě 220 g/kWh,  $m_{CO_2}$  je množství CO<sub>2</sub> v gramech na 1 kg paliva, což pro oba typy paliv přibližně odpovídá 3180 g/kg<sub>paliva</sub>,  $M_{NO}$  a  $M_{CO_2}$  jsou příslušné molární hmotnosti a  $\sigma_{5sNO}$  je hodnota šumu přibližně a uvedena v části 5.2.

Jak bylo zmíněno výše, tato hodnota je ovšem pouze orientační, protože zanedbává nejistotu při měření oxidu uhličitého, která je obvykle v řádu jednotek až 10 ppm. Po jejím zahrnutí se výše potřebného CO<sub>2</sub> v případě vozidla s označením „Truck“ při zachování všech ostatních parametrů zvýšila ze 72 ppm na téměř 95 ppm, jak je vidět z grafu 12, kde jsou vyneseny výsledné vyhodnotitelné hodnoty emisních faktorů jednotlivých sledovaných škodlivých látek na základě naměřeného příspěvku oxidu uhličitého pro měřicí přístroje FTIR ČZU a EEPS ČZU. Zde je nutné poznamenat, že pro zbylé dva analyzátoři z naší univerzity by tyto průběhy byly trochu odlišné, jelikož jsou závislé na hodnotě šumu daného přístroje.

Tento graf tak kromě jiného potvrzuje správnost předpokladu, že s rostoucím CO<sub>2</sub> lze detekovat a dále vyhodnotit nižší koncentrace škodlivých látek. Je ještě třeba zmínit, že nízké naměřené příspěvky oxidu uhličitého je možné také využít, ovšem kvůli vysoké



nejistotě pouze v případě identifikace vysokých znečišťovatelů, kterým byly naměřeny značné příspěvky sledovaných škodlivin. [3]



Graf 12 - Potřebné hodnoty nárůstu CO<sub>2</sub> k vyhodnocení průjezdů

Požadavek na co nejmenší zředění vzorků výfukových plynů je podpořen také nejistotami měření jednotlivých průjezdů, jak je vysvětleno níže. Pro stanovení nejistoty výsledného naměřeného poměru škodlivé látky ku CO<sub>2</sub> neexistuje žádná univerzální statistická metoda, jelikož do ní vstupuje mnoho různých faktorů. Z tohoto důvodu bylo pro její alespoň přibližné určení využito hned dvou postupů, aby se zamezilo možným zavádějícím výsledkům. Tím prvním je relativní nejistota vyjádřena vztahem: [38]

$$u_{r, \frac{x}{CO_2}} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_{CO_2}}{CO_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{5Hzx}}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{5HzCO_2}}{CO_2}\right)^2} \quad (11)$$

kde  $\sigma_{5Hzx}$  je hodnota šumu sledované škodliviny počítaná z převzorkovaných dat na společnou frekvenci 5 Hz, jelikož se v tomto výpočtu pracuje s hodnotami maxima peaku měřených koncentrací,  $x$  představuje příspěvek vozidla ke koncentraci sledované škodliviny (NO, CO, PN) a  $CO_2$  je hodnota nárůstu koncentrace oxidu uhličitého.

Tento vztah vychází z předpokladu, že souvislost mezi hledaným parametrem a přímo měřenými veličinami je jednoduchá funkce, v tomto případě podíl. Druhý postup poté využívá funkci „LINREGRESE“ v programu Microsoft Excel 2016, ve kterém byla naměřená data zpracována. Tato funkce vypočítává kromě sklonu lineární regrese průběhů koncentrace měřené škodliviny a CO<sub>2</sub>, jenž odpovídá výslednému poměru, také jeho





standardní chybu směrnice regresní přímky. Z ní je už velmi jednoduché prostým vydělením výsledným poměrem sledované škodliviny ku CO<sub>2</sub> vyjádřit relativní nejistotu, jež je ze své definice udávána v procentech. Velikosti této chyby odpovídá také hodnota příslušného Pearsonova korelačního koeficientu  $R^2$ , rovněž vypočítaná funkcí „LINREGRESE“.

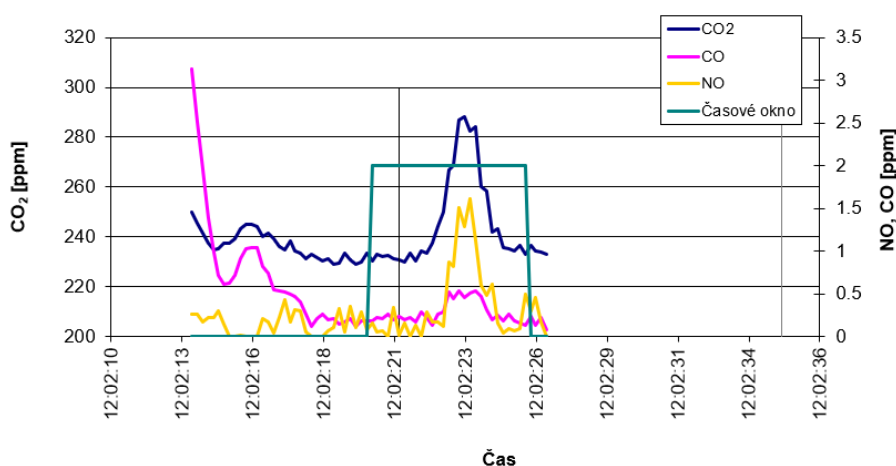
Vyjádření relativních nejistot naměřených koncentrací z jednotlivých průjezdů je poté velice názorným vodítkem, jestli je konkrétní průjezd detekovatelný a vyhovující k dalšímu zpracování či nikoliv. Velikost nejistoty totiž závisí právě na míře zředění odebraných vzorků výfukových plynů, tedy naměřených příspěvků sledovaných škodlivin a také oxidu uhličitého.

Postup selekce jednotlivých průjezdů je velice přímočarý. Nejdříve je zhodnocena relativní nejistota počítaná dle (11), jelikož pracuje s absolutními hodnotami nárůstů jednotlivých měřených látek, tedy nehledí na jejich průběhy v čase. Je tak benevolentnější z obou použitých postupů, a proto byla tato relativní nejistota vybrána jako vhodný rozřazovací parametr, zda má daný průjezd cenu dále řešit. Pokud je její hodnota rozumně nízká (maximálně kolem 40 %, jelikož se jedná často o velmi malá čísla), tak je u příslušných průjezdů následně zhodnocena i druhá relativní nejistota, která již bere v úvahu i vzájemný průběh měřených koncentrací v čase. V případě, že jsou obě relativní nejistoty velmi nízké, tedy v řádu jednotek až nízkých desítek procent, lze s největší pravděpodobností škodlivou látku detekovat a s určitou statistickou jistotou i vyhodnotit. Dále se může ukázat, že jedna z nejistot, obvykle ta vypočítaná z regrese, je vyšší než druhá, a to často i výrazně. V takovém případě je třeba přistoupit k analýze grafů časových průběhů koncentrací měřených látek a rozhodnout, zda je třeba daný průjezd, ať už z důvodu ovlivnění oblakem z jiného vozidla či kvůli neodpovídajícím časovým průběhům, vyřadit jako nekvantifikovatelný. Znovu se tedy ukazuje, že nelze měření vyhodnocovat pouze strojově a až ruční zhodnocení grafu daného průjezdu často vede ke konečnému rozhodnutí, zda lze průjezd detekovat.

Zde je ukázka několika typických variant výsledků, co je dle grafu považováno za úspěšně naměřený průjezd a co nelze dále vyhodnotit. Nejprůkaznější jsou samozřejmě průjezdy, u kterých se podařilo odebrat mnohonásobně vyšší vzorek koncentrací sledovaných látek, než je hodnota šumu. V takových případech je výsledná nejistota dle vztahu (11) velmi nízká, navíc k tomu je většinou, pokud tedy nedošlo k interferenci s dalšími průjezdy, nízká také nejistota lineární regrese. Takovou variantu se podařilo

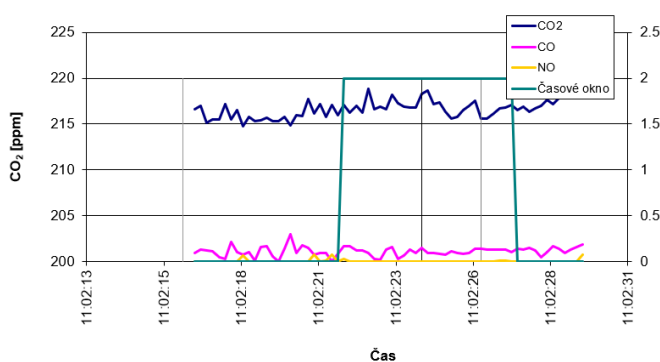


zachytit například při průjezdu motocyklu s označením „Motorbike“ ve 12:02:21, kdy jsou výsledné koncentrace zatíženy relativní nejistotou menší než 20 % podle obou zmíněných způsobů výpočtu. Další takový průjezd, kde jsou hodnoty relativní nejistoty dokonce pouze v jednotkách procent, je zobrazen na grafu 4 v části 5.3.1.

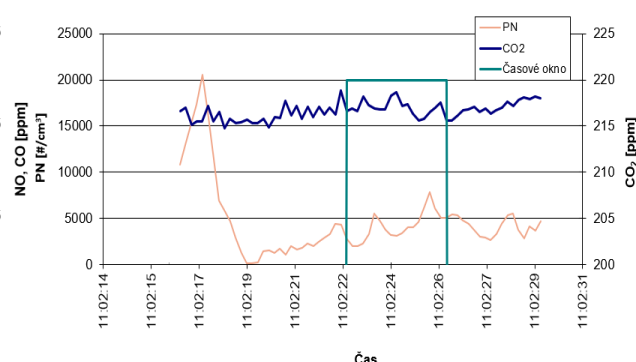


Graf 13 – Příklad průběhu koncentrací plyných složek s velmi nízkou nejistotou měření

Další poměrně snadnou kategorií na posouzení jsou takové průjezdy, kdy jsou naměřené koncentrace menší, případně pouze jen o něco málo větší, než je hodnota šumu. Poté šplhají hodnoty výsledné relativní nejistoty na stovky až tisíce procent. U takových průjezdů ani není třeba ztrácet čas ruční kontrolou, jelikož jak je patrné z grafů 14 a 15 (průjezd vozidla označeného „Transporter“ v 11:02:24), nemá cenu s nimi dále pracovat.



Graf 14 - Příklad průběhu koncentrací plyných složek s vysokou mírou nejistoty měření

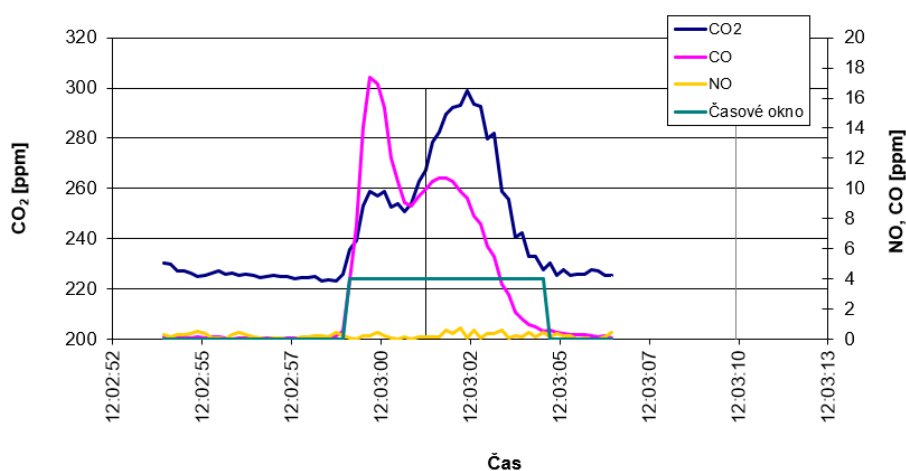


Graf 15 - Příklad průběhu koncentrací pevných částic s vysokou mírou nejistoty měření

Nejproblematictější, jak už bylo zmíněno výše, je případ, kdy jedna z nejistot vychází příznivě a druhá nikoliv. V takovém případě je ruční kontrola průběhů nutná, jelikož takový průjezd lze za určitých okolností i přes to považovat za vyhovující. Příkladem takové varianty pro případ detekce CO je průjezd vozidla „Touran“ v 12:03:01. U něj je totiž relativní nejistota z lineární regrese rovna 44 % oproti 6 % z druhého postupu. Jak je patrné

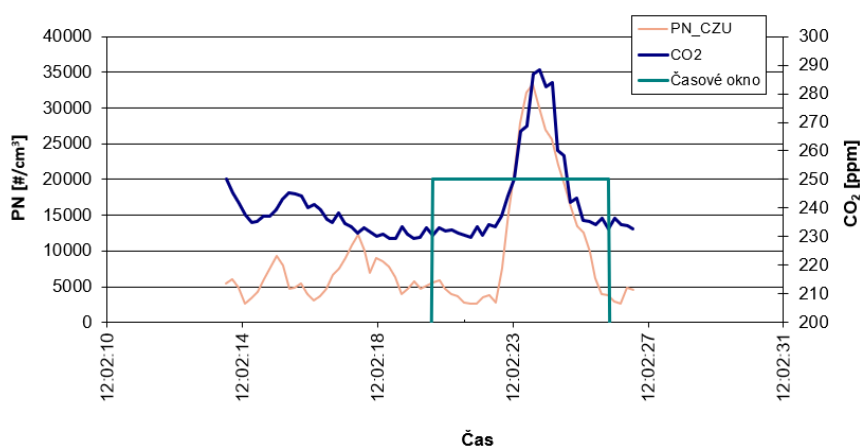


z grafu 16, tato nesrovnalost je dána lehce rozdílnými časovými průběhy, to ovšem neznamená že daný průjezd nelze detekovat a vyhodnotit, protože je díky více než desetisekundovým časovým rozestupům od ostatních průjezdů téměř nemožné, aby byla příčinou interference od jiného vozidla.



Graf 16 - Příklad vyhodnotitelných koncentrací plyných složek s protichůdnými hodnotami nejistoty měření

Zde na grafu 17 je zachycena obdobná situace, tentokrát při měření koncentrace pevných částic. Jedná se o stejný průjezd, jaký je vyobrazen na grafu 13 a znovu je vlivem mírně odlišných časových průběhů obou sledovaných koncentrací o řád vyšší relativní nejistota lineární regrese (v tomto případě 32 %) než hodnota vyjádřená na základě výpočtu (11) – 8 %. I v tomto případě je ale tento průjezd bez problémů detekovatelný a vyhodnotitelný.

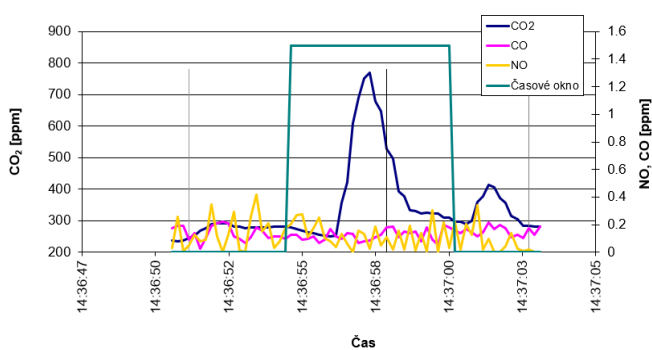


Graf 17 - Příklad vyhodnotitelných koncentrací pevných částic s protichůdnými hodnotami nejistoty měření

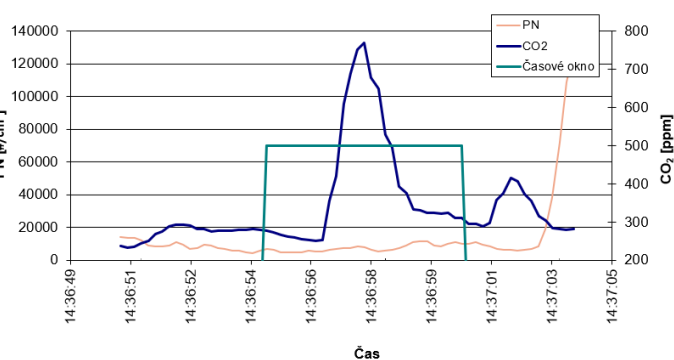
Další možnou variantou kvantifikovatelných průjezdů jsou takové průjezdy, kdy je naměřen dostatečný příspěvek oxidu uhličitého, ale koncentrace škodlivin jsou pouze stopového množství. V takových případech je možné dojít k závěru, že množství



emitovaných škodlivin je nižší, než jaké jsou použité přístroje schopny detekovat. Jedná se tak o tzv. čistý průjezd vozidla. Takových průjezdů sice nebylo příliš mnoho, jelikož určitá vozidla měla nainstalované určité systémy ke zvýšení emisí, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, ale je třeba je brát v potaz a zahrnout do množiny vyhodnotitelných průjezdů, i když u nich relativní nejistoty měření kvůli nízkým koncentracím škodlivin dosahují vysokých desítek až stovky procent. Jako příklad je zde na grafech níže uveden průjezd vozidla „Truck“ ve 14:36:58, kterému v tento čas viditelně fungovaly všechny systémy snižující emitované škodliviny včetně SCR systému a filtru pevných částic.

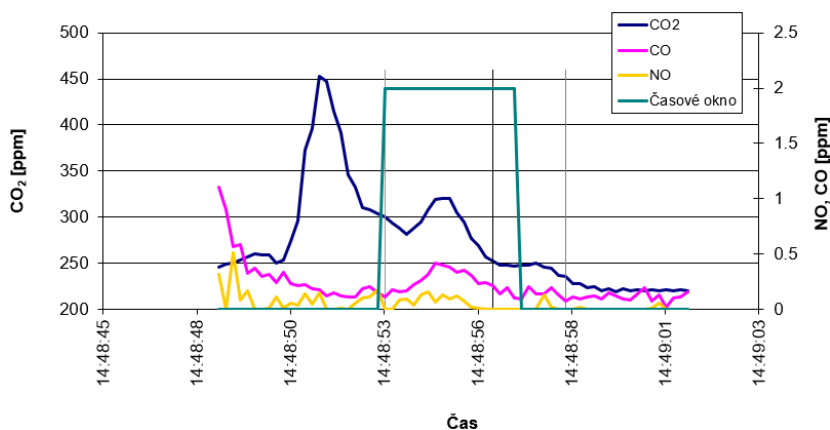


Graf 18 - Příklad tzv. čistého průjezdu z hlediska plynných složek



Graf 19 - Příklad tzv. čistého průjezdu z hlediska pevných částic

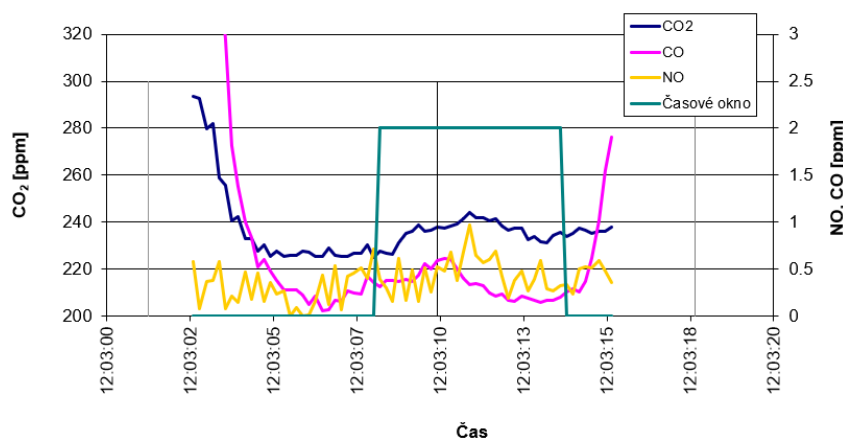
Obvykle je ovšem takováto varianta signálem, že výsledné naměřené koncentrace škodlivin daného průjezdu jsou zkresleny či ovlivněny výfukovými plyny ostatních vozidel, jako je tomu u průjezdu vozidla označeného „Touran“ ve 14:48:56 (graf 20), kdy i přes vyhovující časový rozestup 4 s a poměrně nízkou míru nejistoty měření (kolem 20 % pro lineární regresi) nelze tento průjezd s dostatečnou statistickou jistotou vyhodnotit.



Graf 20 - Příklad nevyhodnotitelných koncentrací plynných složek s protichůdnými hodnotami nejistoty měření vlivem zkreslení ostatními průjezdy



Častějším důvodem pro vyřazení určitého průjezdu je ovšem to, že navzdory často nízké velikosti nejistoty regrese a dostatečným nárůstům koncentrace sledovaných škodlivin je příspěvek oxidu uhličitého od projíždějícího vozidla nedostatečný. Jako jeden příklad za všechny lze uvést průjezd vozidla označeného „Caddy“ v 12:03:10, jenž je na grafu 21, kde i přes 9s odstup od předchozího průjezdu a pouze pětadvaceti procentní nejistotu lineární regrese nelze tento průjezd dále zpracovat.



Graf 21 - Příklad nevyhodnotitelných koncentrací plyných složek s protichůdnými hodnotami nejistoty měření kvůli nedostatku CO<sub>2</sub>

Ve výsledku tak lze na základě poznatků popsaných v této kapitole dále zúžit množinu průjezdů, které lze s určitou statistickou jistotou vyhodnotit. Výpočet nejistot a následná nutná ruční kontrola zaznamenaných průjezdů totiž pomůže odhalit případné nedostatky selekce průjezdů na základě časových rozestupů, a navíc je z grafů patrné, zda se jedná o tzv. čistý průjezd vozidla či relativně běžný průjezd s pouze mírně zvýšenou hladinou emitovaných škodlivin, kdy je nutné naměřit příspěvek oxidu uhličitého alespoň ve výši odpovídající grafu 12, nebo jestli se jedná o vysokého znečišťovatele, kdy je možné dokonce pracovat s nižšími hodnotami CO<sub>2</sub> i přes o něco větší výslednou nejistotu. Z původních 414 průjezdů tak zbylo 104 splňujících všechny tyto požadavky.

Velikost nejistot dle obou postupů výpočtu a příslušné hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu všech zaznamenaných průjezdů a průběhy meze kvantifikace sledovaných škodlivin v závislosti na příspěvku oxidu uhličitého pro jednotlivé přístroje jsou uvedeny v příloze Nejistoty.xlsx.

## 6.2 Výsledné použitelné průjezdy jednotlivých vozidel

Pro lepší přehlednost, jakou měrou je vlivem limitů metody omezen počet správně vyhodnotitelných průjezdů, je v této části pro každé testovací vozidlo vedle přehledu



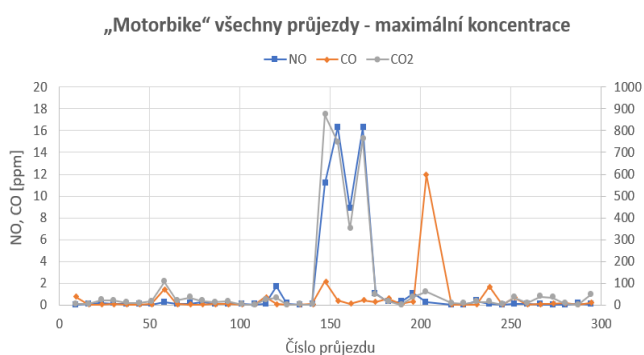
naměřených koncentrací vyfiltrovaných průjezdů uveden ještě jeden obsahující všechny zaznamenané průjezdy. A to pro plynné složky, kde jsou zpracované hodnoty naměřené přístrojem FTIR ČZU (měřil lépe než druhý infračervený spektrometr, jak bylo zmíněno v kapitole 4.2.2), jehož jedinou nevýhodou je skutečnost, že byl v provozu pouze do patnácti hodin, tudíž jím jsou zachyceny přibližně tři čtvrtiny z celkového počtu průjezdů. To je ovšem pro účely této práce plně dostačující. A také pro pevné částice, kde jsou zpracované hodnoty z přístroje EEPS ČVUT, jelikož druhý čítač částic nebyl během první stovky průjezdů v provozu.

Tento přístroj odebíral vzorky ze středu jízdního pruhu, což ovšem znamená, že je třeba tyto naměřené koncentrace vztáhnout k příspěvkům oxidu uhličitého odebíraným ze stejného místa, tedy ke vzorkům z přístroje FTIR ČVUT. Jeho výsledky sice nejsou stoprocentní, ale přesto byl schopen detekovat ty nejvýznamnější průjezdy, kdy jsou naměřené nárůsty  $\text{CO}_2$  mnohonásobně vyšší, než je hodnota šumu přístroje.

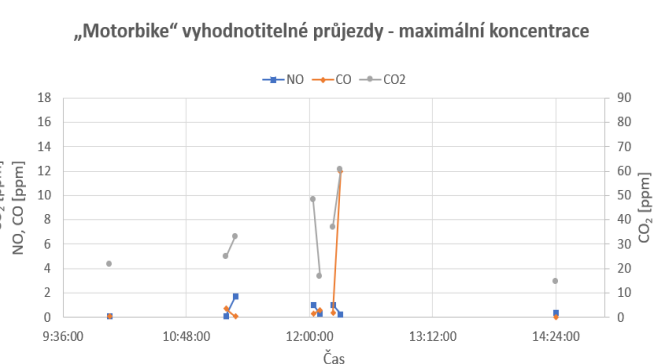
Kromě toho je u všech vozidel uveden graf s hodnotami výsledného emisního faktoru v čase a v příslušných jednotkách, aby bylo možné rychle vyhodnotit, zda byly splněny předepsané emisní normy či nikoliv. Všechny tyto údaje včetně dalších podpůrných parametrů jsou uvedeny v souboru Roadside\_průjezdy.xlsx, jenž je přiložen k této práci.

## 6.2.1 Vozidlo „Motorbike“

### 6.2.1.1 Emise plynných složek



Graf 22 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „MB“



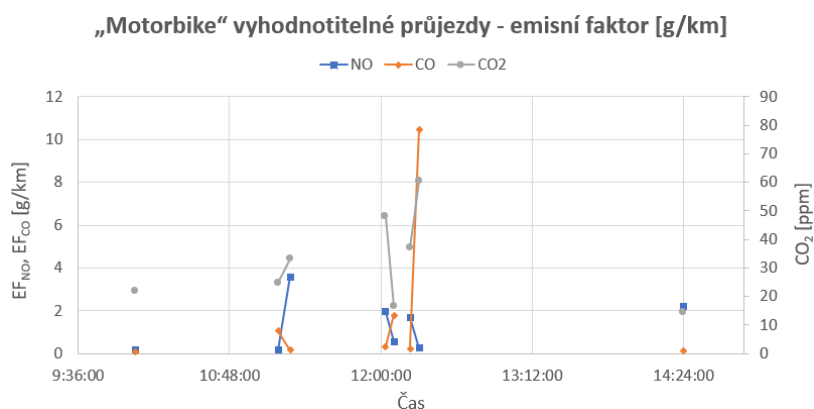
Graf 23 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „MB“

Jako „Motorbike“ byl v tomto experimentu označen motocykl Yamaha MT-07, přirozeně se zážehovým motorem, jenž by měl splňovat emisní normu Euro 5. Na grafech 22 a 23 jsou znázorněny naměřené maximální koncentrace všech, respektive vyfiltrovaných



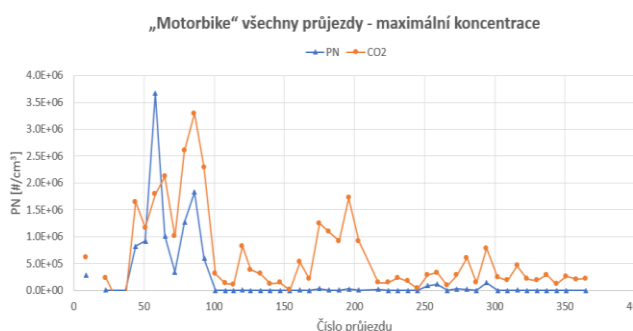
průjezdů. Z toho je patrné, že bylo vyhodnoceno celkem 8 průjezdů, které lze s určitou statistickou jistotou vyhodnotit. U ostatních byl zachycen příliš malý příspěvek oxidu uhličitého nebo byly výsledky viditelně ovlivněny průjezdy ostatních vozidel.

Na základě grafu 24 lze poté prohlásit, že první dva průjezdy odpovídají emisním limitům (viz tabulka 2), kdežto u zbytku je patrná nadbytečná koncentrace buď NO, nebo CO. Zatímco tvorba NO je typicky největší při mírně chudých směsích, tak k nárůstu CO dochází během obohacování při větším zrychlení, kdy je naopak ve směsi kyslíku nedostatek. A zdaleka nejvyšší naměřená koncentrace CO je detekována právě během sportovní akcelerace, jež byla měřena krátce po dvanácté hodině.

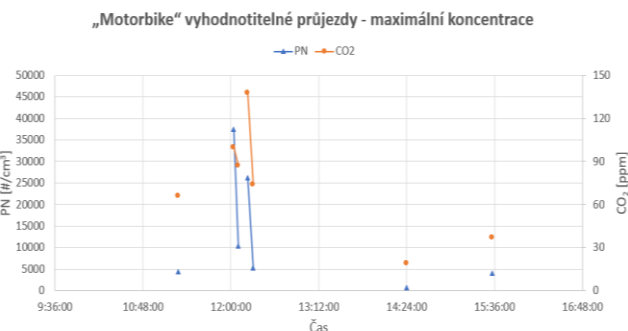


Graf 24 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „MB“

### 6.2.1.2 Emise pevných částic



Graf 25 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „MB“

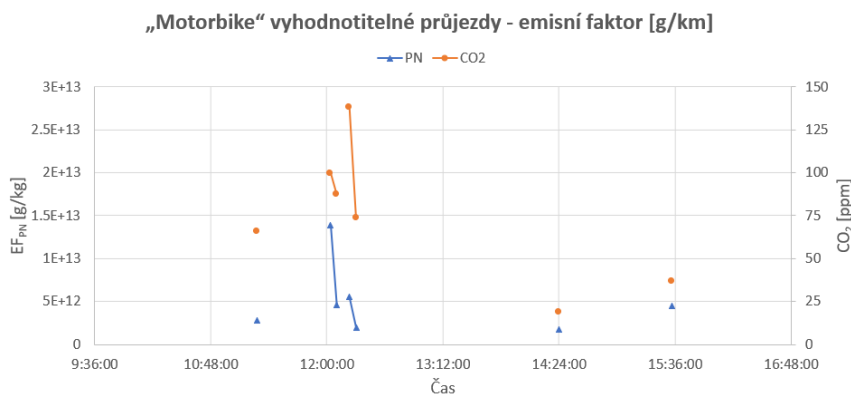


Graf 26 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „MB“

Velice podobné závěry lze učinit i pro měření koncentrací pevných částic. Zde bylo vybráno 7 vyhovujících průjezdů, jak je vidět z grafů výše, zbytek musel být vyfiltrován ze stejných důvodů jako u plynných složek. Vozidla kategorie L nemají legislativně předepsaný maximální počet emitovaných pevných částic za ujetý kilometr, takže z tohoto pohledu všechny uvedené průjezdy v grafu 27 vyhovují. Je možné si znovu všimnout, že nejvyšších



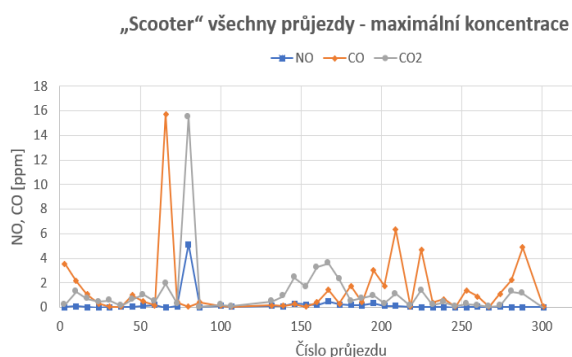
hodnot bylo naměřeno po dvanácté hodině během prudkého zrychlování měřeného vozidla.



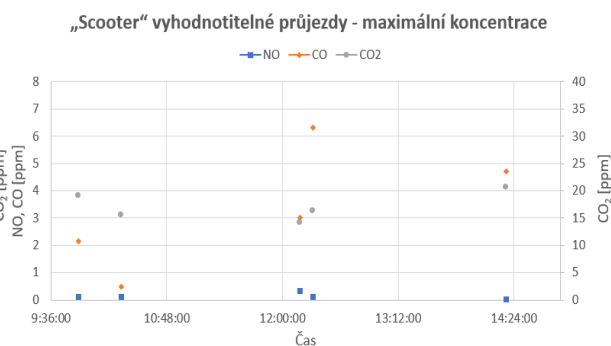
Graf 27 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „MB“

## 6.2.2 Vozidlo „Scooter“

### 6.2.2.1 Emise plyných složek



Graf 28 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „S“



Graf 29 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „S“

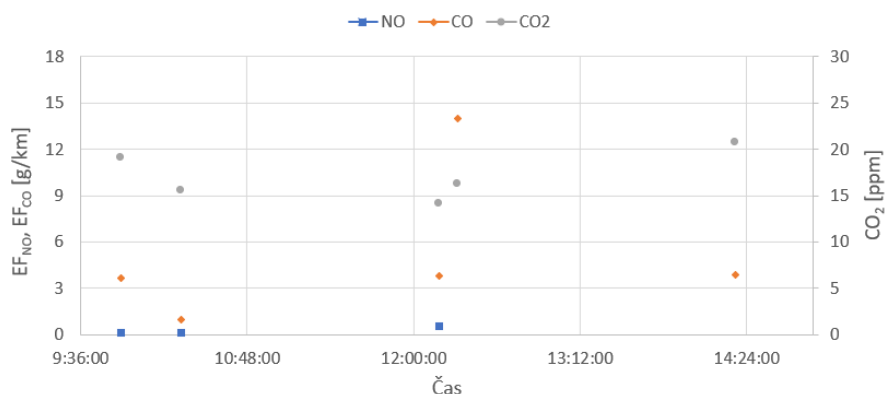
Yamaha N-Max neboli „Scooter“, je druhým vozidlem kategorie L testovaným v rámci tohoto experimentu. Jak je vidět z grafů 28 a 29, u tohoto vozidla bylo možné dále zpracovat pět průjezdů z hlediska měření plyných složek výfukových plynů, což je opět způsobeno nízkými příspěvky  $CO_2$  a nedostatečnými rozestupy.

Z grafu 30 lze vyčíst, že jeden průjezd splňuje emisní předpisy a u zbylých čtyř byla detekována vyšší koncentrace oxidu uhelnatého, přičemž ty nejvyšší opět odpovídají sportovní akceleraci. Kromě toho je na prvním průjezdu vidět fenomén studeného startu, jelikož se jednalo teprve o druhé kolo daného motocyklu kolem zkušební dráhy.





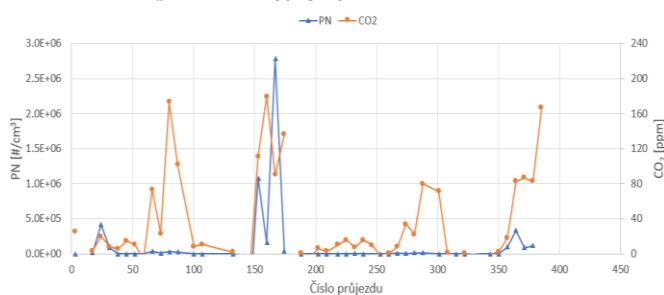
„Scooter“ vyhodnotitelné průjezdy - emisní faktor [g/km]



Graf 30 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „S“

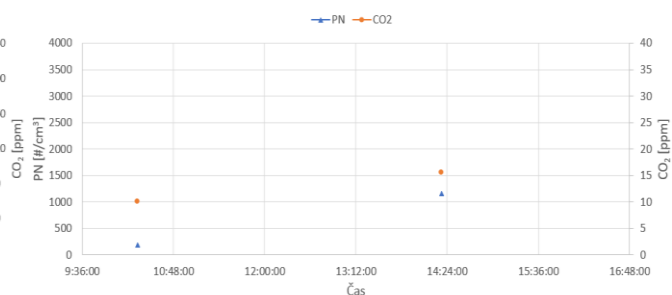
### 6.2.2.2 Emise pevných částic

„Scooter“ všechny průjezdy - maximální koncentrace



Graf 31 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „S“

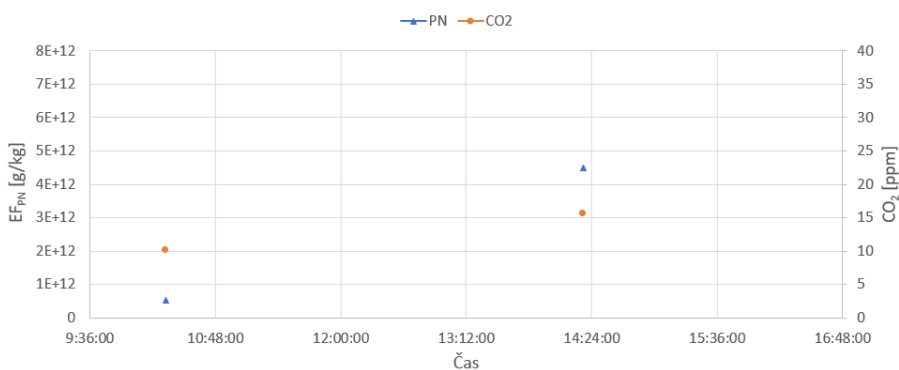
„Scooter“ vyhodnotitelné průjezdy - maximální koncentrace



Graf 32 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „S“

Znovu je situace podobná i v případě měření pevných částic, zde dokonce prošly pouze dva průjezdy. Na grafu 31 je dobře patrné, že s výjimkou viditelně vyčnívajících špiček, které jsou dány výfukovými oblaky z dalších vozidel, jsou naměřené koncentrace jak CO<sub>2</sub>, tak PN většinou pod mezí detekce. I mezi vyhodnotitelnými průjezdy se hodnoty částic na krychlový centimetr pohybují pouze lehce nad mezí detekce přístroje, čemuž odpovídají i příslušné emisní faktory na grafu 33.

„Scooter“ vyhodnotitelné průjezdy - emisní faktor [g/km]



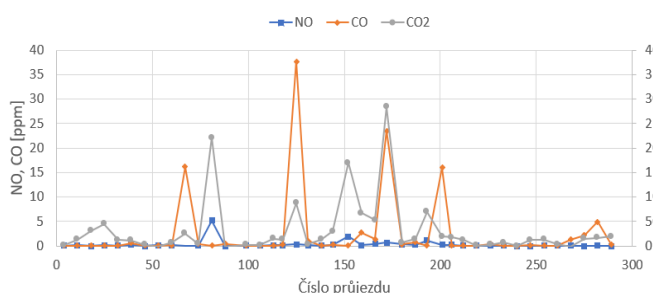
Graf 33 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „S“



## 6.2.3 Vozidlo „Caddy“

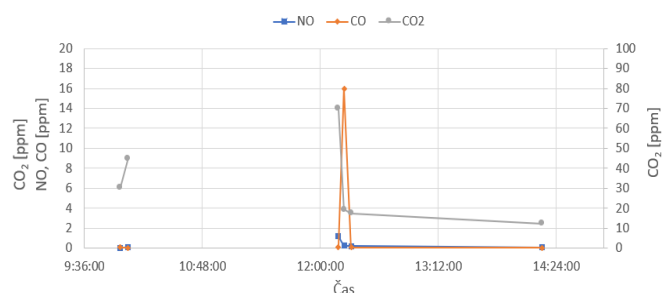
### 6.2.3.1 Emise plyných složek

„Caddy“ všechny průjezdy - maximální koncentrace



Graf 34 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „C“

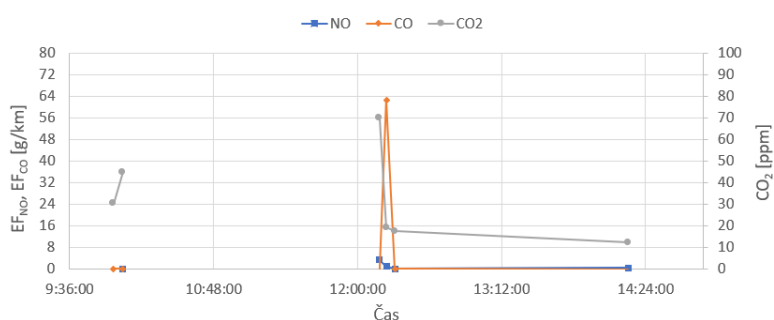
„Caddy“ vyhodnotitelné průjezdy - maximální koncentrace



Graf 35 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „C“

„Caddy“ je kódové označení pro Volkswagen Caddy se vznětovým motorem, jenž by měl plnit emisní normu Euro 5. A jak je vidět zde na grafech 35 a 36, ze 6 vyhodnotitelných průjezdů z hlediska detekce plyných škodlivin celkem 4 tyto limity splňují. Jediným rozdílem jsou průjezdy s prudkou akcelerací, kdy je v jednom případě naměřené zvýšené množství NO a při následném průjezdu především vysoká koncentrace CO, která je nejspíše způsobena vysokým obohacením směsi a přiblížením se k mezi kouřivosti motoru.

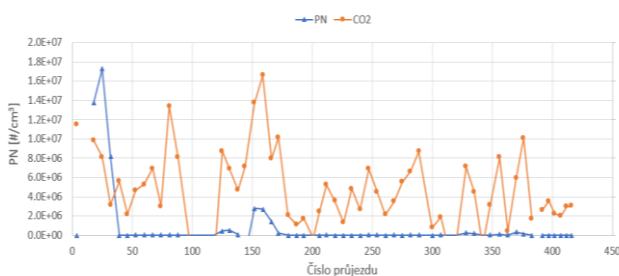
„Caddy“ vyhodnotitelné průjezdy - emisní faktor [g/km]



Graf 36 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „C“

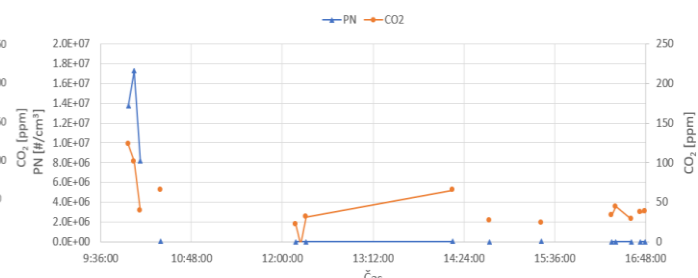
### 6.2.3.2 Emise pevných částic

„Caddy“ všechny průjezdy - maximální koncentrace



Graf 37 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „C“

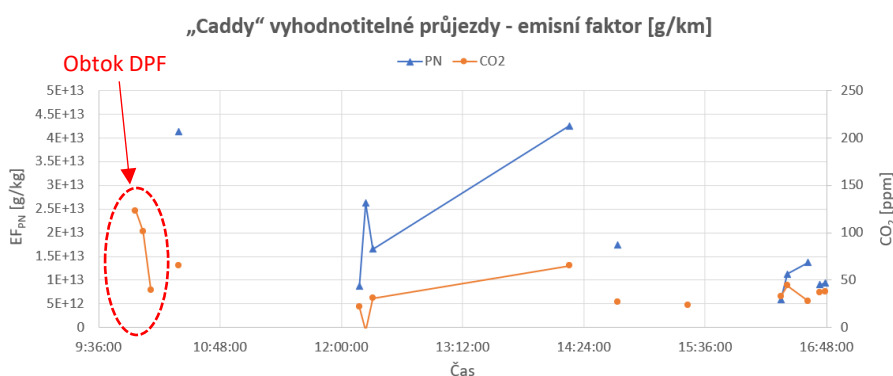
„Caddy“ vyhodnotitelné průjezdy - maximální koncentrace



Graf 38 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „C“



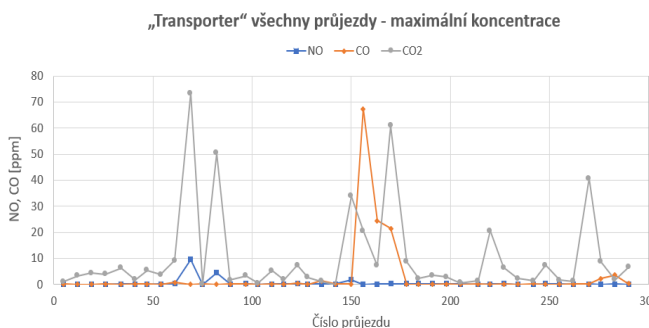
O něco více úspěšných průjezdů se podařilo detekovat z hlediska sledování koncentrace pevných částic, a to celkem čtrnáct, jak je patrné z grafu 38. Na něm je také vidět, že během prvních tří denních průjezdů byly naměřeny o několik řádů vyšší koncentrace pevných částic než ve zbytku dne. Důvodem může být buď fakt, že ještě nebyl celý pohonný systém vozidla zahřátý na dostatečnou teplotu nebo, pravděpodobněji, byl pomocí speciálního zařízení obtékán filtr pevných částic. Pro lepší přehlednost tak byly tyto průjezdy, jímž odpovídají emisní faktory o hodnotách  $\{1,04 \cdot 10^{16}; 1,59 \cdot 10^{16}; 1,96 \cdot 10^{16}\} \text{ g/kg}$ , ponechány mimo rozsah grafu 39, aby bylo dobře patrné, že v průběhu dne již fungovala regulace počtu částic emitovaných do ovzduší velmi dobře a naměřené koncentrace se dostaly na úroveň ostatních testovaných vozidel s filtrem pevných částic.



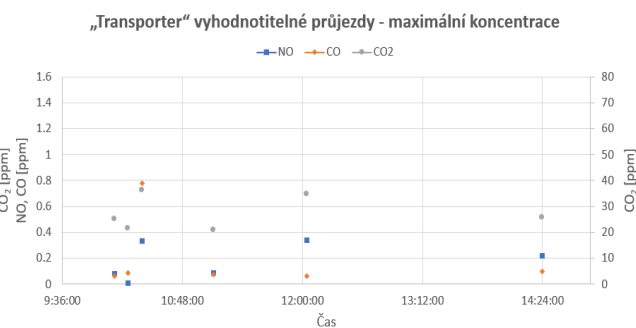
Graf 39 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „C“

## 6.2.4 Vozidlo „Transporter“

### 6.2.4.1 Emise plyných složek



Graf 40 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TR“

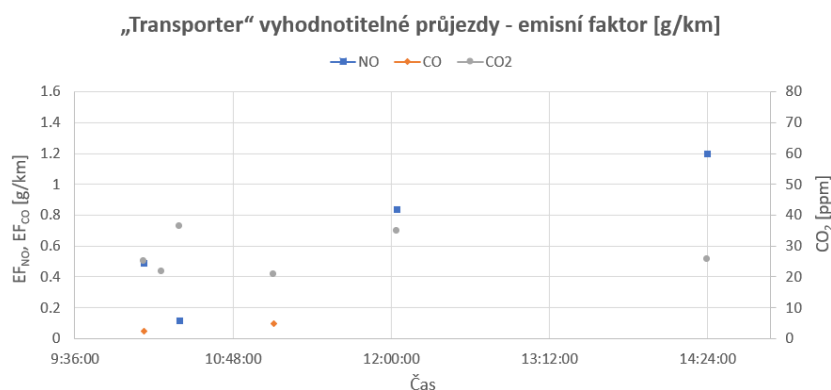


Graf 41 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TR“

Jako „Transporter“ byl označen Volkswagen Transporter, tedy dodávka kategorie N1, opět se vznětovým motorem. I zde bylo z hlediska detekce plyných emisí vyhodnoceno šest průjezdů jako vyhovujících pro další analýzu, přičemž v polovině z nich

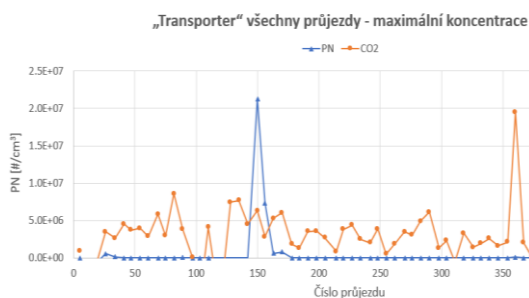


se podařilo detekovat nadměrné emise NO, jak je vidět z grafu 42. V těchto průjezdech se tak lze domnívat, že bylo využito SCR emulátoru, tedy zařízení, jež snižuje účinnost systému selektivní katalytické redukce. Oproti tomu zde nedošlo k detekci nadměrné koncentrace CO.

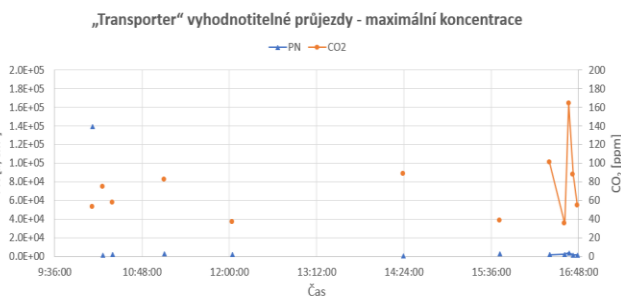


Graf 42 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TR“

### 6.2.4.2 Emise pevných částic

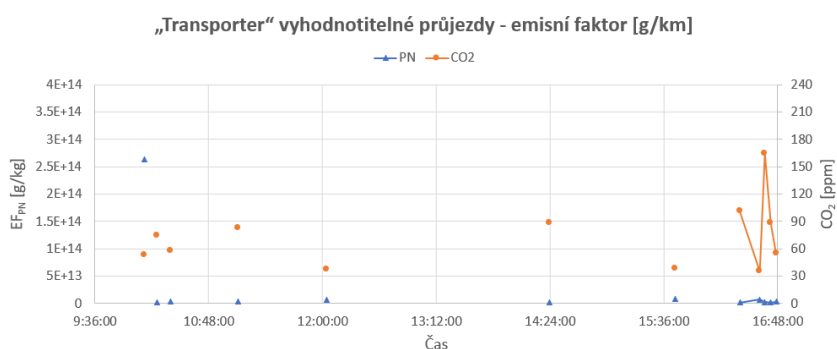


Graf 43 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TR“



Graf 44 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TR“

Stejně jako u předchozího vozidla, i pro Volkswagen Transporter se podařilo naměřit více průjezdů, které lze dále zkoumat z hlediska emisí pevných částic. V tomto případě je jich celkem dvanáct. A na zde uvedených grafech 44 a 45 lze vyčíst, že filtr pevných částic opět fungoval správně a nebylo s ním nijak manipulováno. Jedinou výjimku tvoří první vyhodnotitelný průjezd, kde se opět nejspíš projevuje fenomén studeného startu.

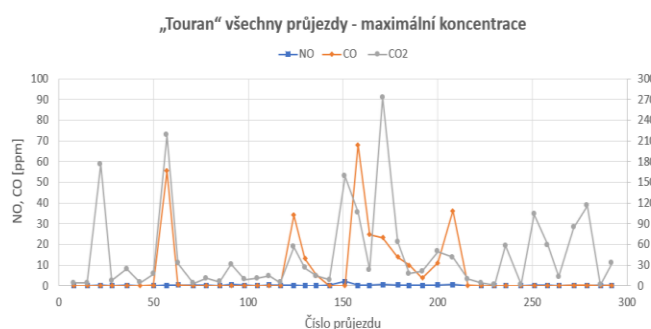


Graf 45 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TR“

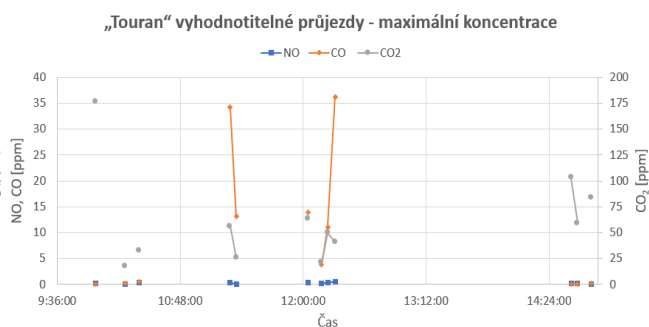


## 6.2.5 Vozidlo „Touran“

### 6.2.5.1 Emise plyných složek

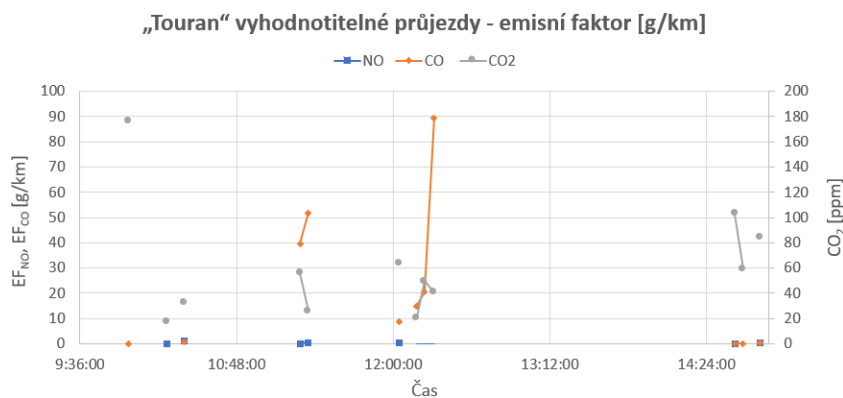


Graf 46 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TN“



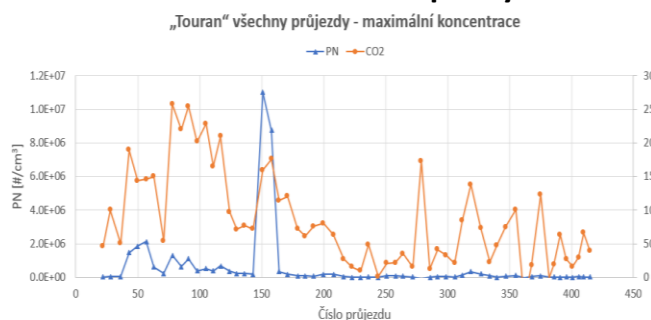
Graf 47 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TN“

„Touran“, čili Volkswagen Touran, je vozidlo s přímovstříkovým zážehovým motorem, čemuž odpovídají také naměřené koncentrace jednotlivých průjezdů. U celkem dvanácti průjezdů vyhovujícím všem limitům metody ani jednou nedošlo k zachycení nadměrných koncentrací NO, jak je ostatně patrné i z hodnot emisních faktorů v grafu 48. Vysoké koncentrace oxidu uhelnatého jsou opět spojeny s obohacováním směsi během prudkých akcelerací (znovu především krátce po dvanácté hodině).

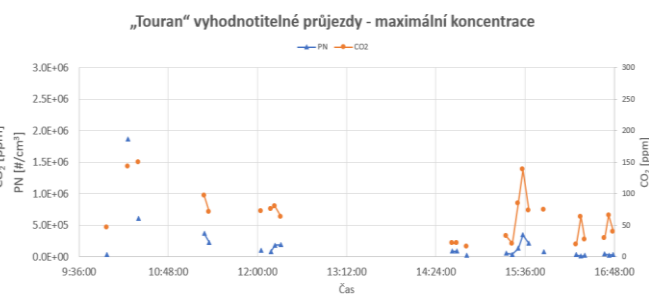


Graf 48 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TN“

### 6.2.5.2 Emise pevných částic



Graf 49 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TN“

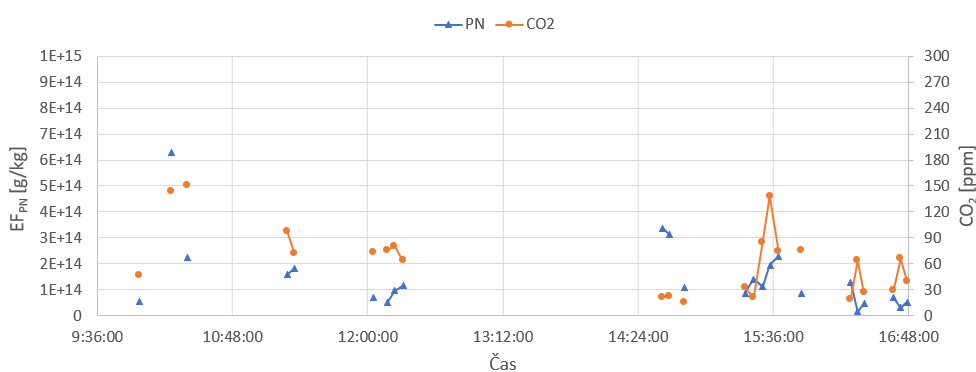


Graf 50 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TN“



Možná zajímavější jsou ovšem výsledky z měření koncentrace pevných částic. Testované vozidlo by totiž mělo plnit normu Euro 5, ve které není předepsaný maximální počet emitovaných pevných částic na ujetý kilometr, tudíž ještě není osazeno filtrem pevných částic. Tento fakt je také dobře patrný z výsledků měření. Celkem bylo vybráno dvacet čtyři průjezdů jako vyhovujících dostatečných rozestupů i naměřených příspěvků sledovaných škodlivin. A jak je vidět z grafu 51, výsledné hodnoty emisních faktorů jsou minimálně o řád, spíše o dva řády vyšší než u předešlých sledovaných automobilů. Ukazuje se tak význam použití filtru pevných částic a správnost zařazení požadavku na omezení emisí pevných částic u vozidel se zážehovými motory s přímým vstřikem do normy Euro 6.

„Touran“ vyhodnotitelné průjezdy - emisní faktor [g/km]

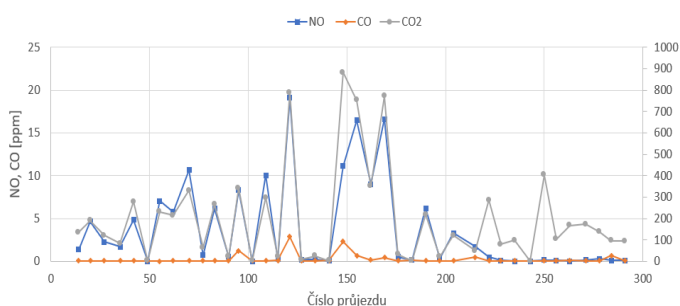


Graf 51 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TN“

## 6.2.6 Vozidlo „Truck“

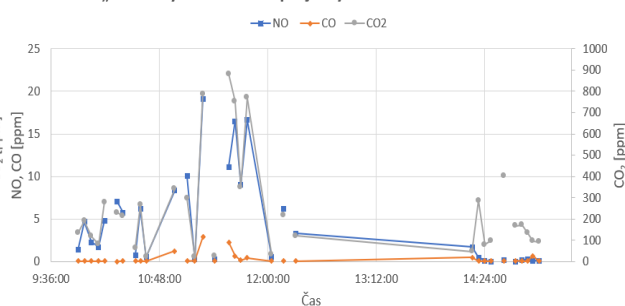
### 6.2.6.1 Emise plyných složek

„Truck“ všechny průjezdy - maximální koncentrace



Graf 52 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „T“

„Truck“ vyhodnotitelné průjezdy - maximální koncentrace



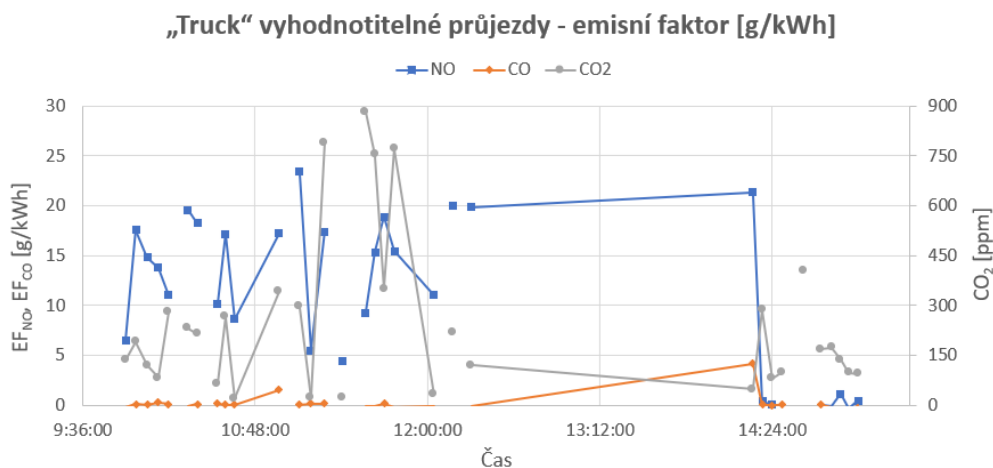
Graf 53 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „T“

Ford F-Max neboli „Truck“, jako jediný z testovacích vozidel patří do kategorie N3, tedy těžkých užitkových vozidel nad 12 tun. Díky tomu se dalo předpokládat, že bude mít největší příspěvky sledovaných škodlivin ze všech měřených automobilů a motocyklů. A tato hypotéza se potvrdila, jak je dobře patrné na výše uvedených grafech. Z celkových 41



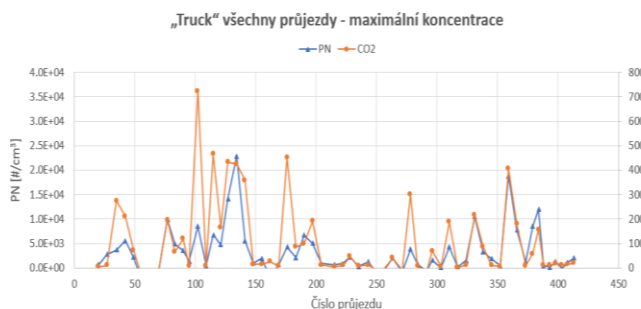
zaznamenaných průjezdů bylo z pohledu plynných emisí hned 32 vybráno k další analýze, což je zdaleka nejvíce ze všech testovacích vozidel, především díky většinou více než dostatečným nárůstům koncentrace oxidu uhličitého během průjezdů. Za nevyhovující jsou zde označeny průjezdy z převážné většiny kvůli nedostatečným časovým rozstupům.

Na grafu 54 lze velice názorně vidět, že tahač neměl problém s koncentracemi oxidu uhelnatého, jež ani jednu nepřekročily předepsanou limitní hodnotu 4 g/kWh, na druhou stranu ovšem během dopolední části měření nebyla ani jednou naměřena taková koncentrace oxidu dusnatého, aby byl příslušný emisní faktor nižší než je hodnota předepsaná emisní normou Euro VI. Existuje tak důvodné podezření, že právě během těchto průjezdů byl aktivován již výše zmíněný SCR-emulátor, který ovlivnil účinnost dodatečné likvidace oxidů dusíku ve spalínách. Této teorii nahrává i fakt, že během odpolední části měření od 14:15:00, tedy s jedinou výjimkou prvního průjezdu po pauze, kdy se nejspíše projevila efekt studeného startu, byly naměřeny takové příspěvky NO, které emisní limity splňují.

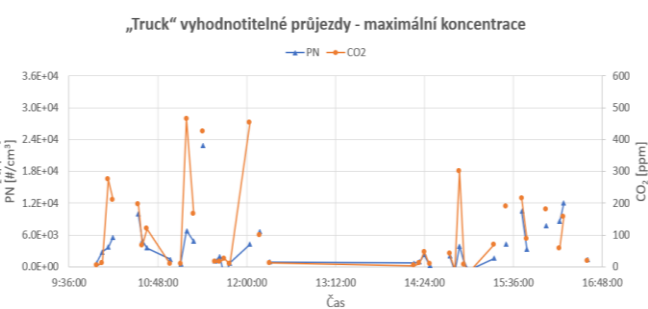


Graf 54 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „T“

### 6.2.6.2 Emise pevných částic



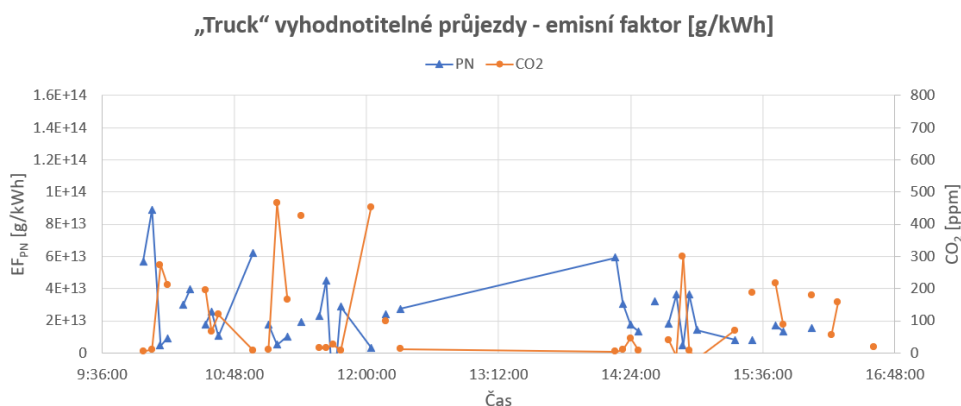
Graf 55 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „T“



Graf 56 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „T“



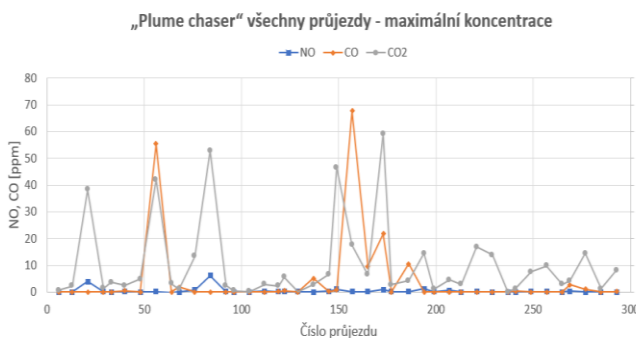
Obdobné úspěšnosti bylo dosaženo i z hlediska měření koncentrace pevných částic, jelikož zde bylo z celkem 61 průjezdů vybráno hned 40 k další analýze. Z uvedených výsledků (graf 57) je patrné, že i když toto vozidlo má zabudovaný filtr pevných částic, produkuje měřitelné množství částic, ať už vlivem snížené účinnosti filtru nebo vlivem tzv. sekundárních částic vzniklých až za DPF filtrem z plyných prekurzorů. I přesto jsou hodnoty emisních faktorů často nižší než u Volkswagenu Touran, tedy mnohem menšího a lehčího vozidla, které ale nemá DPF.



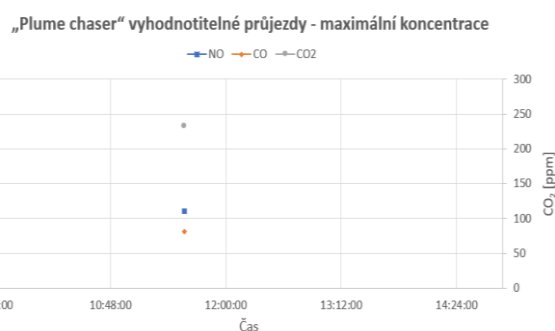
Graf 57 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „T“

## 6.2.7 Vozidlo „Plume chaser“

### 6.2.7.1 Emise plyných složek



Graf 58 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „P“



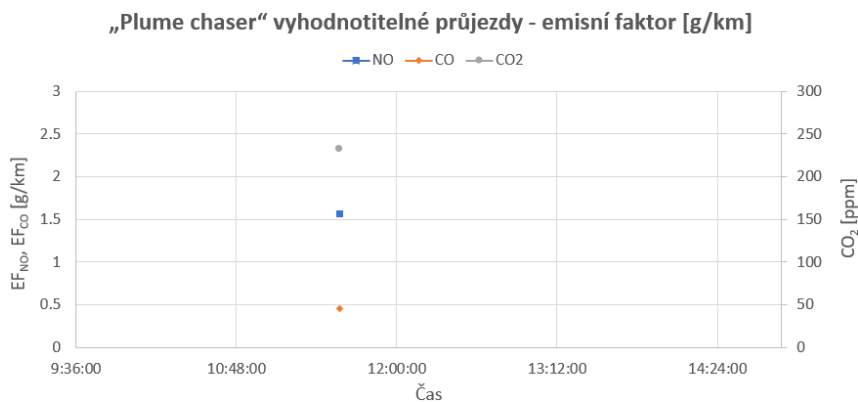
Graf 59 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „P“

A v neposlední řadě byl jako „Plume chaser“ označen Volkswagen Crafter, dodávka se vznětovým motorem. Jak už toto označení napovídá, tento vůz měl mezi ostatními zvláštní postavení. V rámci měření týmů z jiných univerzit totiž toto vozidlo vybavené příslušnými analyzátory jezdilo blízko za ostatními vozidly a odebíralo přímo vzorky výfukových plynů, podobně jako na obrázku 15 v části 3.2.2.



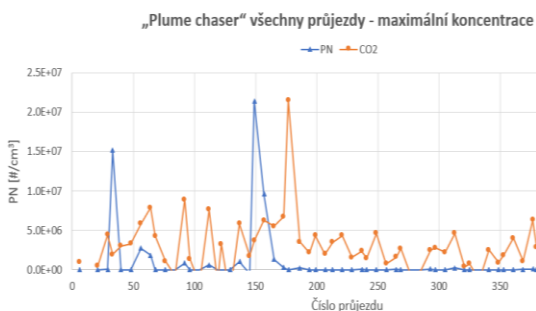


Z pohledu této práce, jelikož data z tohoto měření nebyla předmětem zkoumání naší univerzity, jsou ovšem průjezdy tohoto vozu vlivem zde popsaných praktických limitů téměř nevyhodnotitelné dálkovým měřením s odběrem vzorku – především vlivem nedostatečných rozestupů, jak je ostatně patrné z uvedených grafů. Pouze jeden z průjezdů tak prošel a mohl být dále zpracován.

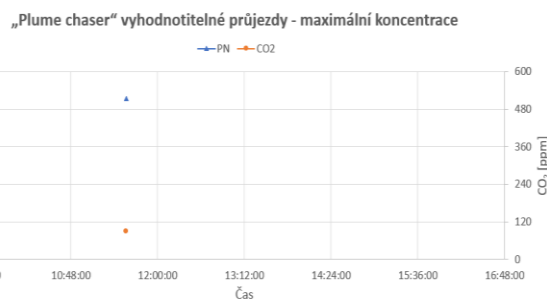


Graf 60 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „P“

### 6.2.7.2 Emise pevných částic

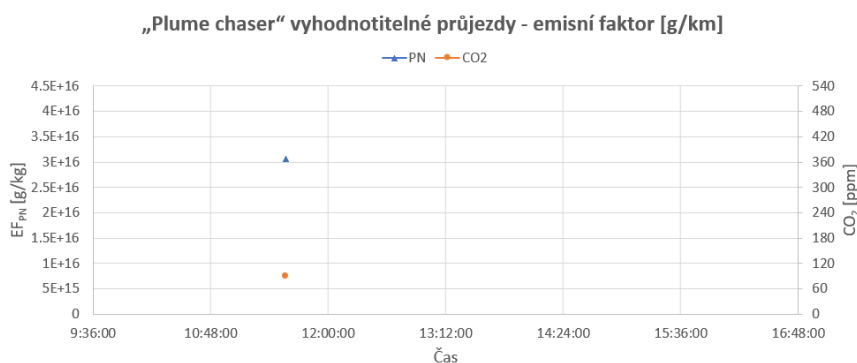


Graf 61 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „P“



Graf 62 – Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „P“

Úplně stejná situace je i z pohledu měření pevných částic, tyto grafy jsou zde tak zařazeny spíše pro ilustraci a pro úplnost, aby v této práci byly uvedeny výsledky průjezdů všech testovaných vozidel.



Graf 63 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „P“



## 6.3 Porovnání s výsledky jiných měřících přístrojů

Jak už bylo dříve v textu zmíněno, byly k měření v tomto experimentu využity i další typy přístrojů, nikoliv pouze rychlý klasifikátor velikosti částic (EEPS) a infračervený spektrometr s Fourierovou transformací (FTIR). Konkrétně se jedná o přístroj mini-PEMS, jenž byl namontován přímo na oba testované motocykly, a o přístroj OPUS, který byl sice obsluhován výpravou univerzity z Yorku, ale ta dala naměřená data k dispozici, a tak je možné je využít k porovnání s výsledky ostatních použitých analyzátorů.

Je ještě třeba upřesnit, že tyto přístroje měřily plynné emise, a tak byly jimi naměřené koncentrace porovnány s výsledky analyzátoru FTIR ČZU, který měřil kvalitněji než spektrometr naší univerzity, jak už bylo popsáno výše.

### 6.3.1 Mini-PEMS vs. FTIR ČZU

Mini-PEMS, jakožto zmenšená verze přenosného systému proměření emisí, byl instalován přímo na vozidla „Motorbike“ a „Scooter“. Tento přístroj je schopen snímat podíly kyslíku ve výfukových plynech, oxidy uhlíku i dusíku a v neposlední řadě také nespálené uhlovodíky, jejichž koncentrace ovšem nelze porovnat s výsledky dalších přístrojů, jelikož je přístroje FTIR neměřily, a tak měly v tomto měření pouze informativní charakter.

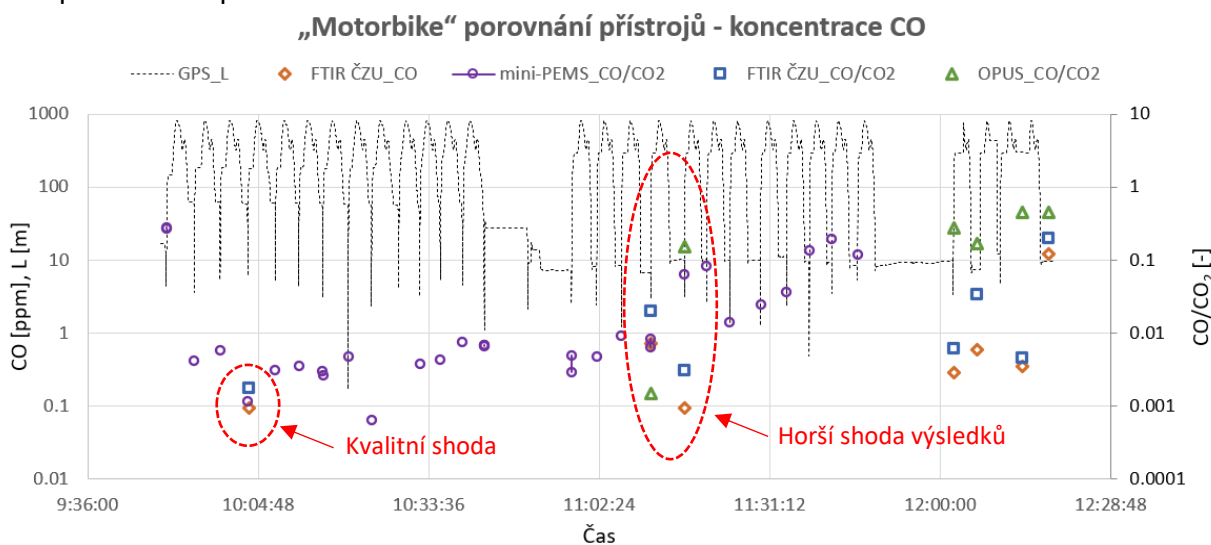
Největší problém u tohoto měření byla časová synchronizace s ostatními přístroji a přesné určení, v jaký okamžik došlo k průjezdu měřeného vozidla přes měřící stanoviště. Z tohoto důvodu byl na motocykly instalován také GPS lokátor, který zaznamenával přesné souřadnice měřených vozidel. To je ostatně vidět na obrázku 18 v kapitole 4.1. A jelikož byla přesně známá poloha měřícího stanoviště, bylo možné stanovit čas průjezdu, jelikož lze rozdíl mezi souřadnicemi přepočítat na vzdálenost v metrech. Jako průjezd se tak bral jakýkoliv zaznamenaný okamžik, kdy byla vzdálenost vozidla od měřícího stanoviště dle GPS (v grafech označena L) šest a půl metrů a menší.

Na grafech 64 až 67 jsou tak vyneseny poměry měřené škodlivé látky ku příspěvku oxidu uhličitého, protože je tento údaj klíčový pro další výpočet emisních faktorů, a kromě toho jsou zde pro ilustraci uvedeny také absolutní hodnoty příspěvku škodliviny naměřené přístrojem FTIR ČZU. Pro úplnost byly do těchto grafů doplněny také výsledné poměry z přístroje OPUS, protože jen u vozidel „Motorbike“ a „Scooter“ jsou k dispozici data ze

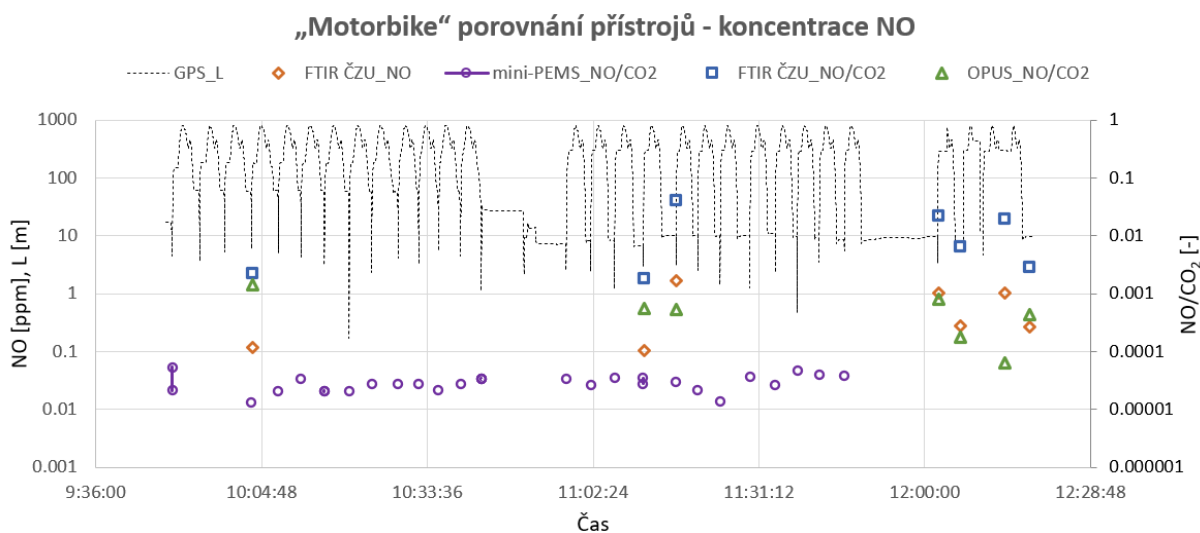


všech použitých měřících přístrojů. Aby byly výsledky co možná nejobektivnější, byly do grafu zaneseny pouze již vyfiltrované průjezdy po započítání limitů dálkového měření. Jedinou výjimku tvoří právě koncentrace naměřené přístrojem mini-PEMS, kdy jsou vyneseny všechny průjezdy splňující podmínku maximální vzdálenosti od měřícího místa, aby bylo dobře patrné, že lze tuto podmínku použít a že takto detekované průjezdy časově odpovídají průjezdům zaznamenaným při měření přístrojem FTIR ČZU.

Osy všech v této kapitole uvedených diagramů jsou v logaritmickém měřítku, aby byly výsledky co možná nejprůhlednější. Dále je třeba ještě vypíchnout, že příslušné grafy zobrazují výsledky pouze z dopoledního měřícího bloku, jelikož se po pauze podařilo přístrojem FTIR ČZU u obou testovaných motocyklů zachytit vždy pouze jeden vyhovující průjezd (viz kapitola 6.2.1), a tak bylo přistoupeno k variantě rozdělení výstupu na dopolední a odpolední měřící interval.



Graf 64 - Porovnání naměřených koncentrací CO z průjezdů motocyklu „MB“ – 24.6.

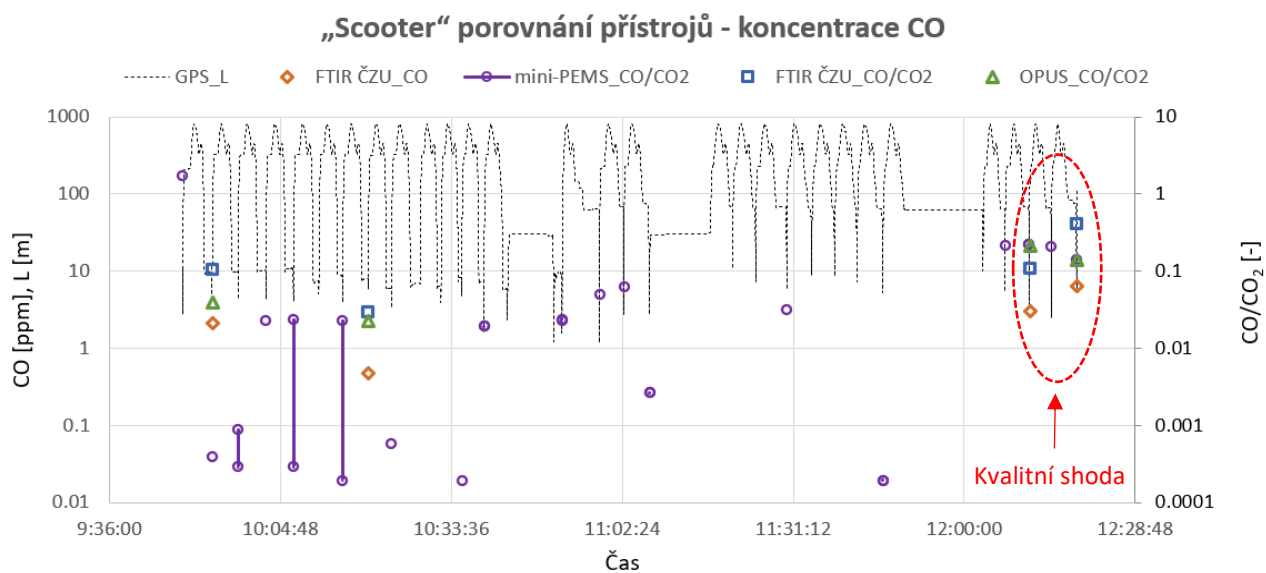


Graf 65 - Porovnání naměřených koncentrací NO z průjezdů motocyklu „MB“ – 24.6.

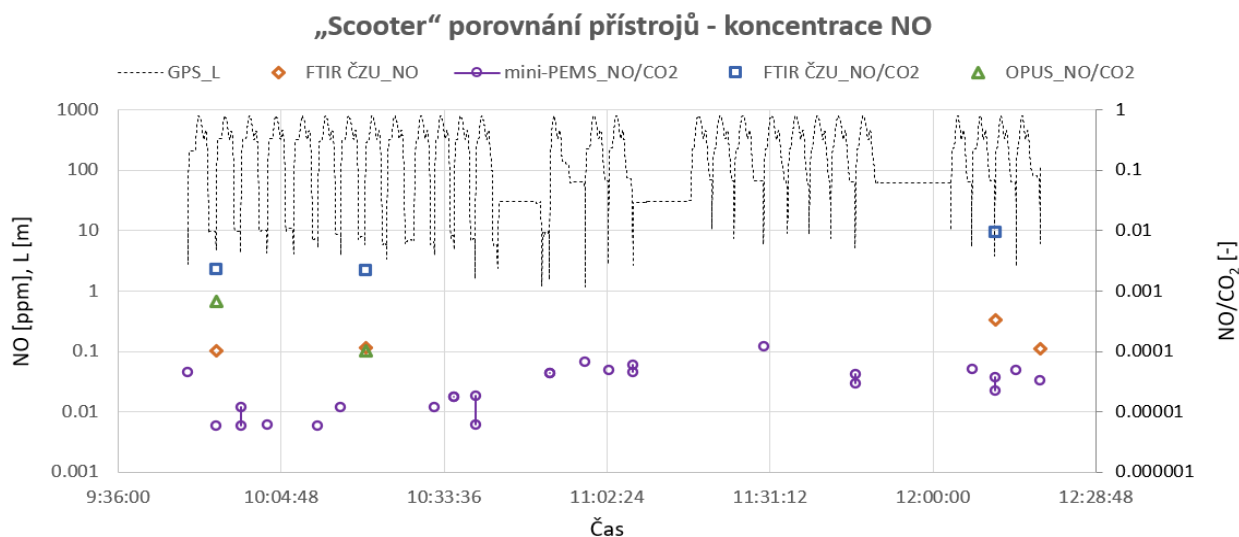


Jak se ovšem ukazuje na grafech 64 a 65, je velice obtížné z těchto průběhů vyvodit nějaký konkrétní závěr, jelikož se přístroj mini-PEMS potýkal s problémy a přestal správně odebírat vzorky již před dvanáctou hodinou, což mělo za následek snížení už tak omezeného počtu vyhodnotitelných a porovnatelných průjezdů. Na konci dopoledního bloku navíc probíhaly průjezdy s prudkou akcelerací, kde jsou očekávány vyšší nárůsty sledovaných látek, takže tento výpadek přišel v ten nejméně vhodný čas.

Z těch zbylých lze vysledovat, že poměr  $CO/CO_2$  naměřený přístrojem mini-PEMS s drobnými výjimkami alespoň řádově odpovídá výsledným poměrům z přístrojů FTIR ČZU a OPUS, kdežto v případě  $NO/CO_2$  jsou výsledky zmenšeného systému PEMS mimo o několik řádů, přičemž je velmi problematické takto zpětně určit příčinu této nesrovnalosti. Možným vysvětlením je určitě špatná kalibrace přístroje, ale pravděpodobnější variantou může být skutečnost, že množství  $NO$  ve výfukových plynech je pod rozlišovacími schopnostmi přístroje, jelikož tento fenomén se objevil i u druhého testovaného vozidla, jak je vidět níže.



Graf 66 - Porovnání naměřených koncentrací CO z průjezdů motocyklu „S“ – 24.6.



*Graf 67 - Porovnání naměřených koncentrací NO z průjezdů motocyklu „S“ – 24.6.*

Situace je podobná i u skútru, kde sice nedošlo k poruše měřícího zařízení, které tak tentokrát odebíralo vzorky po celou dobu trvání experimentu, ovšem možnost detailnějšího porovnání znemožnil nízký počet průjezdů tohoto vozidla vyhovujících všem limitům dálkového měření. Navzdory tomu je na grafu 66 dobře vidět, že k nejlepší shodě mezi výsledky jednotlivých přístrojů dochází při vyšších naměřených koncentracích CO (typicky vyšší jednotky ppm), jichž bylo dosaženo především během prudké akcelerace na konci dopoledního bloku. Při těchto průjezdech je poměr CO/CO<sub>2</sub> naměřený přístroji mini-PEMS a OPUS téměř totožný a výsledná koncentrace z přístroje FTIR ČZU je jim velice blízká.

Porovnání NO/CO<sub>2</sub> je ještě problematičtější, protože nejenže jsou znovu výsledky přístroje mini-PEMS o několik řádů odlišné, ale i přístroj OPUS měl problém v určitých případech škodlivou látku vůbec detekovat, jak je vidět na průjezdech během poslední dopolední skupiny průjezdů v grafu 67. Vozidlo označené „Scooter“ totiž často emitovalo příliš nízké množství výfukových plynů pro potřeby dálkového měření, které navíc obsahovaly pouze relativně malé množství oxidů dusíku.

Ještě je třeba doplnit, že se u tohoto vozidla ukázala podmínka maximální vzdálenosti od souřadnic měřícího stanoviště pro zpracování příslušné naměřené koncentrace jako ne vždy zcela dostatečná. Vozidla se totiž často před projetím kolem měřících přístrojů řadila dle testovací matice do řad v různém pořadí, což mělo za příčinu zvýšený pohyb v blízkosti měřícího stanoviště, který neměl nic společného se samotnými testovacími průjezdy, ale na základě vzdálenosti se přepsal do výsledků přístroje mini-



PEMS. Jako řešení tohoto problému se intuitivně nabízí snížení hodnoty maximální vzdálenosti od měřícího místa, ovšem to by způsobilo ztrátu mnoha správně zaznamenaných validních průjezdů, jelikož toto zařízení vzorkovalo naměřené emise s frekvencí 1 Hz, a tak v určitých případech bylo schopno zachytit projíždějící vozidlo v odpovídající vzdálenosti od měřícího stanoviště právě jednou. Vhodnějším řešením se tak ukázala být druhá doplňující podmínka, která vyřazuje všechny průjezdy, u nichž je GPS snímačem zaznamenána rychlost nižší než 10 km/h.

Hodnoty naměřené přístrojem mini-PEMS a tato porovnání byly opět zpracovány v programu Microsoft Excel a soubor Mini-PEMS.xlsx, který obsahuje jak grafy odpoledních vyfiltrovaných průjezdů, tak pro ilustraci porovnání všech zaznamenaných průjezdů příslušného vozidla bez ohledu na limity metody, tak v neposlední řadě také tabulky s vyčíslením velikosti procentuálně vyjádřených odchylek naměřených hodnot přístrojů mini-PEMS a OPUS od výsledků FTIR ČZU, je přiložen k této práci.

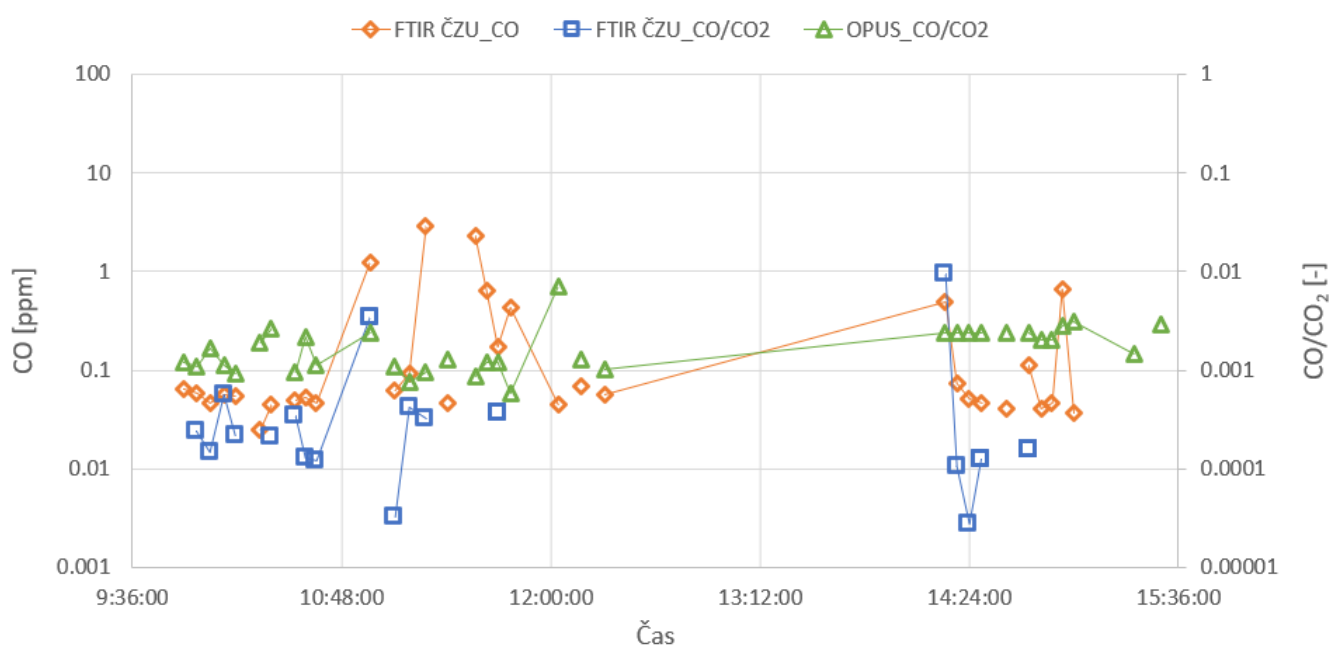
### **6.3.2 OPUS vs. FTIR ČZU**

Jako OPUS bylo označeno spektrometrické měření emisí napříč jízdní dráhou, což je systém popsany již v kapitole 3.2.1. Tento přístroj byl obsluhován a výsledná data byla zpracována kolegy ze zahraniční univerzity, součástí této práce je tak pouze jejich další analýza vzhledem k dalším měřícím přístrojům. Byl v pohotovosti po celou dobu trvání experimentu, tedy po celé čtyři dny, a k porovnání byl vybrán znovu čtvrtek, jelikož z něj se podařilo získat nejkvalitnější a nejucelenější data pomocí ostatních přístrojů. Všechny grafy i s tabulkami s procentuálně vyjádřenou odchylkou jednotlivých testovacích vozidel jsou uvedeny v souboru OPUS.xlsx, který je rovněž přiložen k této práci.

Protože se už v minulé části ukázalo, že významným parametrem pro detekci a validní kvantifikaci je opět dostatečný příspěvek sledovaných škodlivin i oxidu uhličitého od měřeného vozidla, byl pro ukázkou v této práci vybrán tahač „Truck“, u kterého bylo detekováno nejvíce průjezdů vyhovujících popsáním praktickým limitům metody, jak je ukázáno dále na grafech 68 a 69.

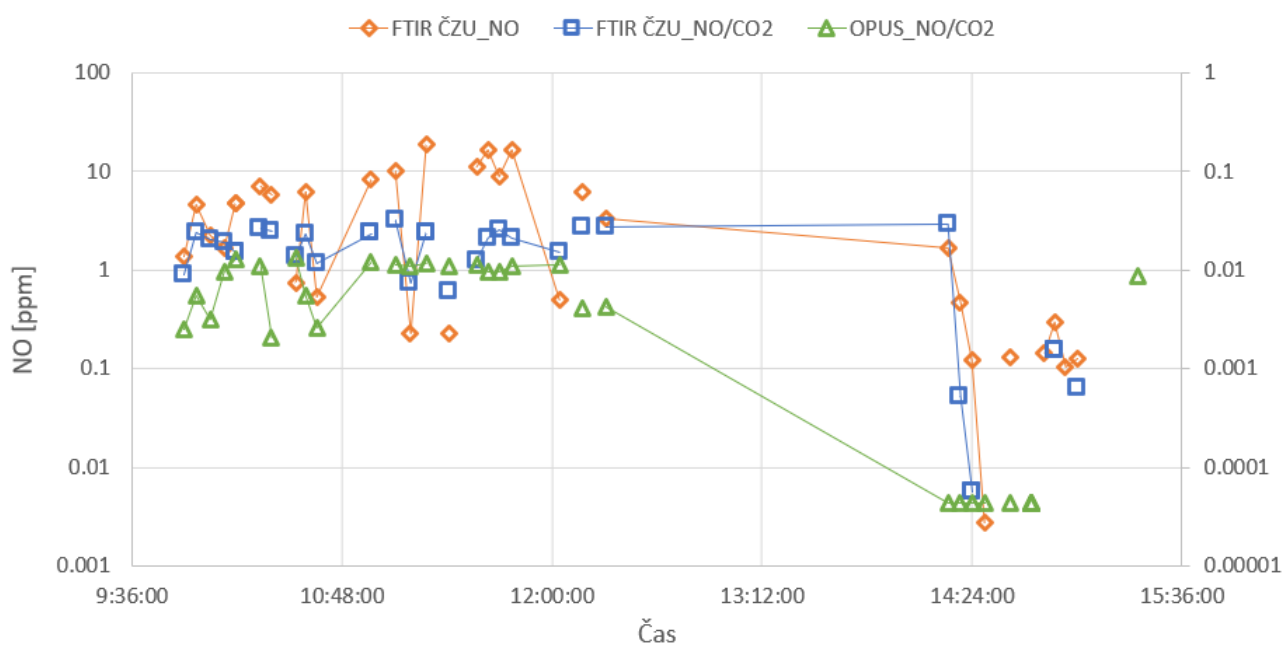


### „Truck“ porovnání přístrojů - koncentrace CO



Graf 68 - Porovnání naměřených koncentrací CO z průjezdů vozidla „T“

### „Truck“ porovnání přístrojů - koncentrace NO



Graf 69 - Porovnání naměřených koncentrací NO z průjezdů vozidla „T“

Jelikož se průjezdy tahače vyznačovaly především zvýšenými naměřenými koncentracemi NO a celkem nízkými koncentracemi CO, jak už bylo popsáno v kapitole 6.2.6, je pro formulaci závěrů určitě vhodnější podívat se právě na graf 69. Na něm lze vidět, že výsledné poměry NO/CO<sub>2</sub> naměřené přístrojem FTIR ČZU jsou o něco proměnlivější



v čase než poměry NO/CO<sub>2</sub> z přístroje OPUS a více tak kopírují hodnoty peakových koncentrací oxidu dusnatého ve výfukových plynech.

To ovšem nemusí příliš mnoho znamenat, jelikož tyto hodnoty vychází z měření stejným přístrojem. Nelze si ovšem nevšimnout, že se tento jev prohlubuje s postupujícím časem a počty průjezdů, jak je vidět na konci dopoledního a hlavně během odpoledního bloku měření, a to jak pro NO, tak i v případě CO. Vysvětlení této skutečnosti je bohužel velice obtížné, protože k této práci byla poskytnuta pouze výsledná již zpracovaná data. Lze tak pouze hádat, zda byly tyto téměř konstantní hodnoty výsledných poměrů způsobeny příliš nízkým podílem NO ve výfukových plynech pro detekci tohoto přístroje vlivem zprovoznění SCR systému během odpoledního bloku měření, nebo se jednalo o špatnou kalibraci či závadu na přístroji.

Během dopoledne ovšem poměry z obou použitých přístrojů korelují poměrně dobře, kdy u většiny průjezdů odpovídají alespoň řádově a v případech vysokých koncentrací sledovaných škodlivin jsou si často i velice blízké. Toto platí především u oxidu dusnatého, ale podobné závěry lze vyvodit také z grafu 68.

Co je mezi oběma škodlivinami odlišné je ovšem to, že v případě CO jsou v naprosté většině poměry CO/CO<sub>2</sub> z přístroje OPUS větší než z FTIR ČZU, kdežto u NO je situace opačná. Výsledky z měření oxidu uhelnatého je ovšem třeba brát s určitou rezervou, protože jsou jeho koncentrace často blízké mezi detekce přístroje a tím pádem je takové měření zatíženo větší nejistotou.





## 7 Závěr

Práce je zaměřena na detekci vozidel s nadměrnými emisemi pomocí dálkového měření emisí. Úvodní část obsahuje rešerši základních poznatků o problematice emisí automobilů, tedy popis hlavních škodlivin emitovaných do ovzduší včetně informací o mechanismech vzniku a jejich působení na okolí, dále pak přehled různých používaných opatření a systémů sloužících k omezení těchto škodlivin a v neposlední řadě také průřez historií a vývojem emisních limitů v Evropě. Rešeršní část práce pokračuje kapitolou pojednávající o technologii dálkového měření emisí, základních postupech a především také současných omezeních a praktických limitech této metody, které jsou spojeny s volbou správného měřicího stanoviště a problémy při zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Těžištěm práce je vyhodnocení dat z praktického experimentu, jenž byl uspořádán v rámci evropského projektu City air remote Emissions sensing (CARES) na testovací dráze v nizozemském Lelystadu metodou dálkového měření emisí s odběrem vzorku z blízkosti jízdní dráhy.

Naměřená data byla zpracována jednak jako celek, kdy bylo nutné vlivem různých vzorkovacích frekvencí jednotlivých přístrojů data převzorkovat na společnou frekvenci 5 Hz, stanovit velikost požadových koncentrací, u nichž se ukázalo, že se v průběhu dne mění pouze minimálně, a především na základě Gaussova pravidla tří sigma z vypočtené směrodatné odchylky požadových hodnot, která zahrnuje jak šum přístroje, tak kolísání skutečné hodnoty koncentrace dané látky v ovzduší bez zahrnutí vlivu měřených vozidel, stanovit mez detekce jednotlivých přístrojů, přičemž platí, že toto řešení je ovšem pouze orientační a je v této oblasti prostor k budoucím optimalizacím, jelikož pro tento postup ještě nebyly vypracovány kvantitativní statistické metody. A jednak s důrazem na vyhodnocení jednotlivých průjezdů, k čemuž byla využita především metoda lineární regrese umožňující důkladnější analýzu, zda je daný průjezd korektně vyhodnotitelný a výsledný poměr škodlivé látky ku CO<sub>2</sub> v čase dostatečně konzistentní či nikoliv, a jako doplněk také tzv. metoda maxima příspěvku, s jejímž využitím byly vyčísleny absolutní hodnoty příspěvků škodlivých látek a oxidu uhličitého. Výstupem z dálkového měření jsou tzv. emisní faktory, které je možné po velice jednoduché početní úpravě orientačně porovnat s předepsanými emisními limity.



Na základě těchto dat a všech poznatků z provedení a zpracování měření bylo možné kriticky zhodnotit jednotlivá omezení této metody. Ukázalo se tak, že přínos potenciálního odběru vzorku výfukových plynů přímo uprostřed jízdního pruhu oproti konvenční variantě, tedy vzorkování z okraje jízdní dráhy, je zanedbatelný. Dále nelze na základě analýzy výsledků nelze jednoznačně konstatovat, zda je pro dálkové měření vhodnější velmi prudké zrychlení, které sice většinou vyústí v o něco vyšší naměřené koncentrace sledovaných škodlivých látek, ovšem za cenu občasného nezachycení daného průjezdu vlivem dynamických účinků na oblak výfukových plynů, nebo plynulá pozvolná akcelerace. Ve výsledku je tak především důležité, aby byl motor vozidla v okamžiku měření pod zátěží, typ akcelerace už na proveditelnost měření nemá příliš vliv.

Významnějším parametrem jsou časové rozestupy mezi průjezdy z hlediska vzorkování, kde se ukázalo, že hraniční interval, při kterém lze od sebe rozpoznat nárůsty koncentrací od předchozích vozidel s vysokými emisemi při nejmenším počtu nesprávně vyhodnocených průjezdů, jsou čtyři sekundy. Vhodnější variantou jsou přirozeně delší časové rozestupy, ovšem při dodržení takto velkých mezer mezi vozidly se ztrácí jedna z hlavních výhod dálkového měření, kterou je možnost naměření velkého množství vzorků z mnoha vozidel za poměrně krátký časový úsek. Ideálním kompromisem se tak zdá udržení časových rozestupů v rozmezí 4 až 6 sekund.

A tím posledním, a jak bylo zjištěno, i tím nejvíce omezujícím faktorem dálkového měření s odběrem vzorku z blízkosti jízdní dráhy, je příspěvek vozidla k okamžitým koncentracím  $\text{CO}_2$ , který má největší vliv na velikost nejistoty, kterou je měření daného průjezdu zatíženo. Na základě výpočtů bylo zjištěno, že například pro korektní kvantifikaci poměru  $\text{NO}/\text{CO}_2$  odpovídající zvolené mezi kvantifikace (emisní faktor o velikosti 1 g/kWh) při použití přístroje FTIR ČZU je třeba zachytit nárůst oxidu uhličitého ve výši alespoň 95 ppm nad pozadřovou koncentrací, a pokud by bylo potřeba zkoumat i nižší měrné emise  $\text{NO}_x$ , je tato hodnota ještě vyšší a bylo by tak nutné použít citlivější analyzátor.

Při analýze dat z tohoto experimentu byly zvoleny takové hodnoty meze kvantifikace měřených škodlivých látek, aby byla detekována naprostá většina průjezdů, kde nebyly splněny emisní limity, tudíž aby se podařilo minimalizovat počet nesprávně označených řádně provozovaných vozidel za nadměrné znečišťovatele, což také odpovídá jednomu ze základních účelů dálkového měření emisí. Na druhou stranu lze přeci jen pracovat i s nižšími přírůstků  $\text{CO}_2$ , ovšem jen při řešení velmi vysokých koncentrací



škodlivých látek, kde o něco větší nejistota měření nehraje tak zásadní roli. Ve výsledku je tak klíčové si vždy určit cíl dálkového měření, zda je snaha odhalit pouze zásadní znečišťovatele a v tom případě stačí zpracovávat velmi vysoké koncentrace škodlivin, díky čemuž jsou potřeba nižší příspěvky CO<sub>2</sub>, nebo jestli má být měření mnohem podrobnější, kdy se mez kvantifikace jednotlivých škodlivin pomalu blíží mezi detekce použitých přístrojů, což má ovšem za následek požadavek na značné nárůsty koncentrace CO<sub>2</sub>, které může být v mnoha případech problém měřícími přístroji odebrat.

Na základě jednotlivých omezení tak bylo z původních 414 průjezdů vybráno 104 zbývajících, které tyto limity splňují čili nejsou tak ovlivněny předchozími průjezdy vozidel s vysokými emisemi a je možné u nich zpracovat koncentrace alespoň jedné sledované škodliviny odpovídající přinejmenším velikosti zvolené meze kvantifikace díky dostatečnému příspěvku daného vozidla k okamžitým koncentracím CO<sub>2</sub>. Navíc jsou mezi tyto průjezdy započítány také tzv. čisté průjezdy, kdy příslušné vozidlo znatelně přispěje ke koncentraci CO<sub>2</sub>, ale koncentrace škodlivin jsou naměřeny pouze ve stopovém množství nebo nejsou použitými přístroji rozeznatelné od pozadí.

Po rozčlenění dat z těchto průjezdů dle jednotlivých vozidel lze dojít k závěru, že existuje důvodné podezření, že byl na vozidlech „Transporter“ a „Truck“ nainstalovaný a v určitých průjezdech i aktivovaný SCR-emulátor ovlivňující účinnost likvidace oxidů dusíku a že vozidlo „Caddy“ mělo při několika průjezdech obtékaný filtr pevných částic. Informace o tom, během kterých konkrétních průjezdů byla tato zařízení aktivní, ovšem nebyla organizátory experimentu sdělena, a tak nelze zde prezentované závěry definitivně potvrdit či vyvrátit. Vysoké koncentrace pevných částic byly naměřeny také u vozidla „Touran“, což ovšem bylo dáno specifikací pohonné jednotky tohoto konkrétního vozu a absencí filtru pevných částic.

Následně byla tato naměřená data porovnána s dostupnými výsledky dalších typů měřících přístrojů využitých během tohoto experimentu. A i když se těmito měřeními nevyhnuly určité problémy, tak přináší zajímavé srovnání jednotlivých postupů, čehož je možné spolu s upřesněnými praktickými limity využít při přípravě dalších podobných měření v reálném provozu.



## Použitá literatura

- [1] Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport — the role of vehicles, fuels and transport demand [online]. EEA, 2022 [cit. 2022-06-03]. ISBN 978-92-9480-473-0. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021>
- [2] Explaining road transport emissions: A non-technical guide [online]. EEA, 2016 [cit. 2022-06-03]. ISBN 978-92-9213-723-6. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/explaining-road-transport-emissions>
- [3] SHEN, Yicheng, Qiang ZHANG, Dongbin WANG, et al. Evaluation of a cost-effective roadside sensor platform for identifying high emitters. Science of The Total Environment. 2022, 816. ISSN 00489697. Dostupné z: [doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151609](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151609)
- [4] HOOFTMAN, Nils. D1.3 Tampering [online]. 19.12.2019. uCARE [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <https://www.project-ucare.eu/wp-content/uploads/2020/01/D1.3-Tampering-.pdf>
- [5] MACEK, Jan. Spalovací motory I. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03618-1. Příslušenství spalovacích motorů
- [6] BAUMRUK, Pavel. Příslušenství spalovacích motorů. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2062-2.
- [7] VÍTEK, Oldřich. (2022). Theory of ICE and Simulation. [přednášky], ČVUT Praha. Dostupné z: [https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211170\\_TSM/](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211170_TSM/)
- [8] Oxid uhličitý. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_uhli%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhli%C4%8Dit%C3%BD)
- [9] NOx. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/NOx>
- [10] Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU). In: Irz.cz [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z:



[https://www.irz.cz/sites/irz.env.cz/files/repository/latky/polycyklicke\\_aromaticke\\_uhlovodiky.pdf](https://www.irz.cz/sites/irz.env.cz/files/repository/latky/polycyklicke_aromaticke_uhlovodiky.pdf)

- [11] Sehlstedt, Maria & Forsberg, Bertil & Westerholm, Roger & Boman, Christoffer & Sandström, Thomas. (2007). The Role of Particle Size and Chemical Composition for Health Risks of Exposure to Traffic Related Aerosols - A Review of the Current Literature. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/242083990\\_The\\_Role\\_of\\_Particle\\_Size\\_and\\_Chemical\\_Composition\\_for\\_Health\\_Risks\\_of\\_Exposure\\_to\\_Traffic\\_Related\\_Aerosols\\_-\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Current\\_Literature](https://www.researchgate.net/publication/242083990_The_Role_of_Particle_Size_and_Chemical_Composition_for_Health_Risks_of_Exposure_to_Traffic_Related_Aerosols_-_A_Review_of_the_Current_Literature)
- [12] EGR ventil Nejčastější poruchy a eliminace. In: Mroauto.cz [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.mroauto.cz/cs/blog/clanek/egr-ventil-nejcastejsi-poruchy-a-eliminace>
- [13] Three way catalytic converter [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [http://www.cchem.berkeley.edu/molsim/teaching/fall2009/catalytic\\_converter/bkgcatcon.html](http://www.cchem.berkeley.edu/molsim/teaching/fall2009/catalytic_converter/bkgcatcon.html)
- [14] Catalytic converter. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Catalytic\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/Catalytic_converter)
- [15] MAREŠ, Bohumil. (2022). Škodliviny ve výfukových plynech spalovacích motorů [přednášky], ČVUT Praha. Dostupné z: [https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2212048\\_PSM/PSM\\_Skodliviny.pdf](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2212048_PSM/PSM_Skodliviny.pdf)
- [16] SCR (Selective Catalytic Reduction). In: Autolexicon.net [online]. [cit. 2022-06-05]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/scr-selective-catalytic-reduction/>
- [17] Emisní norma EURO. In: Autolexicon.net [online]. [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [18] California Air Resources Board: History [online]. [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <https://ww2.arb.ca.gov/about/history>
- [19] MORKUS, Josef a Jan MACEK. KAM KRÁČÍŠ, ELEKTROMOBILITO?. In: Fs.cvut.cz [online]. [cit. 2022-06-06]. Dostupné z:



<https://www.fs.cvut.cz/verejnost/pr-media/pribehy-z-ustavu/kam-kracis-elektromobilito/>

- [20] European emission standards. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_emission\\_standards](https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards)
- [21] BERNARD, Yoann, Jan DORNOFF a David C. CARSLAW. Can accurate distance-specific emissions of nitrogen oxide emissions from cars be determined using remote sensing without measuring exhaust flowrate?. Science of The Total Environment [online]. 2022, 816 [cit. 2022-06-06]. ISSN 00489697. Dostupné z: [doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151500](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151500)
- [22] BORKEN-KLEEFELD, Jens a Tim DALLMANN. Remote sensing of motor vehicle exhaust emissions: White paper. In: Theicct.org [online]. [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Remote-sensing-emissions\\_ICCT-White-Paper\\_01022018\\_vF\\_updated.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Remote-sensing-emissions_ICCT-White-Paper_01022018_vF_updated.pdf)
- [23] GIECHASKIEL, Barouch, Theodoros VLACHOS, Francesco RICCOBONO, et al. Implementation of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) for the Real-driving Emissions (RDE) Regulation in Europe. Journal of Visualized Experiments [online]. 2016, (118) [cit. 2022-06-06]. ISSN 1940-087X. Dostupné z: [doi:10.3791/54753](https://doi.org/10.3791/54753)
- [24] BERNARD, Yoann, John GERMAN a Rachel MUNCRIEF. WORLDWIDE USE OF REMOTE SENSING TO MEASURE MOTOR VEHICLE EMISSIONS: White paper [online]. In: . [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Worldwide-use-RSD-4.20.20.pdf>
- [25] HERTEL, O., C. RUD INGVARSDEN, T. ELLERMANN a J. KLENØ NØJGAARD. Control of SCR-systems using roadside remote sensing: Results from road experiments 2019. In: DCE - Danish Centre for Environment and Energy [online]. Aarhus University [cit. 2022-06-12]. ISBN 978-87-7156-507-2. ISSN 2245-0203. Dostupné z: <http://dce2.au.dk/pub/SR387.pdf>
- [26] BISHOP, Gary A., John R. STARKEY, Anne IHLENFELDT, Walter J. WILLIAMS a Donald H. STEDMAN. IR long-path photometry: a remote sensing tool for automobile



- emissions. *Analytical Chemistry* [online]. 1989, 61(10), 671A-677A [cit. 2022-06-27]. ISSN 0003-2700. Dostupné z: doi:10.1021/ac00185a002
- [27] PREBLE, Chelsea V., Robert A. HARLEY a Thomas W. KIRCHSTETTER. Control Technology-Driven Changes to In-Use Heavy-Duty Diesel Truck Emissions of Nitrogenous Species and Related Environmental Impacts. *Environmental Science and Technology* [online]. 2019, 53(24), 14568-14576 [cit. 2022-06-12]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.9b04763
- [28] BISHOP, Gary A., Rachel HOTTOR-RAGUINDIN, Donald H. STEDMAN, et al. On-road Heavy-duty Vehicle Emissions Monitoring System [online]. 2015, 49(3), 1639-1645 [cit. 2022-06-12]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es505534e
- [29] ENGINE EXHAUST PARTICLE SIZER™ (EEPS™) SPECTROMETER MODEL 3090/3090AK: Operation and Service Manual. TSI, 2015.
- [30] VOJTISEK-LOM, Michal, Alden Fred ARUL RAJ, Petr JINDRA, David MACOUN a Martin PECHOUT. On-road detection of trucks with high NO<sub>x</sub> emissions from a patrol vehicle with on-board FTIR analyzer. *Science of The Total Environment* [online]. 2020, 738 [cit. 2022-06-13]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139753
- [31] Infračervená spektrometrie In: Přírodovědecká fakulta UK [online]. [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/analchem/pprakt/ftir.pdf>
- [32] VOJTISEK-LOM, Michal, Alessandro A. ZARDINI, Martin PECHOUT, et al. A miniature Portable Emissions Measurement System (PEMS) for real-driving monitoring of motorcycles [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: doi:10.5194/amt-2019-387
- [33] Moving average. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Moving\\_average](https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average)
- [34] Pravidlo tří sigma. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-16]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Pravidlo\\_t%C5%99%C3%AD\\_sigma](https://cs.wikipedia.org/wiki/Pravidlo_t%C5%99%C3%AD_sigma)
- [35] DAVISON, Jack, Yoann BERNARD, Jens BORKEN-KLEEFELD, et al. Distance-based emission factors from vehicle emission remote sensing measurements. *Science of*



The Total Environment [online]. 2020, 739 [cit. 2022-06-19]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139688

- [36] VOJTISEK-LOM, Michal, Alden Fred ARUL RAJ, Petr JINDRA, David MACOUN a Martin PECHOUT. On-road detection of trucks with high NO<sub>x</sub> emissions from a patrol vehicle with on-board FTIR analyzer – Supplemental Information. Science of The Total Environment [online]. 2020, 738 [cit. 2022-06-13]. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0048969720332733-mmc1.pdf>
- [37] QUIROS, David C., Jeremy D. SMITH, Walter A. HAM, William H. ROBERTSON, Tao HUIAI, Alberto AYALA a Shaohua HU. Deriving fuel-based emission factor thresholds to interpret heavy-duty vehicle roadside plume measurements [online]. 2018, 68(9), 969-987 [cit. 2022-06-26]. ISSN 1096-2247. Dostupné z: doi:10.1080/10962247.2018.1460637
- [38] IV. Nejistoty měření a zpracování výsledků. In: Elearning.tul.cz [online]. Technická univerzita Liberec [cit. 2022-06-26]

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Působení CO na člověka [6] .....	11
Obr. 2 - Závislost hlavních škodlivin v závislosti na $\lambda$ – zážehový motor [5] .....	12
Obr. 3 - Závislost hlavních škodlivin v závislosti na $\lambda$ – vznětový motor [5] .....	12
Obr. 4 - Rozdělení koncentrace pevných částic podle velikosti [11] (přeloženo) .....	15
Obr. 5 - Princip funkce EGR u přeplňovaného motoru [12] .....	17
Obr. 6 - Vliv různých opatření u motoru na redukci NO <sub>x</sub> [6] .....	17
Obr. 7 - Řez trojcestným katalytickým reaktorem [13] (přeloženo) .....	18
Obr. 8 - Vliv součinitele přebytku vzduchu na účinnost trojcestného katalytického reaktoru [6] ...	19
Obr. 9 - Princip SCR [16] (přeloženo) .....	20
Obr. 10 - Řez DPF systémem [15] .....	21
Obr. 11 - Vývoj emisních předpisů v čase – vznětové motory [19] (přeloženo) .....	22
Obr. 12 - Ukázka zařízení PEMS [23] .....	27
Obr. 13 - Základní koncepce spektrometrického měření emisí [24] (přeloženo) .....	29
Obr. 14 - Koncepce systému EDAR [24] (přeloženo) .....	30
Obr. 15 - Schéma obou přístupů k měření metodou odběru vzorku [24] (přeloženo) .....	31
Obr. 16 - Ukázka odběru vzorku v tunelu [27] .....	31
Obr. 17 - Příklad použití stanu při měření [28] .....	31





Obr. 18 - Satelitní snímek zkušební trati s vyznačenou dráhou testovaných vozidel z GPS přijímače .....	34
Obr. 19 - Odběr vzorku ze středu jízdního pruhu .....	35
Obr. 20 - Celé měřící stanoviště i s ukázkou měřených vozidel .....	35
Obr. 21 - Schéma principu fungování přístroje EEPS [29] (přeloženo).....	36
Obr. 22 - Přístroj FTIR – výrobce Bruker [30].....	37
Obr. 23 - Princip Michelsonova interferometru [31].....	37

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - emisní Euro normy pro osobní auta [20] .....	23
Tabulka 2 - emisní Euro normy pro jednostranná vozidla [20] .....	23
Tabulka 3 - emisní Euro normy pro lehká nákladní vozidla se vznětovým motorem [20] .....	24
Tabulka 4 - emisní Euro normy pro lehká nákladní vozidla se zážehovým motorem [20] .....	25
Tabulka 5 - emisní Euro normy pro motory těžkých vozidel [20] .....	26
Tabulka 6 - Souhrn testovacích vozidel .....	38
Tabulka 7 - Přehled dopoledních pozadových koncentrací i se směrodatnou odchylkou .....	43
Tabulka 8 - Přehled odpoledních pozadových koncentrací i se směrodatnou odchylkou .....	43
Tabulka 9 - Přehled uvažovaných hodnot spotřeby paliva testovacích vozidel .....	48

## Seznam grafů

Graf 1 - Ukázka naměřených dat z obou přístrojů .....	39
Graf 2 - Posouzení vlivu rozdílné vzorkovací frekvence na výsledné koncentrace částic .....	40
Graf 3 - Vyznačené intervaly využitě k určení hodnoty pozadí – 24.6. dopoledne .....	41
Graf 4 - Příklad ideální korelace .....	45
Graf 5 - Příklad nedetekovatelného průjezdu .....	45
Graf 6 - Rozdělení počtu emitovaných částic dle velikosti pro motocykl „MB“ .....	46
Graf 7 - Naměřené koncentrace pevných částic z obou měřících stanovišť - 24.6. odpoledne .....	50
Graf 8 - Příklad příliš malých a hraničních časových rozestupů – FTIR.....	52
Graf 9 - Příklad příliš malých a hraničních časových rozestupů – EEPS.....	52
Graf 10 - Příklad vhodně zvolených časových rozestupů – FTIR .....	53
Graf 11 - Příklad vhodně zvolených časových rozestupů – EEPS .....	53



Graf 12 - Potřebné hodnoty nárůstu CO <sub>2</sub> k vyhodnocení průjezdů .....	56
Graf 13 - Příklad průběhu koncentrací plyných složek s velmi nízkou nejistotou měření.....	58
Graf 14 - Příklad průběhu koncentrací plyných složek s vysokou mírou nejistoty měření .....	58
Graf 15 - Příklad průběhu koncentrací pevných částic s vysokou mírou nejistoty měření .....	58
Graf 16 - Příklad vyhodnotitelných koncentrací plyných složek s protichůdnými hodnotami nejistoty měření .....	59
Graf 17 - Příklad vyhodnotitelných koncentrací pevných částic s protichůdnými hodnotami nejistoty měření .....	59
Graf 18 - Příklad tzv. čistého průjezdu z hlediska plyných složek .....	60
Graf 19 - Příklad tzv. čistého průjezdu z hlediska pevných částic .....	60
Graf 20 - Příklad nevyhodnotitelných koncentrací plyných složek s protichůdnými hodnotami nejistoty měření vlivem zkreslení ostatními průjezdy .....	60
Graf 21 - Příklad nevyhodnotitelných koncentrací plyných složek s protichůdnými hodnotami nejistoty měření kvůli nedostatku CO <sub>2</sub> .....	61
Graf 22 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „MB“ .....	62
Graf 23 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „MB“ .....	62
Graf 24 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „MB“ .....	63
Graf 25 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „MB“ .....	63
Graf 26 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „MB“ .....	63
Graf 27 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „MB“ .....	64
Graf 28 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „S“ .....	64
Graf 29 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „S“ .....	64
Graf 30 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „S“ .....	65
Graf 31 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „S“ .....	65
Graf 32 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „S“ .....	65
Graf 33 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „S“ .....	65
Graf 34 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „C“ .....	66
Graf 35 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „C“ .....	66
Graf 36 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „C“ .....	66
Graf 37 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „C“ .....	66
Graf 38 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „C“ .....	66
Graf 39 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „C“ .....	67
Graf 40 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TR“ .....	67
Graf 41 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TR“ .....	67
Graf 42 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TR“ .....	68



Graf 43 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TR“ .....	68
Graf 44 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TR“ .....	68
Graf 45 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TR“ .....	68
Graf 46 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TN“ .....	69
Graf 47 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TN“ .....	69
Graf 48 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TN“ .....	69
Graf 49 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „TN“ .....	69
Graf 50 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „TN“ .....	69
Graf 51 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „TN“ .....	70
Graf 52 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „T“ .....	70
Graf 53 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „T“ .....	70
Graf 54 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „T“ .....	71
Graf 55 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „T“ .....	71
Graf 56 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „T“ .....	71
Graf 57 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „T“ .....	72
Graf 58 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „P“ .....	72
Graf 59 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „P“ .....	72
Graf 60 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „P“ .....	73
Graf 61 - Přehled všech zaznamenaných průjezdů - „P“ .....	73
Graf 62 - Přehled vyfiltrovaných vyhodnotitelných průjezdů - „P“ .....	73
Graf 63 - Výsledné emisní faktory u vyfiltrovaných průjezdů - „P“ .....	73
Graf 64 - Porovnání naměřených koncentrací CO z průjezdů motocyklu „MB“ – 24.6.....	75
Graf 65 - Porovnání naměřených koncentrací NO z průjezdů motocyklu „MB“ – 24.6. ....	75
Graf 66 - Porovnání naměřených koncentrací CO z průjezdů motocyklu „S“ – 24.6. ....	76
Graf 67 - Porovnání naměřených koncentrací NO z průjezdů motocyklu „S“ – 24.6. ....	77
Graf 68 - Porovnání naměřených koncentrací CO z průjezdů vozidla „T“ .....	79
Graf 69 - Porovnání naměřených koncentrací NO z průjezdů vozidla „T“ .....	79

## Seznam použitých zkratk

Symbol	Význam	Symbol	Význam
BSFC	Měrná spotřeba paliva	NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý
C	Testovací vozidlo „Caddy“	NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
CARES	Evropský projekt dálkového měření emisí	NMHC	Nemetanové uhlovodíky
CO	Oxid uhelnatý	O <sub>2</sub>	Kyslík



CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	OH	Hydroxylový radikál
ČVUT	České vysoké učení technické	OPUS	Výrobce měřících přístrojů na principu molekulární spektrometrie
ČZU	Česká zemědělská univerzita	p	Pomocná veličina pro výpočet minimálního potřebného příspěvku CO <sub>2</sub>
DPF	Filtr pevných částic	P	Testovací vozidlo „Plume chaser“
EDAR	Systém dálkového měření emisí	PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky
EEPS	Rychlý klasifikátor velikosti částic	Pb	Olovo
EEV	Označení motorů přátelských k životnímu prostředí	PEMS	Přenosný systém na měření emisí
EF	Emisní faktor	PM	Pevné částice
EGR	Vnější recirkulace spalin	PN	Počet emitovaných pevných částic
EHK	Evropská hospodářská komise	ppm	Jedna miliontina celku
Euro	Evropská emisní norma	R <sup>2</sup>	Pearsonův korelační koeficient
FTIR	Infračervený spektrometr s Fourierovou transformací	RDE	Měření emisí v reálném provozu
H <sub>2</sub>	Vodík	RS	Dálkové měření emisí
HC	Nespálené uhlovodíky	S	Testovací vozidlo „Scooter“
M	Molární hmotnost	SCR	Selektivní katalytická redukce
m <sub>c</sub>	Hmotnostní zlomek uhlíku	SO <sub>2</sub>	Oxid siřičitý
MB	Testovací vozidlo „Motorbike“	T	Testovací vozidlo „Truck“
Mini-PEMS	Zmenšený přenosný systém na měření emisí	TN	Testovací vozidlo „Touran“
NDIRA	Bezdisperzní infračervený analyzátor	TR	Testovací vozidlo „Transporter“
NEDC	Normovaný jízdní cyklus	TWC	Třícenný katalytický reaktor
NH <sub>3</sub>	Amoniak	u <sub>r</sub>	Relativní nejistota
NMHC	Nemetanové uhlovodíky	V <sub>m</sub>	Molární objem vzduchu
NO	Oxid dusnatý	WLTC	Normovaný jízdní cyklus
N <sub>2</sub> O	Oxid dusný	WLTP	Normovaný proces měření emisí
X	Spotřeba paliva [l/100km]	σ <sub>5Hz</sub>	Směrodatná odchylka původních naměřených dat
λ	Součinitel přebytku vzduchu	σ <sub>5s</sub>	Směrodatná odchylka pětisekundových klouzavých průměrů
ρ	hustota		



## Seznam příloh

- Nejistoty.xlsx
- Roadside\_průjezdy.xlsx
- Mini-Pems.xlsx
- OPUS.xlsx

Všechny soubory jsou přiloženy pouze v elektronické podobě.