



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Ověření funkce filtru pevných částic  
dálkovým měřením

Remote particle filter functionality check by  
roadside measurement

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
2022

Bc. Lukáš KOLBABA

Studijní program: Dopravní a transportní technika  
Studijní obor: Motorová vozidla  
Vedoucí práce: prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kolbaba** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **474839**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**  
Specializace: **Motorová vozidla**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Ověření funkce filtru pevných částic dálkovým měřením**

Název diplomové práce anglicky:

**Remote particle filter functionality check by roadside measurement**

Pokyny pro vypracování:

Pro snížení rozsáhlých škod na lidském zdraví v důsledku znečištění ovzduší uhlíkatými částicemi ze spalovacích procesů jsou prakticky veškeré vznětové a mnohé zážehové motory vyrobené v poslední dekádě jsou osazeny filtry částic. Protože jejich samovolným nebo cíleným poškozením dochází k řádovému navýšení emisí částic, je záhodno funkci filtru částic pravidelně ověřovat. Jako alternativa nebo doplněk k pravidelným technickým kontrolám je uvažováno dálkové měření. Cílem práce je analyzovat data z dálkového měření na zkušebním okruhu v rámci evropského projektu City Air Remote Emissions Sensing, provedená aparaturou odebírající vzorek ovzduší v blízkosti jízdní dráhy vozidel na zkušebním okruhu v rámci evropského projektu City Air Remote Emissions Sensing, případně i další dostupná data z dálkových měření. Výsledkem by mělo být kritické zhodnocení měření částic dvěma různými metodami, rychlým klasifikátorem částic na bázi mobility v elektrickém poli a fotoakustickým analyzátozem elementárního uhlíku, odběru vzorku z okraje jízdní dráhy a z povrchu blízko jejího středu, a provozních podmínek, zejména rozestupů mezi vozidly a rychlosti a zrychlení vozidel. Předmětem kritické diskuze by měla být rozvaha, za jakých podmínek, a zda vůbec, je metoda prakticky použitelná pro dálkovou detekci chybějícího nebo zásadně nefunkčního filtru částic.

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., Hottor-Raguindin, R., Stedman, D. H., et al. (2015). On-road heavy-duty vehicle emissions monitoring system. 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). Deriving fuel-based emission factor thresholds to interpret heavy-duty vehicle roadside plume measurements. Journal of the Air & Waste Management Association, 68(9), 969-987.  
Shen, Y., et al. (2022). Evaluation of a cost-effective roadside sensor platform for identifying high emitters. Science of The Total Environment, 816, 151609.  
Vojtisek-Lom, M., et al. (2020). On-road detection of trucks with high NOx emissions from a patrol vehicle with on-board FTIR analyzer. 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: **22.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

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

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Anotační záznam

Jméno autora: Lukáš Kolbaba

Název práce: Ověření funkce filtru pevných částic dálkovým měřením

Anglický název: Remote particle filter functionality check by roadside measurement

Rozsah práce:

70 stran

68 obrázků

Z toho 44 grafů

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: dálkové měření emisí, částice, filtr pevných částic

Key words: remote sensing, particle matter, particle filter



## Abstrakt

Práce se zabývá detekcí vozidel s nadměrnými emisemi pomocí dálkového měření koncentrace částic a CO<sub>2</sub> ve vzorku ovzduší odebíraném v blízkosti projíždějících vozidel. V pilotním experimentu byl potvrzen možný přínos vzorkování ze středu jízdního pruhu. Vyhodnocením dat z experimentální kampaně projektu CARES bylo zjištěno, že po průjezdu jsou zachyceny částice převážně o průměru od 12 do 192 nm. Dále bylo zjištěno, že nejdelší doba zvýšených koncentrací částic po průjezdu vozidla byla 7 sekund. V porovnání umístění vzorkovací sondy se ukázalo, že mnohem spolehlivější pro záchyt vozidla s nadměrnými emisemi je vzorkování ze středu jízdního pruhu oproti okraji vozovky. Při porovnání dvou klasifikátorů částic bylo zjištěno, že fotoakustický analyzátor je velmi citlivý na tlakové rázy a oproti klasifikátoru na bázi mobility v elektrickém poli jsou jeho hodnoty více rozptýlené. Z porovnání vlivu typu akcelerace vozidla na záchyt částic se ukázalo, že pouze v některých případech přispívá sportovnější akcelerace k jistějšímu záchytu vozidla s nadměrnými emisemi. Data potvrzují, že při větších rozestupech než 7 sekund může být dálkové měření emisí použitelné pro ověření funkce filtru částic. Detailnějším rozbohem se zabývá kapitola Diskuze.

## Abstract

In this thesis, data from remote sensing of vehicle emissions, done through roadside sampling of exhaust plumes of passing vehicles, are analyzed. Based on a pilot experiment, it appears that sampling from the center of the travel line offers advantages over traditional sampling from the side of the road. From a week-long test track experiment within EU project CARES, it appears that particle size distributions offer the highest signal to noise for particle diameters 12-192 nm, and that elevated concentrations of particulate matter after a passage of the vehicle were detectable for up to 7 seconds. A comparison of sampling point locations showed that sampling from the center of the travel line versus the edge of the road is much more reliable for catching a vehicle with excessive emissions. When comparing two particle classifiers, it was found that the photoacoustic analyzer is very sensitive to pressure shocks and, compared to the classifier based on mobility in the electric field, its values are more scattered. A comparison of the effect of the type of acceleration on the capturing particles concentrations showed that only in some cases sporty acceleration helps to capture a vehicle with excessive emissions. A more detailed analysis is provided in the Diskuze chapter.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Ověření funkce filtru pevných částic dálkovým měřením” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 22.7.2022

.....

(podpis autora)



## Poděkování

V první řadě děkuji vedoucímu této diplomové práce, prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D., za profesionální a obětavé vedení této práce a za cenné rady a podmínky ke zpracování dat a práce jako takové. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Martinu Pechoutovi, Ph.D. za pomoc při zpracování dat. Samotné měření bylo financováno evropským projektem H2020 814 966 CARES - City Air Remote Emissions Sensing. Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu nejen při vypracování této práce, ale během celého studia.



## Obsah

1 Úvod.....	10
1.1 Dopady znečištěného ovzduší .....	10
1.2 Emise z dopravy .....	11
1.3 Emise ze spalování.....	12
1.4 Redukce emisí z dopravy .....	13
1.5 Narušení funkce filtru .....	17
2 Možnosti měření / detekce .....	20
2.1 Kontroly emisí a technického stavu.....	20
2.2 Měření v reálném provozu .....	21
2.2.1 On board (PEMS) .....	21
2.2.2 Plume chasing.....	22
2.2.3 Stacionární měření .....	23
3 Cíle práce .....	28
4 Měření .....	29
4.1 Měřicí aparatura .....	29
4.1.1 FTIR .....	29
4.1.2 EEPS .....	30
4.1.3 MSS <sup>plus</sup> .....	32
4.2 Pilotní měření .....	32
4.3 Lelystad Nizozemsko.....	34
4.4 Krakov Polsko.....	36
5 Zpracování dat .....	37
5.1 Pilotní experiment .....	37
5.2 Lelystad Nizozemsko.....	38
5.2.1 Selekce kanálů EEPS.....	38
5.2.2 Mez detekce .....	41
5.2.3 Délka odezvy na průjezd.....	41
5.2.4 Porovnání místa vzorkování .....	43
5.2.5 Porovnání EEPS a MSS a různých zrychlení .....	44
6 Výsledky .....	45
6.1 Pilotní experiment .....	45





6.2 Výsledky Lelystad.....	47
6.2.1 Selekce relevantních kanálů EEPS .....	47
6.2.2 Délka odezvy na průjezd.....	49
6.2.1 Porovnání místa vzorkování .....	51
6.2.2 Porovnání EEPS vs. MSS.....	54
6.2.3 Porovnání jízdních podmínek .....	58
7 Diskuze.....	65
8 Závěry .....	67
9 Literatura .....	69



## 1 Úvod

### 1.1 Dopady znečištěného ovzduší

Podle zprávy Světové zdravotnické organizace (WHO) z 22. září 2021 [1] je znečištění ovzduší hlavním environmentálním problémem a postihuje každého v zemích s nízkými, středními i vysokými příjmy. V roce 2019 žilo podle WHO 99 % světové populace v místech, kde nebyly splněny limity pro kvalitu ovzduší. Podle odhadu způsobilo znečištění ovzduší v roce 2016 celosvětově 4,2 milionu předčasných úmrtí. V zemích s nízkými a středními příjmy jsou lidé neúměrně vystaveni zátěži venkovního ovzduší a tvoří 91 % z 4,2 milionu předčasných úmrtí. Největší zátěž je podle WHO v jihovýchodní Asii a regionech západního Pacifiku.

Úmrtnost je způsobena expozicí jemným částicím o průměru 2,5 mikronu nebo méně, tyto částice způsobují hlavně kardiovaskulární a respirační onemocnění a rakovinu. Podle odhadů WHO v roce 2016 ze všech úmrtí znečištěným ovzduším bylo asi 58 % předčasných úmrtí způsobeno ischemickou poruchou srdeční a mozkovou mrtvicí, 18 % úmrtí bylo způsobeno chronickou obstrukční plicní nemocí a akutními záněty dolních dýchacích cest, 6% úmrtí bylo způsobeno rakovinou plic. Některá úmrtí však mohou být přičítána více než jednomu rizikovému faktoru současně. Například kouření i znečištění vnějšího ovzduší ovlivňují rakovinu plic. Některým úmrtím na rakovinu plic bylo možné zabránit, buď zlepšením kvality vnějšího ovzduší nebo omezením kouření tabáku. Řešení všech rizikových faktorů pro lidské zdraví vlivem nepřenositelných nemocí je klíčem k ochraně veřejného zdraví. Existuje úzký vztah mezi koncentrací částic v ovzduší a úmrtností nebo nemocností, a to jak v krátkodobém, tak v dlouhodobém horizontu. Když se sníží koncentrace částic, sníží se i úmrtnost za předpokladu, že ostatní faktory zůstanou stejné.

Hmotnostní koncentrace částic v ovzduší se běžně používá jako hlavní indikátor kvality ovzduší. Částice totiž ovlivňují zdraví většího množství lidí než jakákoliv jiná znečišťující látka. Hlavními složkami jsou sírany, dusičnany, chlorid sodný, saze, minerální prach a voda. Skládá se z komplexní směsi pevných a kapalných částic organických a anorganických látek suspendovaných ve vzduchu. Částice o průměru 10 mikronů a méně ( $\leq PM_{10}$ ) mohou proniknout až do plic a usadit se v plicních sklípcích. Mnohem nebezpečnější jsou nanočástice o průměru jednotek až desítek nanometrů, které mohou proniknout buněčnou stěnou až do krevního řečiště. Znečištění malými částicemi má dopad na zdraví i při velmi



nízkých koncentracích, ve skutečnosti nebyla stanovena žádná prahová hodnota, pod níž by nebylo pozorováno žádné poškození zdraví. Globální směrné limity WHO se proto zaměřily na dosažení co nejnižších koncentrací PM (particulate mass).[1]

## 1.2 Emise z dopravy

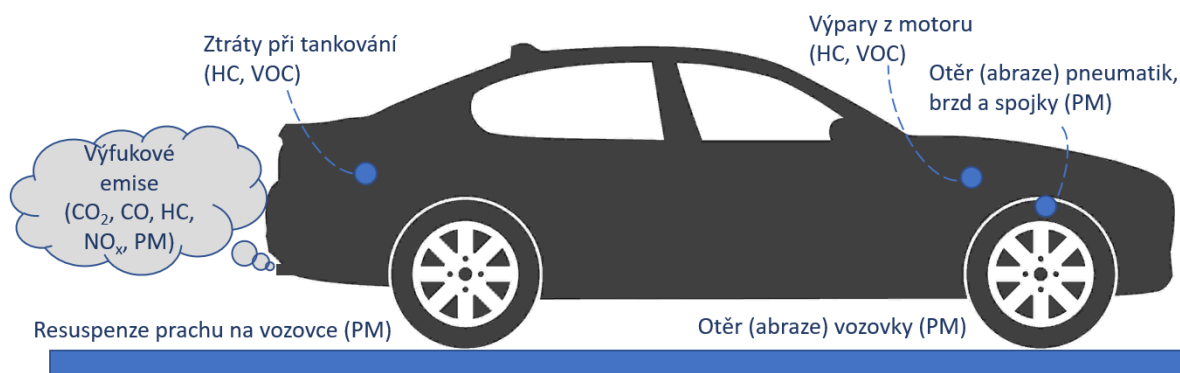
Hlavně ve městech jsou emise z provozování dopravních prostředků považovány za jednu z největších znečišťovatelů ovzduší. Je to především z důvodu vysokého množství osobních a nákladních aut na malém prostoru, kde může vlivem úzkých ulic a vysokých budov špatně proudit vzduch a zdraví škodlivé emise se zde mohou hromadit. Lidé jsou poté při pohybu podél pozemní komunikace, například po chodnících, vystaveni mnohem větší koncentraci zdraví škodlivých látek než jinde.

Hlavním zdrojem emisí z dopravy jsou plyny a pevné částice vznikající spalováním paliva ve spalovacím motoru. Nejsou však jediným zdrojem.

Vlivem brzdění u třecích kotoučových brzd dochází k otěru částic z brzdových destiček a kotoučů samotných a jejich uvolňování do ovzduší. Tato problematika se týká i kolejových vozidel například tramvají a metra. U těchto vozidel se stejně jako u automobilů s hybridním a elektrickým pohonem využívá brzdění elektromotorem tzv. rekuperace. Tím se tyto emise snižují, ale stále jsou případy, kdy je nutné použít i u těchto vozidel mechanické brzdy. V případě manuální převodovky, která má většinou třecí lamelovou mechanickou spojku, dochází také k abrazi (otěru) třecích ploch lamel a uvolňování částic do ovzduší. Všechna vozidla s pryžovými pneumatikami více či méně emitují částice vlivem otěru pneumatik. Stejně tak musí docházet i k abrazi na druhé straně, tedy na straně vozovky. Nesmíme zapomenout také na uvolňování částic vlivem koroze karoserie nebo podvozku. O tyto částice se buď postará počasí tím, že je vítr roznese do širokého okolí nebo je déšť spláchne pryč ze silnice nebo mohou být zachyceny čistícím vozem při čištění vozovky. Poslední možností je, že se usadí na vozovce a každé projíždějící vozidlo je vlivem turbulentního proudění opět rozvíří do ovzduší.

Dalším zdrojem znečištění mohou být výpary z palivového systému motoru nebo vlivem ztrát při tankování. Jedná se hlavně o uhlovodíky obsažené v palivu a o VOC (Volatile Organic compounds) tedy těkavé organické sloučeniny.

Zdroji emisí z dopravy jsou tedy emise ze spalování, z otěru a z vypařování. Shrnutí emisí z dopravy můžeme vidět na Obr. 1. [2]



Obr. 1- Emise z dopravy [2]

### 1.3 Emise ze spalování

Principem spalovacích motorů je spalováním různých paliv měnit chemickou energii uloženou v palivu na energii mechanickou, která je následně přenášena pomocí rozvodného ústrojí na kola a pohání vozidlo. V současné době nejvíce používaná paliva v pozemní dopravě jsou různou směsí uhlovodíků. Jedná se hlavně o benzín, naftu, LPG a CNG. Spalování těchto paliv se nikdy neobejde bez produkce znečišťujících látek.

Spalováním uhlovodíkového paliva se vzduchem vzniká při dokonalé oxidaci uhlíku a vodíku z paliva oxid uhličitý CO<sub>2</sub> a voda H<sub>2</sub>O. Vlivem nedokonalé oxidace těchto prvků se naopak ve spalinách objevuje oxid uhelnatý CO a vodík H<sub>2</sub>. Za předpokladu, že je použit vzduch jako okysličovadlo, je největší složkou spalin dusík N<sub>2</sub>. Ve spalinách se může objevit i kyslík O<sub>2</sub> a to v případě, že se nevyužije všechen při spalování pokud je ve směsi v přebytku nebo z jiných důvodů. Za vysokých teplot ve spalovacím prostoru vznikají oxidací vzdušného dusíku oxidy dusíku NO<sub>x</sub>, hlavně oxid dusnatý NO a menší množství oxidu dusičitého NO<sub>2</sub>. Při velmi nepříznivých lokálních či globálních podmínkách pro oxidaci paliva mohou spaliny obsahovat i nespálené uhlovodíky HC. U motorů s vnější tvorbou směsi může docházet k úniku části čerstvé směsi paliva do výfukového traktu vlivem zkratového vyplachování. Za úplného nepřístupu vzduchu nastává uvnitř kapičky kapalného paliva při vysoké teplotě dekompozice molekul uhlovodíků a výsledkem je tvorba pevného uhlíku tedy sazí. S výfukovými plyny též odchází malé množství dalších pevných částic, může se jednat o vysokomolekulární produkty teplotní degradace mazacích olejů, prach, popel, částičky rzi a tak dále.

Z uvedených složek výfukových plynů se mezi sledované škodliviny řadí CO, NO<sub>x</sub>, HC a částice.

Produktem nedokonalé oxidace uhlíku obsaženého v uhlovodíkovém palivu je oxid uhelnatý. Hlavní příčinou jeho výskytu ve spalinách je nedostatek kyslíku ve spalované směsi, tedy když má směs součinitel přebytku vzduchu  $\lambda < 1$ . U zážehového motoru



dosahuje koncentrace oxidu uhelnatého řádově desítkách jednotek procent, výjimečně, při spalování extrémně bohaté směsi, může překročit i 10 %. Nedostatek kyslíku může být buď lokální nebo časový. Lokální nastává například v některých válcích víceválcového motoru nebo v některých oblastech spalovacího prostoru. Časový nastává i při průměrné hodnotě přebytku vzduchu v okolí  $\lambda = 1$ , protože vlivem časové fluktuace směšovacího poměru se v některých časových obězích spaluje bohatá směs. Oxid uhelnatý je v tomto případě ve spalinách přítomen společně s kyslíkem. Globální nebo lokální nedostatek kyslíku je možné označit jako hmotově bilanční příčinu emise CO.

U emise nespálených uhlovodíků HC je to velmi podobné. Stejně tak jako emise oxidu uhelnatého se jedná o produkt nedokonalého průběhu oxidace, v tomto případě o její částečnou nebo úplnou absenci. Na rozdíl od emisí oxidu uhelnatého probíhá emise uhlovodíků nejen při bohaté směsi, ale také při extrémně chudé směsi, kde vlivem nízké reakční rychlosti nedojde k oxidaci. U oxidu uhelnatého je tento důvod emise řádově nižší až zanedbatelný. Výraznější vliv na emisi HC mají oblasti s nízkou teplotou hoření. Obvykle v blízkosti stěn nebo v úzkých štěrbinách, tyto oblasti jsou poté v této souvislosti nazvány zhášecí zóny. Společná vlastnost oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků je, že jsou to paliva. Tedy tím, že nejsou oxidovány se nevyužije plně energie, která by mohla být přeměněna na teplo ve válci a následně na mechanickou energii pohánějící vozidlo.

Oxidy dusíků vznikají oxidací vzdušného dusíku, který je společně s kyslíkem potřebným pro oxidaci obsažen v nasávaném vzduchu. Oxidace dusíku probíhá za vysokých spalovacích teplot, samotná reakce je však endotermická. Jde o jeden z mechanismů, jak přírodní síly bojují proti zvýšení teplot. Při spalování výrazně bohaté směsi je intenzita oxidace dusíku vlivem nedostatku kyslíku do jisté míry snížena, dusíku je ve směsi stále dostatek. Z pohledu energetických a emisních parametrů motoru je nepříjemné, že emise oxidů dusíku je zvyšována prakticky všemi opatřeními vedoucími k větší energetické účinnosti motoru.

Pevný uhlík vzniká při spalování v motoru vysokotepeelnou dekompozicí palivových molekul bez přístupu kyslíku. Vysoká emise pevných částic je tedy zapříčiněna zejména nehomogenitou směsi až do hodnoty  $\lambda = 0$  uvnitř kapiček kapalného paliva, tam totiž není kyslík přítomen vůbec. Emise sazí tedy nejvíce souvisí s kvalitou rozprášení paliva do válce při vstřikování do vznětového motoru. Přísun kyslíku k částicím se zlepšuje se zvětšováním množství vzduchu přiváděného do válce. Proto se emise snižuje s rostoucí hodnotou  $\lambda$ . Vznětové motory tedy pracují i při plné přípustí paliva se směsí, která by byla u zážehového motoru označena za extrémně chudou. [3]

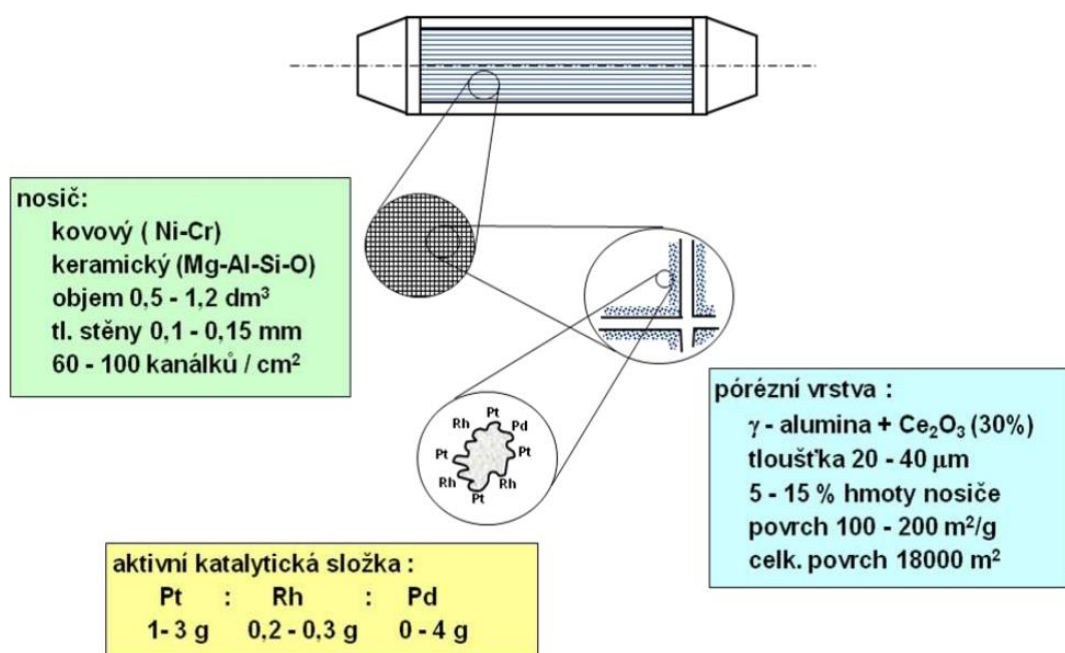
#### 1.4 Redukce emisí z dopravy

Tvorba emisí závisí na několika faktorech. Na konstrukci motoru, technickém stavu vozidla, seřízení motoru, jízdním režimu, palivu a dodatečné úpravě spalin. Emise je tedy možné



ovlivnit již v zárodku přímo v místě, kde vznikají, a to při samotném návrhu a konstrukci motoru. Vliv mají hlavně způsob a vyspělost přípravy palivové směsi, konstrukce spalovacího prostoru, časování vstřiku a zážehu směsi a tak dále. Je potřeba vzít v potaz správné seřízení a kondici motoru v průběhu provozu vozidla. Vliv konstrukce je násobně větší než paliva, ale i to má vliv na tvorbu emisí. U paliva záleží na chemickém složení a fyzikálně-chemických vlastnostech, což ovlivňuje především složení uhlovodíků v emisích. Nemalý vliv má i způsob provozu vozidla. V případě častých studených startů nebo provozu pouze na malé vzdálenosti může docházet ke zvýšené tvorbě emisí nebo k nefunkčnosti systému dodatečné úpravy spalin. Na výstupu z motoru se za účelem snižování emisí umísťují systémy na dodatečnou úpravu spalin. Tyto systémy mají za úkol zbavit spaliny škodlivých nebo nežádoucích látek ze spalovacího procesu. Používají se hlavně katalytické konvertory, filtry pevných částic a recirkulace výfukových plynů EGR.

Úkolem třicestného katalyzátoru označovaného jako TWC je snížení obsahu CO, HC a NO<sub>x</sub> vypouštěných do ovzduší a používá se u zážehových motorů. Nazývá se třicestný, protože v první „cestě“ oxiduje oxid uhelnatý na oxid uhličitý, ve druhé „cestě“ oxiduje nespálené uhlovodíky na oxid uhličitý a vodu a ve třetí cestě redukuje oxidy dusíku na vzdušný dusík. Struktura třicestného katalyzátoru je na Obr. 2. Jako katalyzátor oxidačně redukčních reakcí

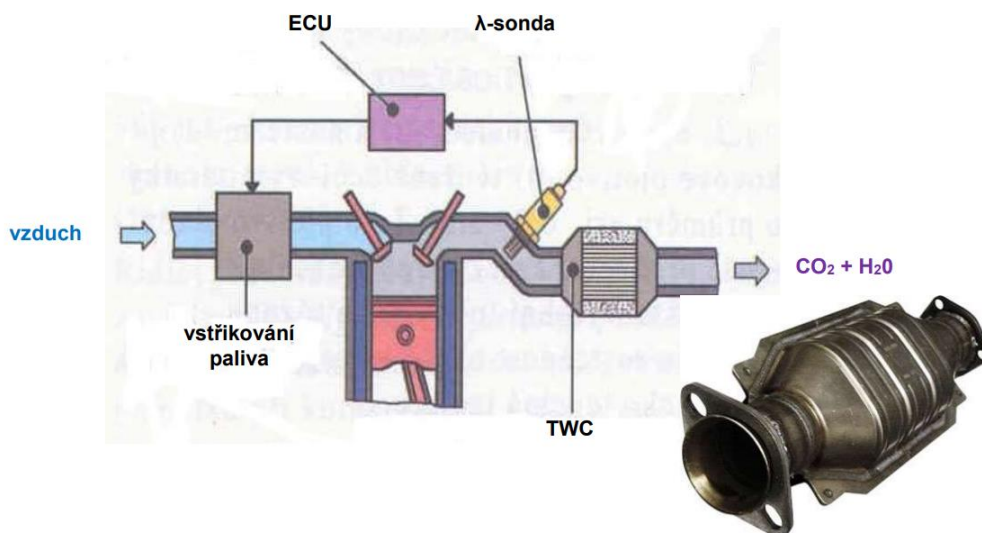


Obr. 2-Struktura třicestného katalyzátoru [4]

zde fungují 3 aktivní katalytické složky platina, rhodium a paladium. Pro správnou funkci katalyzátoru je nutné udržovat přesně stechiometrickou směs tedy  $\lambda = 1$ , proto se využívá u zážehových motorů. Dalším omezením je, že správně funguje až po zahřátí na provozní teplotu cca 250 °C až 300 °C, proto se umísťuje blíže k motoru nebo se vybavuje vyhříváním. Lambda sonda snímá obsah kyslíku ve spalinách a informace poté posílá řídicí jednotce,

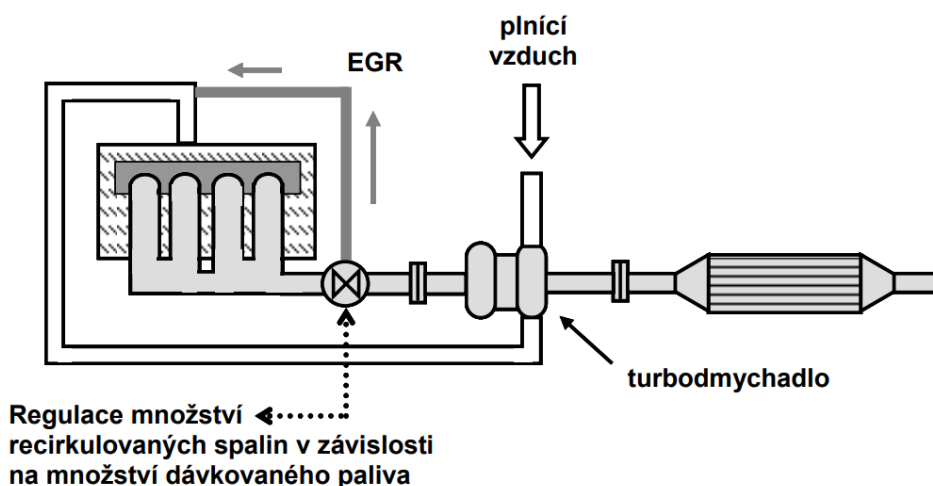


kteřá upravuje bohatost směsi. Pro ověření funkce katalyzátoru a řízení bohatosti směsi se systém vybavuje dvěma lambda sondami, které snímají spaliny před a po katalyzátoru. Stejně jako TWC je potřeba je zahřát na provozní teplotu. Možné umístění třícestného katalyzátoru je vidět na Obr. 3.



Obr. 3-Umístění katalyzátoru [4]

U vznětových motorů nelze použít zmíněný třícestný katalyzátor, protože lambda je větší než jedna, nejedná se tedy o stechiometrickou směs, která je nutná pro jeho funkci. Používají se proto oxidační katalyzátory, které oxidují oxid uhelnatý opět na oxid uhličitý a nespálené uhlovodíky na oxid uhličitý a vodu. Jejich účinnost je okolo 40 až 50 %.



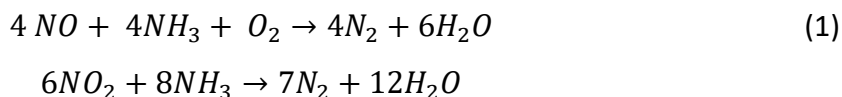
Obr. 4-Schéma EGR [4]

Ke snížení emise oxidů dusíku se používá recirkulace výfukových plynů (Exhaust Gas Recirculation) EGR. Funguje na principu řízeného dávkování spalin v rozmezí od 0 % až do 30 % do plnicího vzduchu. Při malém zatížení motoru je možné přidat více spalin naopak při velké zátěži méně nebo vůbec. Přidáním spalin se sníží obsah kyslíku při zachování stejného objemu plynů a zmenší se tím i lokálně špičkové teploty. Při menším obsahu

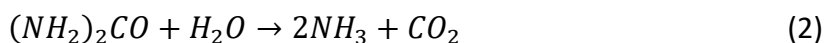


kyslíku a menších teplotách dochází méně k oxidaci vzdušného dusíku na  $\text{NO}_x$ . Negativním důsledkem EGR je vyšší emise částic. Z Obr. 4 je patrné umístění EGR v rámci vozidla.

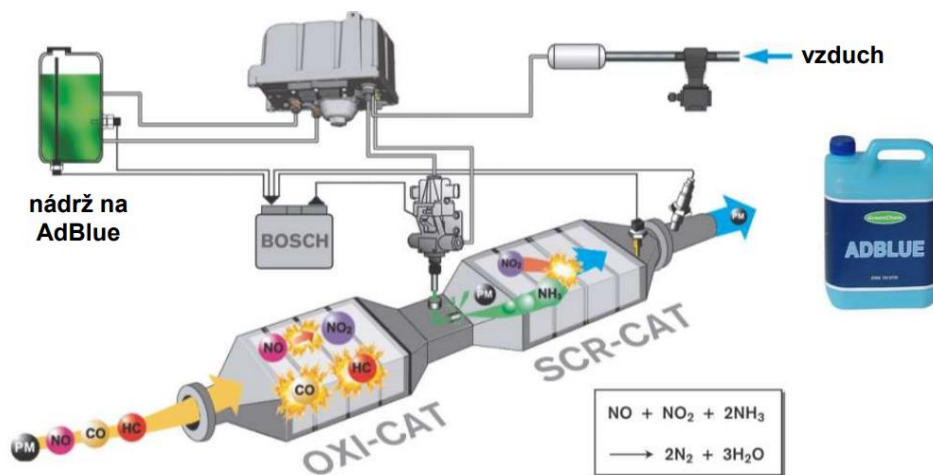
Další možností, jak snižovat emise oxidů dusíku je použití selektivní katalytické redukce (Selective Catalytic Reduction) SCR. U stacionárních motorů je možné využít přímo amoniak  $\text{NH}_3$ , avšak kvůli skladování a distribuci se v současnosti využívá močoviny  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . Toto redukční činidlo se přidává do spalin na výstupu z motoru a probíhá zde redukční reakce viz (1).



V případě dávkování močoviny se používá její 32,5 % vodný roztok nazývaný AdBlue. Nejprve musí dojít ve výfukovém ústrojí k přeměně močoviny na amoniak. Dochází k ní za vysokých teplot hydrolyzou močoviny, viz (2)



Z Obr. 5 je zřejmé, že selektivní katalyzátor je většinou umístěn rovnou za oxidační katalyzátor. Ve vozidle musí být také navíc samostatná nádrž na AdBlue, které je poté



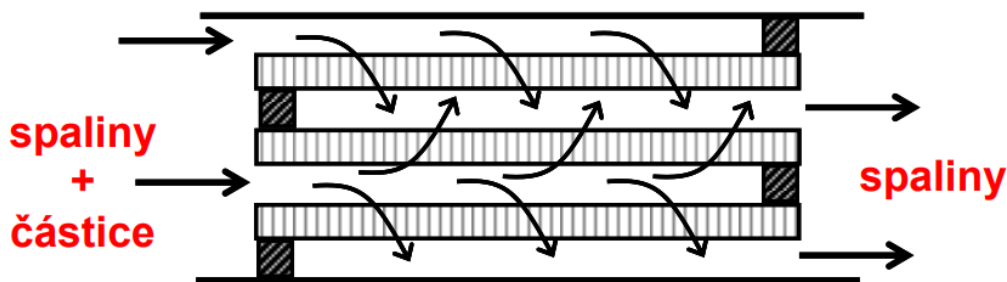
Obr. 5-Umístění SCR [4]





vstřikováno před SCR, kde následně probíhá reakce. Funkčnost a účinnost celého systému je opět sledována pomocí různých sond a vyhodnocena v řídicí jednotce.

Ideálně by po průchodu spalin všemi těmito systémy mohly ze škodlivých látek zůstat pouze částice. Ty jsou zachycovány pomocí filtru pevných částic (Diesel Particulate Filter) DPF. Spaliny prochází přes porézní keramické filtry, kde jsou nuceny prostupovat stěnami jednotlivých buněk porézní vrstvy, přes které pevné částice neprojdou nebo se vlivem



Obr. 6-Schéma filtru částic [4]

setrvačnosti dostanou do slepých komůrek, kde se usadí. Schéma průchodu částic filtrem je znázorněno na Obr. 6. Vlivem používání se z principu jeho funkce filtr zanáší částicemi a je nutné jej regenerovat. Zanášením narůstá tlaková ztráta potrubí, klesá tím výkon vozidla a narůstá spotřeba. Tlaková ztráta je sledována tlakovými snímači před a za filtrem a dává tím řídicí jednotce informace o stavu filtru. K regeneraci filtru může docházet spalováním částic při vysoké teplotě. Obvykle se tak děje při vysokém zatížení nebo dodatečným vstřikováním paliva před filtr. K tomuto způsobu regenerace je potřeba teplota spalin převyšující 600°C. Nejvíce používanými způsoby regenerace filtru jsou katalytické. Spalují částice při nižší teplotě vlivem katalytických složek. Kovové katalytické složky mohou být ve formě přísad paliva, v tom případě se jedná o kovy cer a železo, nebo jsou nanášeny přímo na filtru a v tom případě se jedná o platinu, mangan a další. Regenerace filtru pevných částic může být tedy dosažena buď pasivně nebo aktivně. Pasivně probíhá samovolně při vhodných podmínkách, například při jízdě po dálnici, kde je dostatečně vysoká teplota. Při nahromadění příliš velkého množství částic ve filtru zvýší řídicí jednotka aktivně množství vstřikovaného paliva, aby zvýšila teplotu spalin a spálila částice. [2][4]

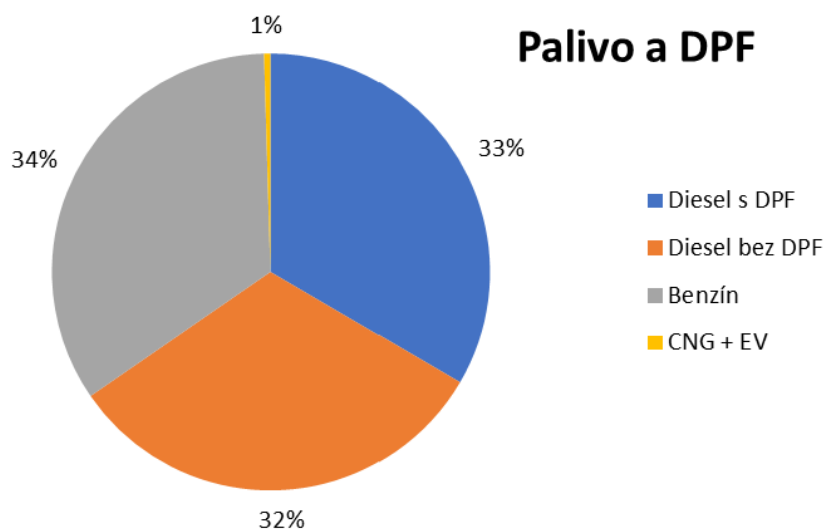
### 1.5 Narušení funkce filtru

Prvotní seřízení motoru a systému úpravy spalin je v gesci výrobce, pozdější udržování je v gesci provozovatele. Avšak nezanedbatelná část zejména naftových motorů je provozovateli následně upravována a modifikována za účelem zvýšení výkonu nebo rychlejšího náběhu výkonu. To je spojeno hlavně s navýšením emisí částic, často velmi významným. Hlavním cílem údržby motoru je udržování motoru v odpovídajícím stavu, zanedbání údržby může vést k poruchám. Tyto poruchy se však nemusí nutně projevit na jízdních vlastnostech, a proto jsou často ignorovány. Zanedbání údržby může vést



k nadměrným emisím částic a v případě, že je vůz vybaven filtrem pevných částic, tak jeho selháním. Relativně často se však místo řešení primárního problému, tj. mechanické závady vedoucí k narušení filtrační schopnosti, selhání vyřeší jeho provrtáním, vytlučením nebo odstraněním. Služby odstranění DPF, simulace DPF, kde řídicí jednotka, která sleduje funkci DPF dostává falešný signál odpovídající správné funkci DPF, a dokonce zapůjčení DPF pro úspěšné absolvování technické kontroly jsou volně dostupné na internetu. Na trhu jsou též dostupné výrobky vydávající se za DPF, u kterých je zřejmé, že správnou funkci plnit nemohou. Systém pravidelných technických kontrol v ČR, ale do jisté míry i v ostatních zemích Evropy, je založen na dnes již zastaralém principu měření kouřivosti, který často není schopen odhalit chybějící DPF. Systematické ani namátkové kontroly emisí se prakticky nedělají.

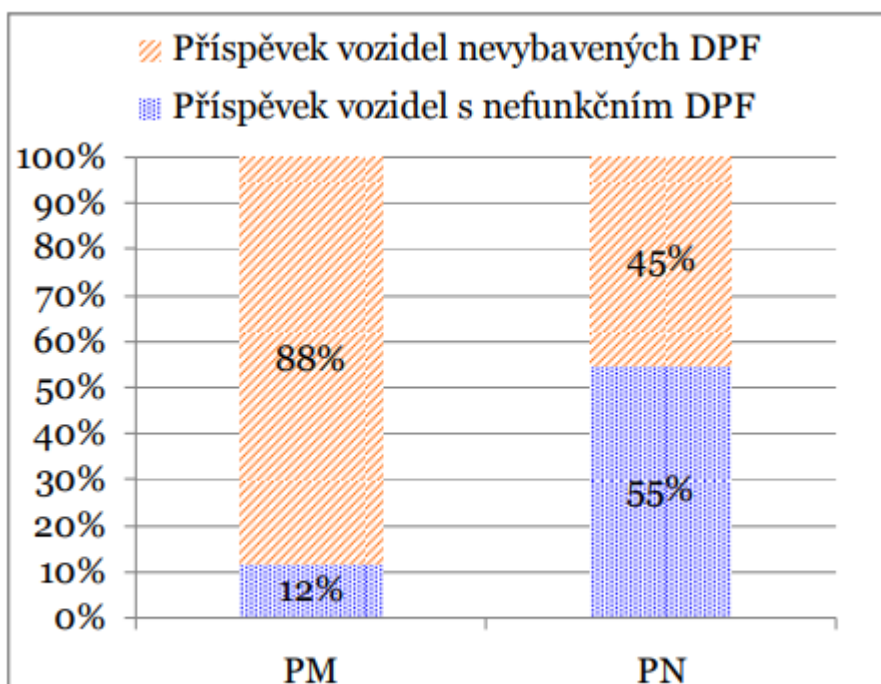
Důsledkem těchto skutečností je, že jsou na silnicích provozována vozidla s nadměrnými emisemi částic v důsledku buď samovolného nebo cíleně dosaženého nevyhovujícího technického stavu vozidla. Na základě zkušeností z celého světa lze očekávat, že tato vozidla neúměrně přispívají k celkovým emisím. Relativně malý počet vozidel s vysokými emisemi tvoří podstatnou část celkových emisí vozového parku.



Obr. 7- Rozložení naměřených vozidel podle paliva a DPF [5]



Z Obr. 7 technické zprávy o stavu vozového parku Hlavního města Prahy [5], který vychází z měření přibližně 25 tisíc vozidel v roce 2017 na území Prahy, vyplývá, že třetina lehkých vozidel byla vybavena naftovými motory s DPF, další třetina byla vybavena naftovými motory bez DPF a poslední třetina byla vybavena benzínovými motory. Třetina vozidel nebyla starší 3 let a polovina nebyla starší 7 let. Přibližně 9 % z vozidel, která měla být vybavena DPF, nemá DPF funkční nebo jim zcela chybí. U zbylých 91 % vozidel nebyly zaznamenány žádné měřitelné částice díky téměř stoprocentní účinnosti DPF. Měřením bylo zjištěno, že vozidla s vysokými emisemi částic mají velký podíl na celkových emisích částic, dokonce tak, že 5 % vozidel s nejvyššími emisemi emituje polovinu a 10 % vozidel s nejvyššími emisemi produkuje přibližně tři pětiny částic. Problém emisí částic není omezen jen na vozidla s vadným DPF, ale také podstatným zdrojem částic jsou starší vozidla, která nejsou vybavena DPF, což potvrzuje také Obr. 8. Z výsledků vyplývá, že danou problematikou chybějícího DPF nebo jeho špatné funkce je záhodno se zabývat.



Obr. 8- Podíl vozidel s nefunkčním DPF na celkových emisích částic [5]



## 2 Možnosti měření / detekce

Z předchozí kapitoly vyplývá, že technický stav vozového parku je důležité monitorovat a udržovat vozidla v co nejlepším stavu. Policie má pravomoc při silniční kontrole zkontrolovat technický stav vozidla, případně jej poslat na podrobnější prohlídku na stanici technické kontroly.

Samotné měření emisí může probíhat buď v laboratorních podmínkách nebo v reálném provozu. V laboratorních podmínkách se měří emise na válcové brzdě v rámci vývoje a výzkumu nebo pro homologaci vozidel před uvedením na trh. Toto měření se vyznačuje vysokou opakovatelností, avšak může se i značně lišit od reálných emisí při provozu automobilu. Nejčastěji jsou v současné době vozidla měřena na stanicích technické kontroly. V reálném provozu jsou minimálně tři možnosti měření: PEMS, Plume chasing a stacionární měření.

### 2.1 Kontroly emisí a technického stavu

Povinnost kontroly na stanici technické kontroly, kde je součástí i měření emisí je u nového běžného lehkého vozidla po prvních čtyřech letech a poté již každé dva roky. Pro kontrolu vozidla je přesný postup, který musí kontrolní technik dodržet. První, co musí technik udělat je identifikovat vozidlo nejčastěji podle VIN kódu. Na základě toho, do jaké skupiny vozidlo spadá, se poté provádí zkouška. Skupin je několik a vozidla se dělí na ty se vznětovým nebo zážehovým motorem a dále na vozidla s řízeným nebo neřízeným systémem. Řízené systémy se dělí ještě na ty, které mají nebo nemají OBD (On-Board Diagnostics). Zvláštní kategorií jsou vozidla vojenská a historická. OBD je normovaný protokol, který slouží k diagnostice emisních systémů vozidel. Též normovaný je konektor, kterým musí být vozidlo vybavena pro připojení k OBD. Po připojení k diagnostice se technikovi načtou Readiness kódy, které představují záznamy z interních ověřovacích mechanismů řídicí jednotky motoru. Ta v průběhu provozu sama ověřuje funkčnost jednotlivých systému a pomocí těchto kódů zapisuje jejich stav. Nejčastěji se jedná o funkčnost EGR, lambda sond, katalyzátoru nebo filtru pevných částic.

Bez ohledu na typ vozidla se vždy provádí vizuální kontrola, kde se kontrolují skupiny a díly ovlivňující tvorbu a emise škodlivin. Posuzuje se úplnost a těsnost příslušných soustav, těsnost motoru, nepřípustné modifikace a nepřiměřené úpravy. Kontrola ostatních zařízení určených ke snižování emisí se provede v rozsahu stanoveným výrobcem vozidla. Konkrétně u výfukového systému se kontrola zaměřuje na přítomnost katalyzátorů, DPF, průchodnost EGR atd., poté na viditelné poškození zejména trhlínky v okolí lambda sond, upevnění lambda sondy nebo zda není použit mezikus otupující její funkci.

Poté se u vozidel se zážehovými motory a zároveň neřízenými systémy měří koncentrace škodlivých látek ve spalínách. U zážehových motorů s řízenými systémy bez OBD se ještě



před měřením škodlivých látek provede diagnostika řízení motoru. Vyhodnotí se závady, které souvisí s emisemi nebo se správným chodem motoru. U vozidel s OBD se také provede diagnostika a v případě, že Readiness indikují neproběhnuté testy, aplikují se doplňkové kontroly.

Vozidla se vznětovým motorem jsou vždy kontrolována na kouřivost, tedy na emisi částic. Obdobně jako u zážehových motorů se, pokud je vůz vybaven motorem se řízenými systémy bez OBD, provede diagnostika a vyhodnocení chybových hlášek systému. V případě, že je vozidlo vybaveno OBD, se vyhodnotí i Readiness kódy a podle výsledku se buď rovnou přistoupí k měření kouřivost nebo k doplňkovým kontrolám.

Limity a předpisy, které musí vozidlo splňovat se řídí podle toho, za jakých předpisů a v jakém roce bylo vozidlo homologováno. Toto bylo pouze stručné shrnutí, ve skutečnosti může kontrola probíhat mnohem podrobněji. [6]

## 2.2 Měření v reálném provozu

### 2.2.1 On board (PEMS)

Zařízení anglicky nazývané portable emissions measurement systems (PEMS) je možné přeložit jako přenosný měřicí systém emisí. Slouží k měření emisí jednoho konkrétního vozu pomocí přístrojů umístěných buď uvnitř ve vozu nebo připevněných na tažné zařízení zvenku. Jedno z možných umístění je vidět na Obr. 9. Přístroje vzorkují a analyzují výfukové plyny přímo z výfuku během jízdy. Tím se získávají relativně přesné výsledky koncentrace jednotlivých látek při reálném provozu. Množství měřených látek omezuje dostupný prostor pro měřicí přístroje a váha přístrojů. Nejčastěji měřenými látkami jsou CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC a částice. Metodou PEMS je možné získat mnoho dat o daném vozidle, validuje se tím měření prováděné v laboratoři, hlavně se doplňuje o stavy, kterých není možné dosáhnout v laboratorních podmínkách. Nevýhodou tohoto měření je, že ani při jízdě stejnou trasou, ve stejném čase není možné dosáhnout stejných okolních podmínek



testování. Oproti měření v laboratorních podmínkách je však výrazně méně finančně nákladné. Často je využíváno přímo automobilkami při vývoji samotných vozidel. [7]



Obr. 9-PEMS [8]

### 2.2.2 Plume chasing

Podobnou metodou PEMS je i takzvaný „plume chasing“ ve volném překladu dohánění oblaku. Rozdíl je v umístění měřících přístrojů, v tomto případě jsou umístěny na vozidle jedoucím v závěsu za vozidlem měřeným, které je patrné z Obr. 10. Měřící vozidlo má většinou vzorkovací sondu umístěnou v přední masce vozidla odkud jsou vzorky svedeny dovnitř vozidla, kde jsou umístěny analyzátory. Výhodou tohoto měření oproti PEMS je stálé umístění měřící aparatury ve vozidle bez nutnosti přemístování. Měřící přístroje tím, že nejsou umístěny na měřeném vozidle vůbec neovlivňují jeho emise přidáváním váhy nebo zhoršením aerodynamiky. Často se využívá pro umístění měřících přístrojů větších vozidel a dodávek, z důvodu většího místa pro přístroje a tím i možností měřit více různých látek současně. Nejčastěji se opět měří CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC a částice. Nevýhodou je však, že měřené spaliny jsou oproti PEMS velmi zředěné a závislé i na okolních vlivech, například



Obr. 10- Schéma použití „plume chasing“, kde „analyzer“ označuje měřící přístroje a „plume capture device“ označuje sběrné zařízení výfukových oblaků [9]

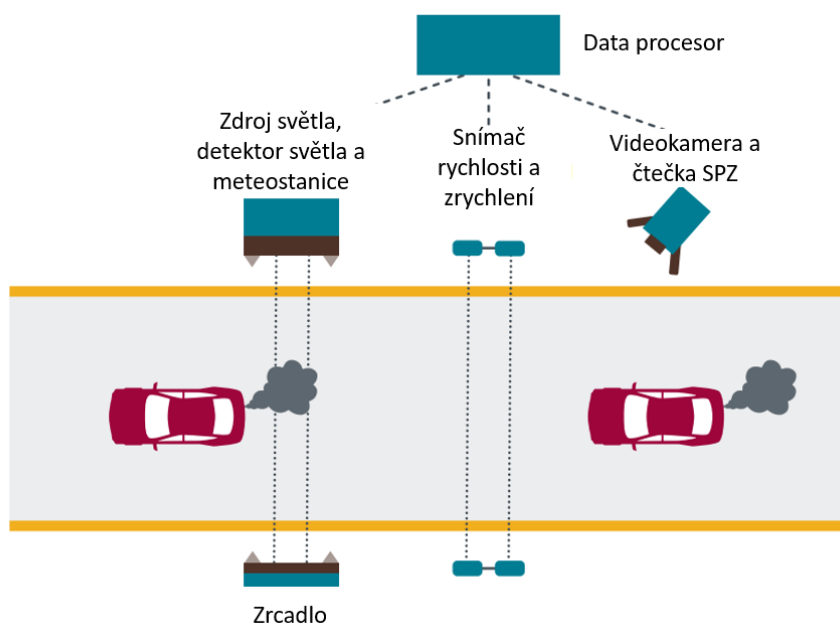


počasí. Další nevýhodou je, že se v závislosti na rychlosti se musí udržovat bezpečný rozestup vozidel a také je nutno zohlednit proměnlivost pozadové koncentrace. Jedná se tedy o relativně jednoduchou a finančně méně náročnou metodu měření emisí jednoho vozidla. [7][10]

### 2.2.3 Stacionární měření

V případě, že je měřicí aparatura umístěna na jednom místě a měří projíždějící vozidla mluvíme o stacionárním měření. Hlavní výhodou je vysoký počet změřených vozidel za krátký časový úsek, teoreticky až 1800 vozidel za hodinu při dodržování bezpečného minimálního rozestupu 2 sekund. Naopak omezení jsou zatím v jednoznačném přiřazení naměřených emisí konkrétnímu vozidlu.

I u stacionárního měření se používá několik metod snímání. Liší se hlavně v umístění vzorkovací sondy nebo v přístrojích. Často bývá měření emisí spojeno i s rozpoznáváním SPZ, snímáním rychlosti a zrychlení a zaznamenáváním počasí. Rozpoznávání SPZ je v tomto případě velmi důležité, z registru vozidel poté možné zjistit o jaké se jedná vozidlo, jaký má typ motoru, do jaké emisní třídy spadá, a tedy jaké se očekávají emise. Z naměřené rychlosti a zrychlení lze zjistit při jakém zatížení motor zrovna pracuje. Podle toho se také budou vyvíjet emise motoru. Očekává se, že pokud bude vozidlo prudce zrychlovat bude motor ve větší zátěži a je možné naměřit větší koncentrace spalin. Zaznamenávat počasí může být výhodné z hlediska popsání chování vzduchu za vozidlem. Pokud bude například velmi silný boční vítr, bude velmi obtížné naměřit emise jednotlivých vozidel.

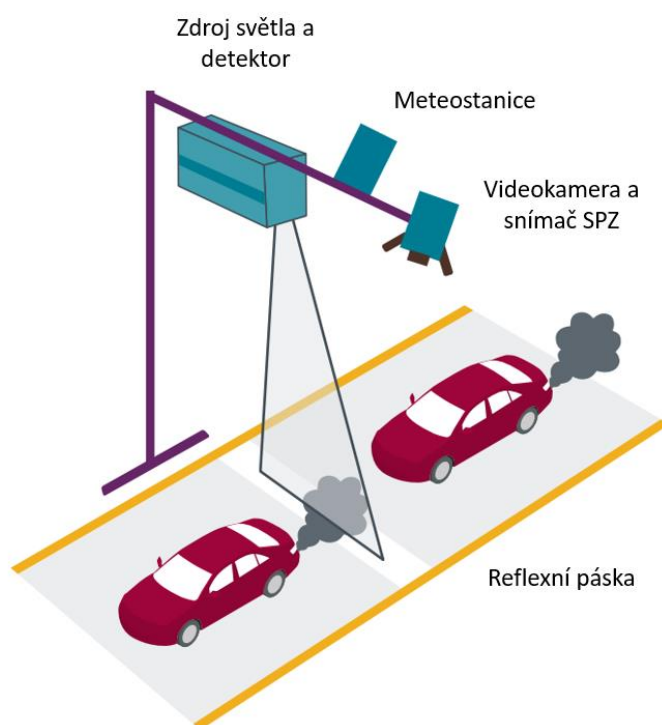


Obr. 11- Schéma „open path“ metody [9]

V současné době se používají dvě hlavní metody měření. Jednou z nich je „open path“ v překladu otevřená dráha a funguje na principu umístění zdroje světla a detektoru na



jedné straně a na druhé straně vozovky je umístěno buď zrcadlo nebo koutový odražeč, který odrazí světlo zpět k detektoru. Celé schéma umístění aparatury je zobrazeno na Obr. 11. Světlo tedy prochází oblakem spalin a spaliny část z toho světla absorbují. Podle absorpce jednotlivých vlnových délek spalinami se zjistí koncentrace jednotlivých látek. V současné době všechny tyto systémy používají infračervené nebo ultrafialové záření.



Obr. 12- Vertikální způsob snímání „open path“ [9]

Dále je možné použít vertikální způsob snímání, kde se reflexní páska umístí přímo na vozovku. Umožní se tím snímání jednotlivých vozidel na víceproudé komunikaci. Schéma možného umístění je lépe patrné z Obr. 12. Toto bylo použito v projektu EDAR v Tennessee v USA.



Obr. 13- Vzorkování odběrem spalin [9]





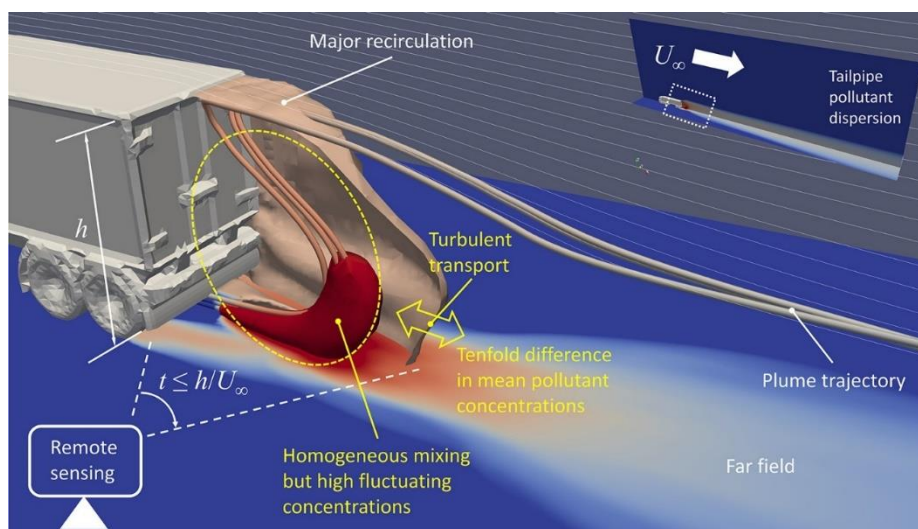
Další metodou jsou systémy, které extrahují část spalin pomocí sondy do analyzátorů. Jde tedy o vzorkování spalin, které dorazí přímo k místu, kde je sonda, která nasává vzorek k přístrojům. Je to tedy metoda velmi závislá na umístění sondy a průběhu oblaku za projíždějícím vozidlem. Nejjednodušším místem pro umístění vzorkovací sondy je okraj vozovky přímo u měřících přístrojů. Další možností je umístění sondy uprostřed jízdního pruhu, kde ji vozidla přejíždějí. Sonda by tedy byla umístěna blíže výfuku projíždějících osobních vozidel. Z Obr. 13 je zřejmé, že může být sonda umístěna nad jízdní pruh, kde snímá zejména těžká nákladní vozidla. Speciální aplikací tohoto bylo snímání těžkých nákladních vozidel v USA. Probíhalo ve speciálním stanu, kterým vozidla projížděla, a je vidět na Obr. 14. [11]



Obr. 14- Vzorkování ve speciálním stanu [11]



Důvodem, proč je výhodnější mít odběrná místa nad nebo pod přímo pod projíždějícími vozidly, je proudění vzduchu, a tedy i spalin přímo za vozidlem. Z odborného článku „Near-field dynamics and plume dispersion after an on-road truck: Implication to remote sensing“ [12], který se zabýval simulacemi chování oblaku vzduchu a spalin za vozidlem je možné odhadnout vhodná místa pro vzorkování. Na Obr. 15 simulace proudění je tmavě červená oblast, která označuje místo s největší koncentrací spalin za jedoucím nákladním vozidlem. Oblast je velmi blízko k vozovce a zároveň se velmi málo a pomaleji rozšiřuje do stran mimo vozovku.



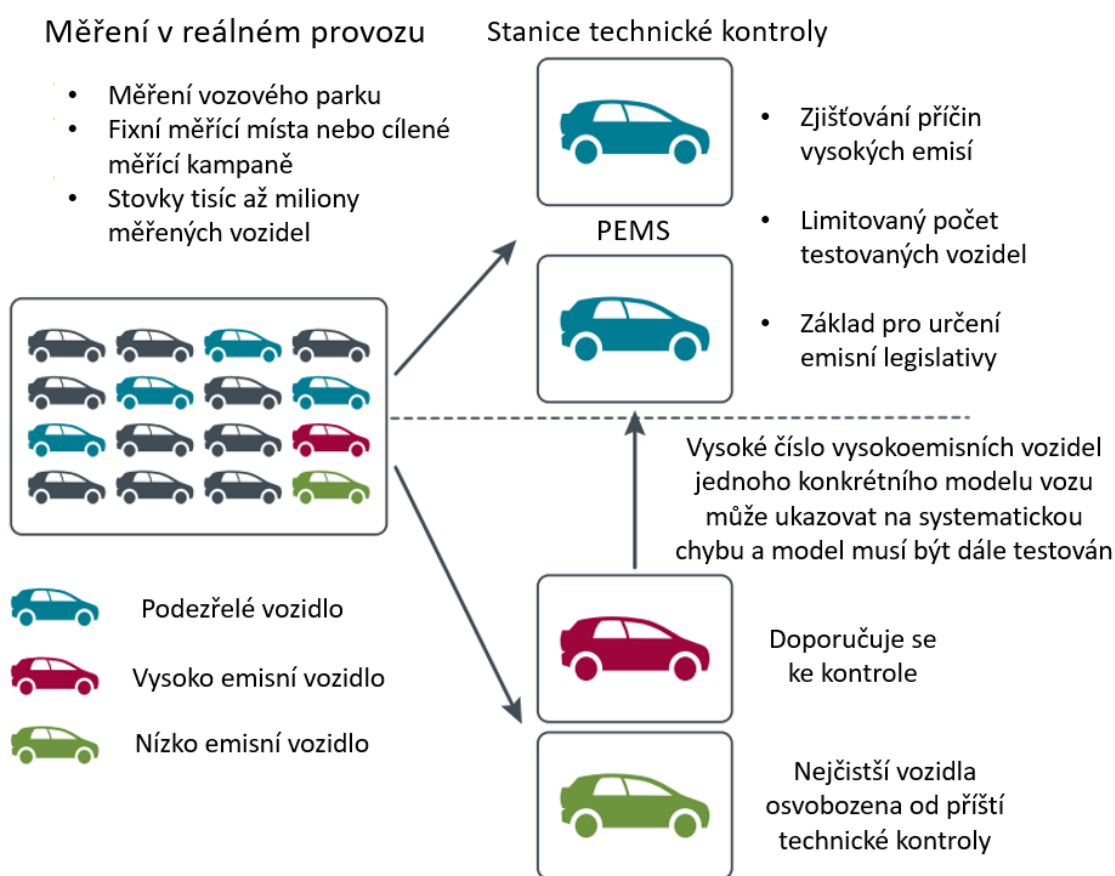
Obr. 15- Proudění vzduchu a spalin za vozidlem [12]

Stacionární měření může být nejlepším řešením pro stanovení podrobných emisních faktorů pro celý vozový park na pomoc místním samosprávám při tvorbě politických rozhodnutí jako jsou opatření omezující některá vozidla. Například nízkoemisní zóny, úplný zákaz vjezdu vozidel nebo programy obnovy vozového parku. Dále může sloužit jako zdroj dat k vývoji systémů omezujících vznik emisí. Vysoký potenciál má tato metoda při identifikaci vozidel s vysokými emisemi, tedy činnost v oblasti dodržování předpisů. Případný zákazník může využít skutečných údajů o emisích, podle kterých se následně může rozhodnout o koupi nového nebo ojetého vozu. Měření může mimo jiné sloužit i k identifikaci vozidel s nízkými emisemi. Tato vozidla by mohla například dostat výjimku z pravidelné technické kontroly a tím by se jim díky dobré kondici vozidla STK odsunula například o další dva roky. Naopak při identifikaci vozidel s vysokými emisemi může sloužit k nařízení dřívější technické kontroly, než je ta pravidelná.

Na Obr. 16 je vidět možné schéma postupu při vyhodnocování jednotlivých vozidel. Jednotlivá naměřená vozidla jsou rozdělena podle naměřených emisí na ty, která jsou v pořádku, na obrázku označena šedou barvou, poté na ty, která jsou podezřelá z vysokých emisí, ta jsou označena modře, dále na vozidla, u kterých se naměří vysoké emise, ta jsou značena červeně, a naposledy ta, kterým jsou naměřeny velmi nízké emise a ta jsou značena



zeleně. Pro šedá vozidla se po měření vůbec nic nemění. Modrá vozidla jsou podrobena bližší kontrole, aby byla zjištěna příčina vyšších emisí. U červených vozidel je vymáhána náprava příčiny vysokých emisí a poté měření na stanici technické kontroly. Naopak u zelených vozidel je tato nejbližší kontrola odložena z důvodu dobrého stavu vozidla. Bylo by ukvapené rozřazovat tato vozidla do jednotlivých skupin na základě jednoho měřeného průjezdu. Proto by se tak stalo až po naměření více průjezdů daného vozidla. Pokud bude v každém z průjezdů mít buď nízké nebo vysoké emise je zařazeno do zelené skupiny, respektive červené. Pokud by byly danému vozidlu jednou naměřeny vysoké a podruhé nízké emise a příště opět vysoké, umístí se vozidlo do skupiny světle modrých vozidel a je podrobena bližší kontrole. [9][10][11][12]



Obr. 16- Schéma možného postupu [9]



### 3 Cíle práce

Cílem práce je analyzovat data z dálkového měření v rámci evropského projektu City Air Remote Emissions Sensing (CARES) a z pilotního experimentu. CARES spolupracuje s městy napříč Evropou na uskutečnění kampaní dálkového měření emisí. Hlavním cílem je demonstrovat inovace hardwaru a softwaru a ilustrovat, jak může dálkové měření emisí pomoci v otázkách kvality a znečištění ovzduší. V rámci tohoto programu vědecké týmy z Evropy a Číny sdílí znalosti a zkušenosti za účelem rozšíření používání dálkového měření emisí. [20] První měření, které proběhlo, byl pilotní experiment, který byl proveden v Praze v prostorech České zemědělské univerzity. Další měření proběhlo na zkušebním okruhu v Lelystadu v Nizozemsku, ze kterého jsou dostupná data pro vyhodnocení. Jednalo se vždy o měření provedené aparaturou odebírající vzorek z blízkosti jízdní dráhy. Snímání probíhalo analyzátory pro měření plynných složek emisí na základě infračerveného spektrometru a dvěma různými klasifikátory částic, jedním na bázi mobility částic v elektrickém poli a druhým byl fotoakustický analyzátor elementárního uhlíku.

Cílem hodnocení dat z pilotního experimentu je určení, potvrzení možného přínosu vzorkování z povrchu blízkosti středu jízdní dráhy oproti vzorkování z okraje vozovky. Cílem zpracování dat z projektu CARES je zhodnotit měření částic dvěma různými klasifikátory částic. Porovnat je mezi sebou na základě spolehlivosti určení znečišťovatelů a rozptylu naměřených hodnot pro průjezdy daného vozidla. Dále vyhodnotit data o koncentraci částic a porovnat je v rámci umístění vzorkovací sondy na okraji jízdní dráhy oproti povrchu blízko jejího středu. Vyhodnocením přínosu jednotlivých velikostních kanálů čítače částic a následným vyřazením kanálů, které se podílejí spíše na šumu, je cíl snížit šum pozadí. Zjištěním maximální délky odezvy na průjezd je cílem určit minimální rozstup vozidel pro co nejmenší ovlivnění průjezdů navzájem. Dále je cílem porovnat vliv jízdních podmínek na zachyt zvýšených koncentrací spalin po průjezdu vozidla. Vzhledem k dostupnosti dat a režimu, jak byla vozidla testována, je cílem porovnat hlavně vliv různé akcelerace na koncentraci částic. Nakonec v rámci diskuze zhodnotit, zda a za jakých podmínek je možné metodou dálkového měření ověřit funkci filtru pevných částic.

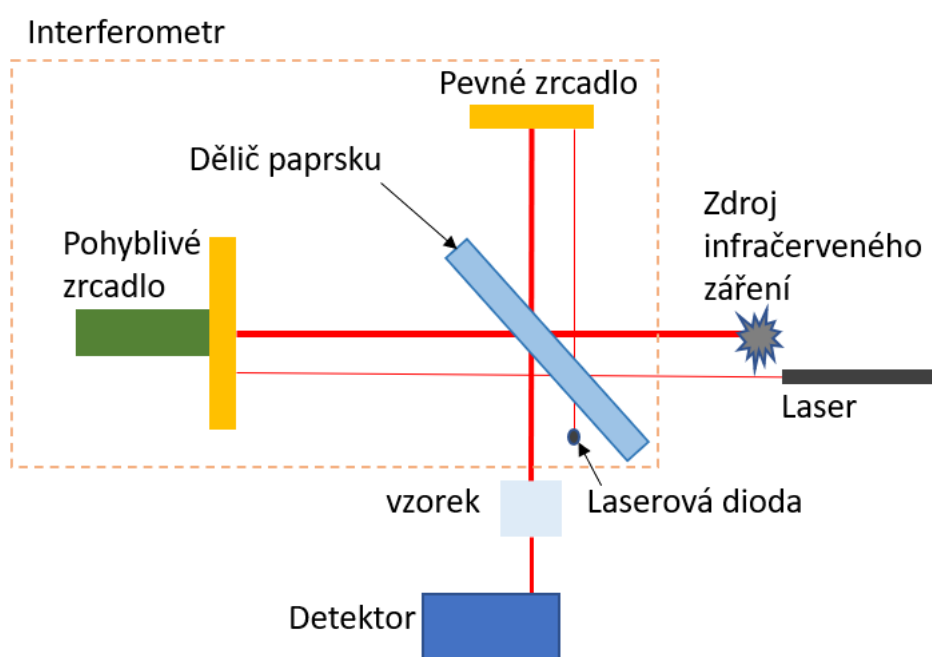


## 4 Měření

### 4.1 Měřicí aparatura

#### 4.1.1 FTIR

FTIR je zkratka pro „Fourier transform infrared“ a je to nejběžnější forma infračerveného spektrometru. Všechny infračervené spektrometrie fungují na principu průchodu infračerveného (IR) záření vzorkem, kde je část záření absorbována. Zaznamenává se záření, které projde vzorkem. Protože různé molekuly s různými strukturami produkují různá spektra, mohou být spektra použita k identifikaci a rozlišení mezi molekulami. Tímto způsobem jsou spektra jako otisky prstů lidí nebo DNA: prakticky jedinečná. Schéma funkce FTIR je zobrazeno na Obr. 17.



Obr. 17- Schéma principu funkce FTIR [14]

FTIR je preferovanou metodou infračervené spektroskopie z několika důvodů. Hlavním důvodem je, že je výrazně rychlejší než starší techniky. FTIR je také mnohem citlivější a přesnější. Tyto výhody FTIR vyplývají z použití interferometru, který rozdělí svazek záření na dva paprsky, každý s jinou délkou optické dráhy, a tyto následně spojí, přičemž dochází k interferenci, která závisí na rozdílu délky optických drah a na vlnové délce. Použití interferometru umožňuje vyšší rychlost vzorkování a využití Fourierovy transformace. Fourierova transformace je matematická funkce, která převádí naměřený signál z časové do frekvenční domény. Výstupem interferometru je graf známý jako „interferogram“, ten však pro vyhodnocení není vhodný. Fourierova transformace tedy převádí interferogram na infračervené spektrum, které je známé a používané. [13]



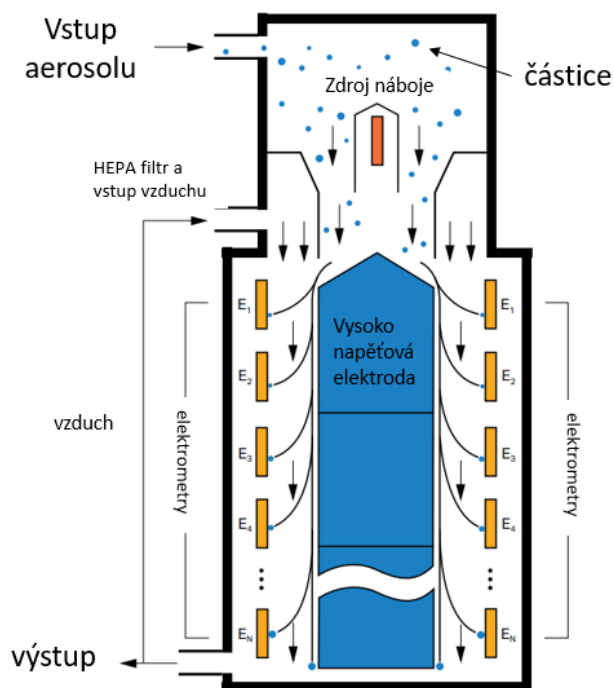
Ve zpracovávaných datech z této práce se FTIR používá pro zjištění koncentrace plynných látek a to  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  a  $\text{NO}$ . Výhodou může být, že nijak neznehodnocuje vzorek. Podoba samotného analyzátoru je vidět na Obr. 18.



Obr. 18- FTIR [15]

#### 4.1.2 EEPS

Engine exhaust particle sizer spectrometer je název přístroje, který je používán pro měření částic ze spalin spalovacích motorů. Ve vzorkovací frekvenci 10 Hz čítá částice ve 32 kanálech rozdělených logaritmicky podle průměru částice od 5,6 nm do 560 nm. Je považován za rychle snímající přístroj s vysokým rozlišením i pro nízké koncentrace částic.

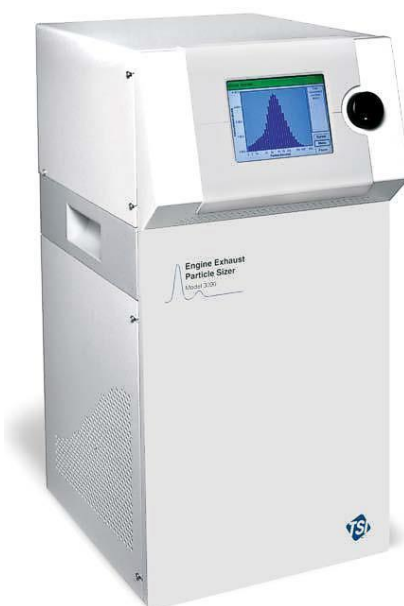


Obr. 19- Schéma principu funkce [16]



Jedná se o přístroj na bázi pohybu částic v elektrickém poli. Výfukové plyny jsou přiváděny do přístroje, kde se částice nejprve kladně nabijí pomocí koronové nabíječky. Nabité částice poté putují do měřicí části vysokonapěťových elektrod, kam jsou unášeny proudícím filtrovaným venkovním vzduchem. Tam na kladně nabitě částice začíná působit elektrostatická síla, která je odpuzuje od střední elektrody směrem k elektrometrům. V závislosti na hmotnosti jednotlivých částic, a tedy i velikosti částic mají částice rozdílnou hybnost. Na hybnosti jednotlivých částic závisí, na kterou z elektrod narazí a předají jí svůj náboj. Menší částice narazí na jedny z prvních elektrod. Na Obr. 19 je vidět, že čím větší částice je unášena tím dále doletí v proudu vzduchu, než ulpí na elektrometru. Elektrometr poté změří přírůstek náboje a podle toho zjistí kolik částic na něj zrovna dopadlo. Elektrometry se používají pro vysokou citlivost a pro kontinuální měření velikosti částic.

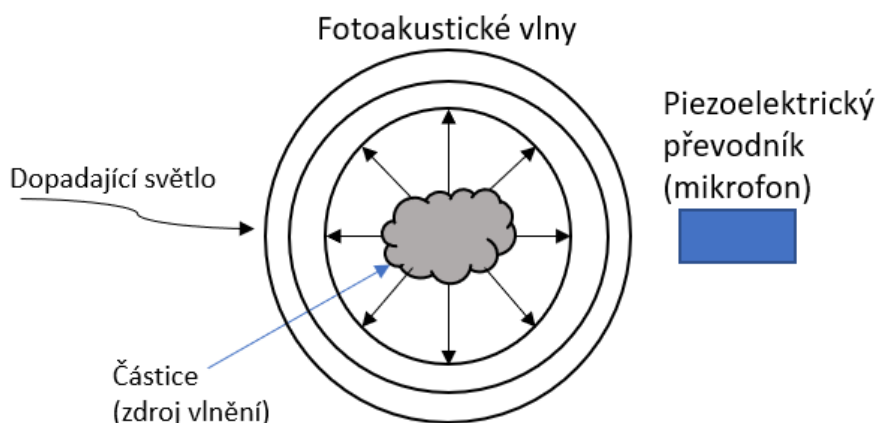
V námi zpracovávaných datech se používal konkrétně model Engine Exhaust Particle Sizer™ (EEPS™) Spectrometer model 3090, který je na Obr. 20. Přístroj je kompaktní vážící 32 kg s vlastním displejem, kde je možné vidět přímo náhled měřených dat pro lepší orientaci v měření. [16]



Obr. 20- EEPS [17]

### 4.1.3 MSS<sup>plus</sup>

AVL Micro Soot Sensor<sup>plus</sup> je celý název pro analyzátor spalin, který měří přímo pouze saze tedy pevný uhlík bez výrazné citlivosti na další složky spalin. Funguje na principu fotoakustického jevu. Měřený vzorek je při průchodu tímto analyzátozem vystaven záření, které absorbují pevné částice. Ty jsou poté tímto zářením periodicky zahřívány a ochlazovány, což způsobuje jejich rozpínání a smršťování. Tímto chováním částice působí na okolní vzduch, kde vytváří akustické vlny, ty jsou poté zaznamenávány mikrofony. Na



Obr. 21- Schéma principu funkce MSS [18]

Obr. 21 je vidět schéma principu funkce MSS. Na základě těchto zvukových záznamů přístroj určí aktuální množství sazí v daném časovém okamžiku. Přístroj je přenosný kompaktní vážící okolo 20 kg a konkrétní podoba je vidět na Obr. 22. [19]



Obr. 22-MSS<sup>plus</sup> [19]

## 4.2 Pilotní měření

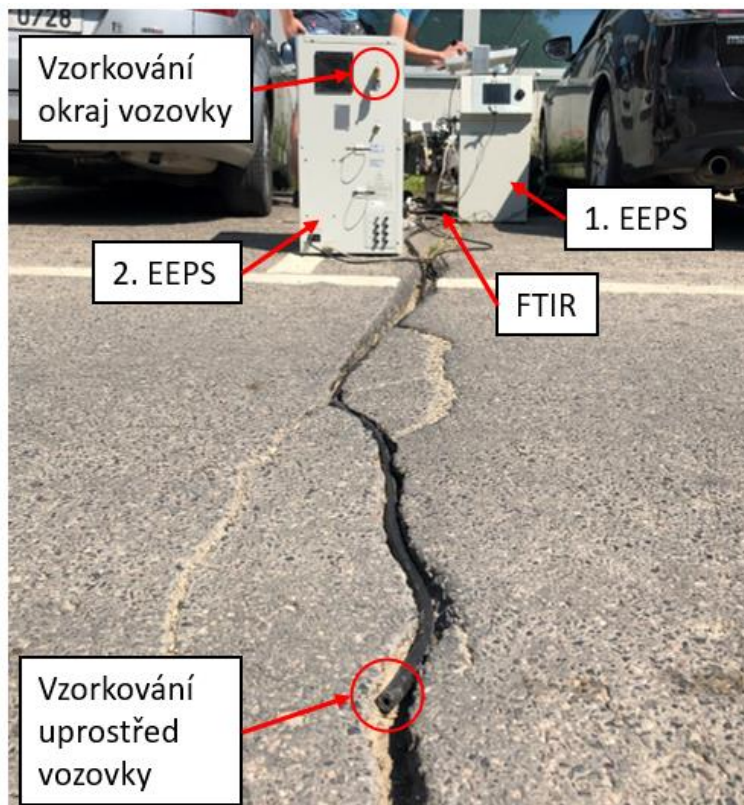
Dne 8. června 2021 proběhlo v areálu České zemědělské univerzity (CZU) pilotní měření emisí. Cílem tohoto měření bylo zjištění možných výhod vzorkování z jízdního pruhu oproti vzorkování z okraje vozovky. Měření probíhalo na volně přístupné komunikaci, kde projížděla různá vozidla od lehkých osobních vozidel přes těžká nákladní. Byly použity 3 přístroje, dva čítače částic EEPs a jeden infračervený spektrometr FTIR na měření plynných složek emisí. Jednalo se pouze o pilotní experiment, tak neprobíhalo žádné čítání ani identifikace projíždějících vozidel. Přístroje EEPs vzorkovaly frekvencí 10 Hz tedy desetkrát





za sekundu a FTIR vzorkovalo frekvencí 5 Hz. Analyzátoři EEPS čítaly částice jednotlivě na základě velikosti v rozmezí od 6,04 nm do 523,3 nm, výstupem bylo vždy počet částic na jeden centimetr krychlový tedy PN (Particulate number)[#/cm<sup>3</sup>]. Pomocí analyzátoru FTIR byly snímány koncentrace plyných složek amoniaku NH<sub>3</sub>, oxidu uhličitého CO<sub>2</sub>, oxidu uhelnatého CO a oxidu dusnatého NO. Výstupem z FTIR byly hodnoty udávané v ppm zkratka z anglického parts per million a jedná se o výraz pro miliontinu z daného celku.

Samotný pilotní experiment byl rozložený na dvě části. Každá z nich trvala cca 30 minut. Jak již bylo zmíněno vzorkování probíhalo ze dvou odběrných míst současně. V první části



Obr. 23- Rozložení aparatury pilotního experimentu

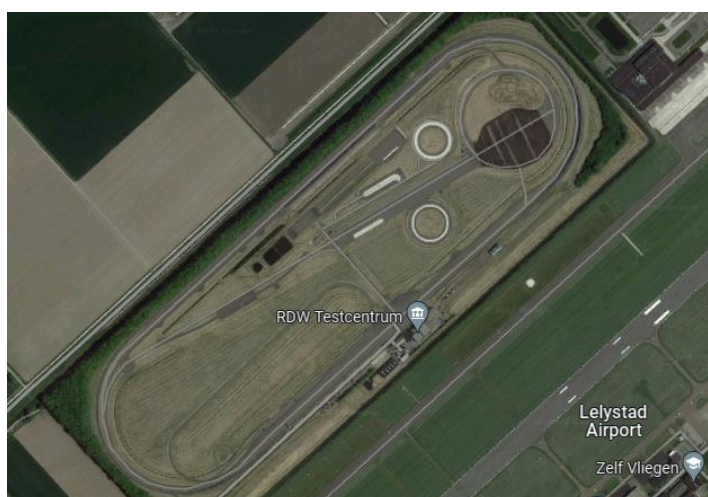
měření byl první přístroj EEPS a FTIR připojeny na společnou sběrnou trubici, která byla umístěna uprostřed jízdního pruhu. Pro umístění trubice bylo vhodně využito praskliny ve vozovce, aby nedošlo ke zbytečnému přejíždění trubice a jejímu deformování, trubici nebylo potřeba již dodatečně připevňovat k vozovce. Konkrétní umístění je vidět na Obr. 23.

Druhé zařízení EEPS vzorkuje z okraje jízdního pruhu. Po první části měření se zařízení FTIR přepojilo na jinou trubici, která se připevnila k místu odkud vzorkovalo druhé EEPS tedy k okraji vozovky. První EEPS v druhé části měření opět odebírá vzorky uprostřed jízdního pruhu. Po cca 30 minutách měření druhé části byl experiment ukončen.



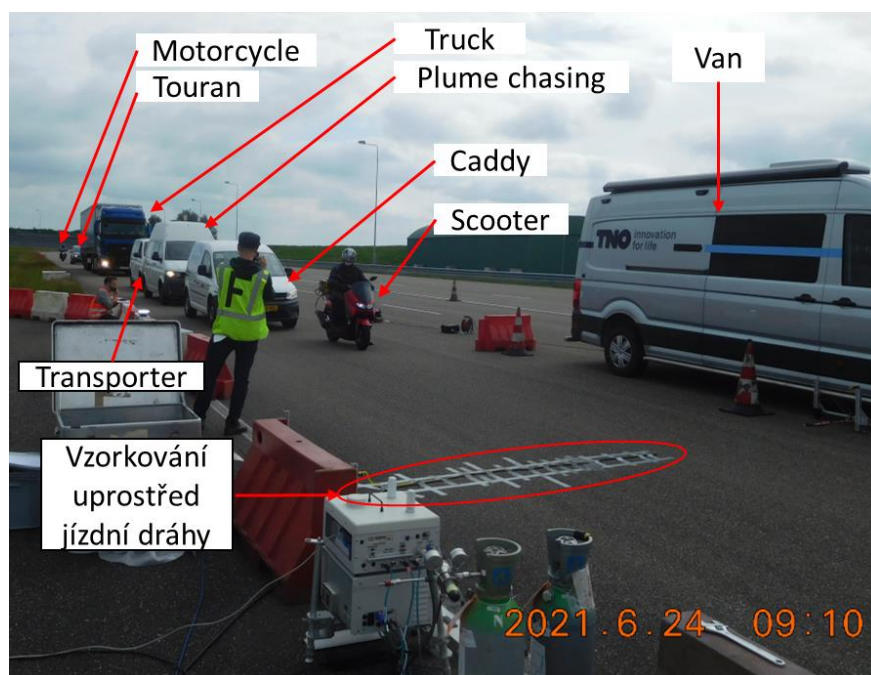
### 4.3 Lelystad Nizozemsko

V rámci projektu CARES se uskutečnilo měření emisí v Lelystadu v Nizozemsku. Samotné měření probíhalo od 22. 6.2021 do 25.6.2021 na testovacím okruhu blízko letiště u Lelystadu, které je vidět na Obr. 24. Testovací okruh byl vybrán pro co největší možnou opakovatelnost měření. Testovací okruh byl uzavřený a neumožňoval provoz jiných než testovaných vozidel. Vozidla projížděla místem měření podle přesně naplánovaného harmonogramu. Průjezdy byly rozděleny do několika sekcí podle jízdního režimu (rychlost a zrychlení), rozstupů a pořadí průjezdu vozidel.



Obr. 24- Testovací okruh Lelystad [21]

Měření se účastnilo 6 různých vozidel. První v řadě na Obr. 25 stojí vozidlo, které je v datech označováno jako Scooter tedy česky skútr značky Yamaha NMAX, další stojí připravené vozidlo Volkswagen Caddy v datech Caddy, za ním stálo vozidlo, které snímalo



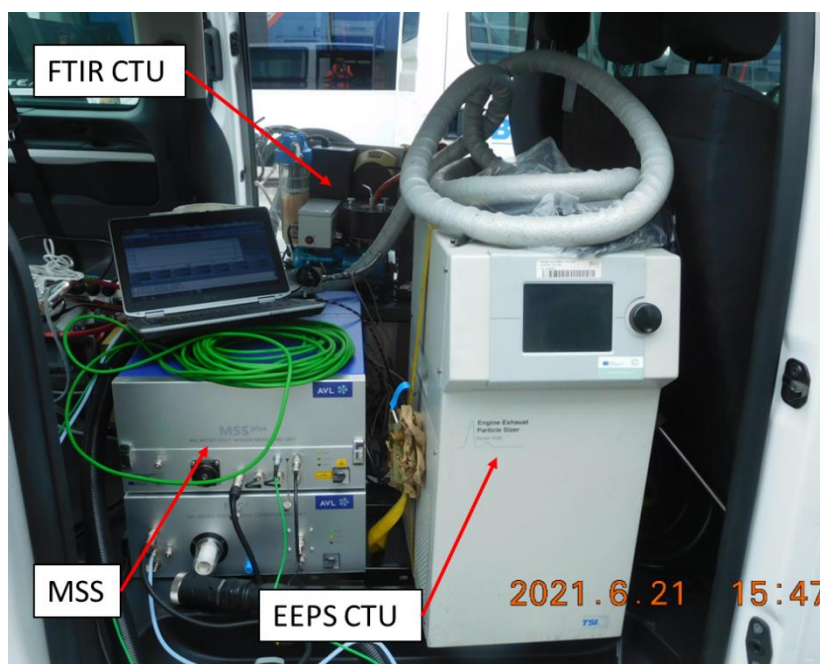
Obr. 25- Testovací vozidla a umístění analyzátorů



plume chasing metodou vozidlo Caddy v průběhu měření se pořadí měnilo, za ním stál Volkswagen Transporter v datech označovaný jako Transporter, dále za ním stál Truck což bylo označení pro nákladní vozidlo s návěsem Ford F-MAX, dále v řadě vozidel stál Volkswagen Touran se zážehovým motorem 1.6 TSI v datech označovaný jako Touran a poslední stál připravený motocykl Yamaha MT-07 v datech označený jako Motorcycle.

Během experimentu byla prováděna měření aparaturami umístěnými na měřených vozidlech, ve vozidlech jedoucích v závěsu za měřenými vozidly, a stacionárně podél jízdní dráhy. V této diplomové práci jsou analyzována data z aparatury ČVUT (EEPS, FTIR, MSS) a ČZU (EEPS, FTIR). Aparatura ČZU byla umístěna v dodávce TNO a vzorkovala z okraje jízdní dráhy, aparatura ČVUT v dodávce ČVUT a odebírala vzorek z povrchu jízdní dráhy přibližně v jejím středu.

Na Obr. 26 je umístění přístrojů v dodávce ČVUT anglicky označované zkratkou CTU. Tyto přístroje vzorkovaly ze středu jízdní dráhy. Na Obr. 26 je vidět EEPS CTU analyzátor, který čítal částice podle velikosti vzorkovací frekvencí 10 Hz. Přístroj FTIR CTU měřil koncentrace  $\text{CO}_2$ , CO a NO v ppm vzorkovací frekvencí od 0,3 až 0,9 s na jeden vzorek. Poslední přístroj v dodávce byl MSS, který měřil hmotnostní koncentraci sazí vzorkovací frekvencí 10 Hz. Dále na Obr. 25 je označené místo jako vzorkování uprostřed vozovky. Na Obr. 25 je také



Obr. 26- Umístění přístrojů v dodávce ČVUT

označena dodávka Van, kde byl umístěn FTIR CZU, který vzorkoval frekvencí 5 Hz. Snímal stejně jako FTIR CTU koncentrace  $\text{CO}_2$ , CO a NO v ppm. Dále vzorky z okraje vozovky snímal EEPS van. To stejně jako EEPS CTU čítal částice podle velikosti vzorkovací frekvencí 10 Hz.



#### 4.4 Krakov Polsko

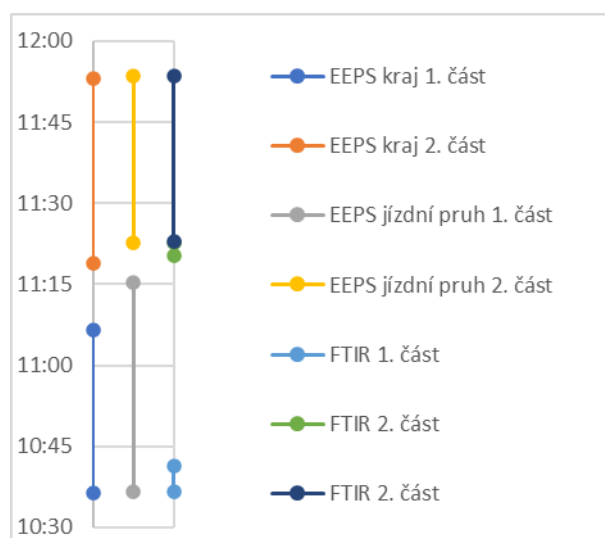
V rámci projektu CARES proběhlo také měření v Polsku v Krakově. Na rozdíl od měření v Nizozemsku, kde bylo měření na testovacím okruhu, zde byl snímán přímo v ulicích reálný provoz. Měření probíhalo před budovou stavební fakulty Krakovské polytechniky na ulici Warszawska v pruhu pro jižní směr. Data z tohoto měření nejsou v rámci diplomové práce zpracována ani popsána.



## 5 Zpracování dat

### 5.1 Pilotní experiment

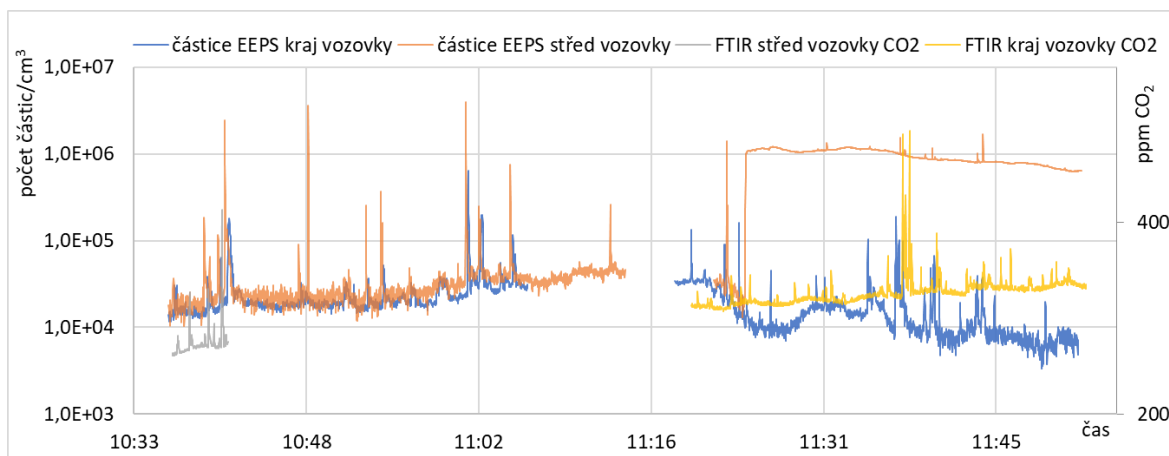
Data z pilotního experimentu byla jednotlivě exportována do softwaru Microsoft Excel, kde se s nimi dále pracovalo. Z EEPS, které měřilo z okraje vozovky, byl získán kontinuální záznam dat od 10:36:10 do 11:06:09, tedy bez jedné sekundy 30 minut naměřených dat v první části měření. V druhé části měření se z tohoto EEPS získal záznam od 11:18:33 do 11:52:38, byl k dispozici tedy záznam dlouhý 34 minut a 5 sekund dat. Z EEPS, které měřilo z povrchu blízko středu vozovky, se podařilo zaznamenat v první části souvislý záznam dat od 10:36:32 do 11:15:00, jedná se tedy o 38 minutový 28 sekundový záznam. V druhé části měření se naměřila kontinuálně data od 11:22:17 do 11:53:05, k dispozici byl tedy záznam dlouhý 30 minut a 48 sekund. FTIR které vzorkovalo v první části z povrchu blízko středu jízdního pruhu naměřilo kontinuální hodnoty od 10:36:30 do 10:41:16 jedná se tedy pouze o 4 minuty a 46 sekund záznamu. V druhé části, kde FTIR vzorkovalo z okraje vozovky byl k dispozici naměřená kontinuální záznam dat od 11:20:06 do 11:22:24 a dále pak od 11:22:30 do 11:53:04 dohromady tedy z druhé části měření záznam z FTIR o délce 32 minut a 52 sekund. Pro lepší přehlednost jsou časy záznamů vyneseny do Obr. 27.



Obr. 27- Časy záznamu dat z pilotního experimentu

Data byla poté vložena do jednoho souboru Excelu a provedena časová synchronizace. Synchronizace byla provedena přičítáním časového kroku k datům naměřených z jednoho přístroje. Tím se posouvala data v rámci časové osy vůči sobě až do té doby, než píky jednotlivých průjezdů si uspokojivě odpovídaly časově.

Na Obr. 28 je ukázka všech dat z pilotního experimentu v logaritmickém měřítku. Již na první pohled je zřejmé, že data z EEPS ze středu jízdní dráhy z druhé části měření od 11:24



Obr. 28- Ukázka dat naměřených z pilotního experimentu

nebudou odrážet skutečnost a nejspíše nebude možné je pro vyhodnocení použít. Pro účely vyhodnocení bylo dále pracováno již pouze s daty z první části měření a pouze s daty z jednotlivých EEPS v časovém rozmezí od 10:36:32 do 11:06:09, protože se zdá, že data mohou odpovídat realitě a zároveň je to časový úsek, kdy měřily oba přístroje současně.

## 5.2 Lelystad Nizozemsko

Obdobně jako s daty z pilotního experimentu bylo nakládáno i s daty z měření v Lelystadu. Nejprve byla data z dvou EEPS, dvou FTIR a jednoho MSS přenesena do Excelu a rozdělena do souborů po jednotlivých dnech. Z důvodu množství naměřených dat a omezení počtu řádků v Excelu na 65536 byla ještě data v souborech jednotlivých dní rozdělena úseky dat, podle toho, jak to dovolilo množství řádků, do jednotlivých listů. Společně s daty z naměřených přístrojů byla k dispozici ještě data s informacemi o průjezdech jednotlivých vozidel. „3, Caddy, 22.06.2021 9:51, 3a, constant speed, 9:51:17, C“ je příklad označení jednotlivých průjezdů. Tento záznam nám říká, že se jedná o celkově 3. průjezd, že se jedná o vozidlo Caddy, které projelo místem měření 22.6.2021 v 9:51 místního času, jednalo se o úsek měření označený 3a, vozidlo jelo konstantní rychlostí, přesnější čas průjezdu byl 9:51:17 a vozidlo Caddy je označováno písmenem C. Dále byla k dispozici data blíže popisující měřené úseky jako bylo například 3a. V dalším souboru byly popsány jednotlivé měřené úseky. Úsek pod označením 3a znamenal, že trval od 7:51 do 8:06 22.6., že vozidla projížděla ustálenou rychlostí v pořadí Scooter, Motorcycle, Caddy, Transporter a poslední jel Truck. Místem měření projížděly rychlostí 30 km/h a zbytkem okruhu rychlostí 80 km/h. V tomto úseku jela vozidla 7 kol a dohromady za tento úsek ujela 19,6 km plánované rozestupy mezi vozidly byly 20 sekund, dále pak soubor obsahoval informace o umístění měřící sondy a pozici vozidla v koloně, které měřilo metodou plume chasing.

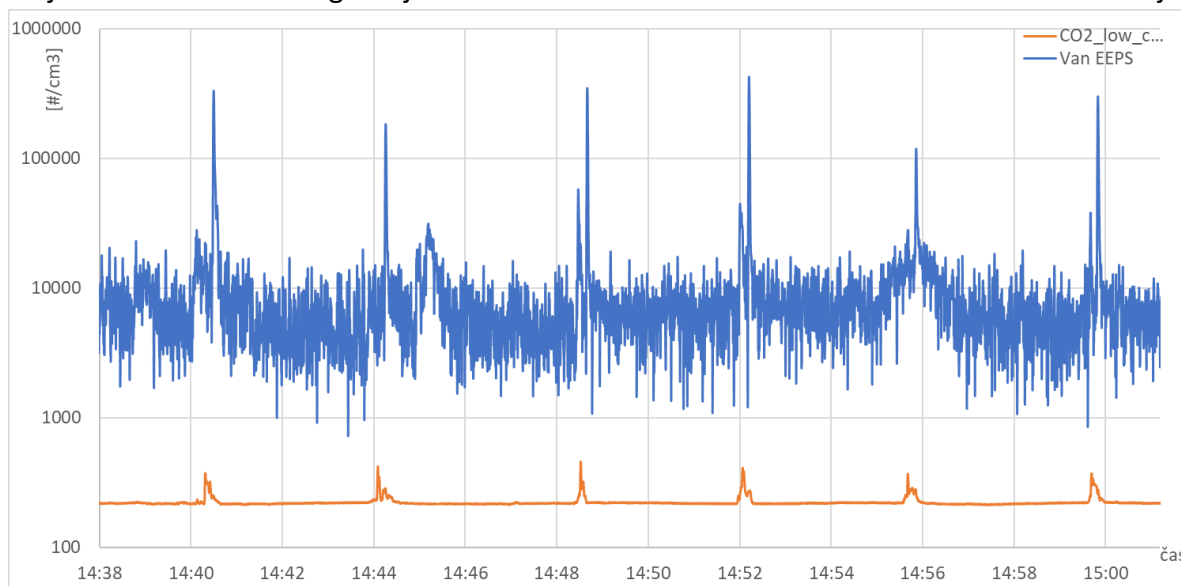
### 5.2.1 Selektce kanálů EEPS

Jak již bylo nastíněno v odstavci 4.1.2 EEPS čítá částice na základě 32 velikostí. Vznikne tedy každou desetinu sekundy záznam o koncentraci částic o průměru 6,04, 6,98, 8,06, 9,31,



10,8, 12,4, 14,3, 16,5, 19,1, 22,1, 25,5, 29,4, 34, 39,2, 45,3, 52,3, 60,4, 69,8, 80,6, 93,1, 107,5, 124,1, 143,3, 165,5, 191,1, 220,7, 254,8, 294,3, 339,8, 392,4, 453,2, 523,3 vše v nanometrech. Bylo by vhodné zjistit, jaké velikosti částic, tedy které měřicí kanály, zachycují průjezd vozidla, a které tvoří pouze šum pozadí.

Pro prvotní zorientování se v dané problematice, byla vytvořena prezentace v softwaru Powerpoint, kde na každém slidu byl graf stejného úseku naměřených dat. Byl zde předpoklad, že malé částice budou tvořit spíše šum pozadí. Proto na prvním slidu byla data, kde byla suma částic všech velikostí, na dalším slidu již byla suma částic bez částic o velikosti 6,04 nm, na dalším slidu byla opět odebrána další data odpovídající velikosti částic 6,98 nm a tak to se postupně odebírala další data pro všechny velikosti částic, až zbyla jedna velikost částic a to 523,3 nm. Vznikl tedy soubor, kde bylo vidět postupným přechodem mezi slidy, jak se mění graf v závislosti na odebraných kanálech velikostí částic. Na Obr. 29 je úsek dat z měření 24.6.2021 od 14:38 do 15:01. Modře je zobrazena koncentrace částic naměřená z okraje vozovky a oranžově je znázorněna hodnota naměřeného CO<sub>2</sub> v ppm z FTIR ze stejného místa. V tomto grafu je zobrazena suma kanálů všech velikostí. Touto metodou je

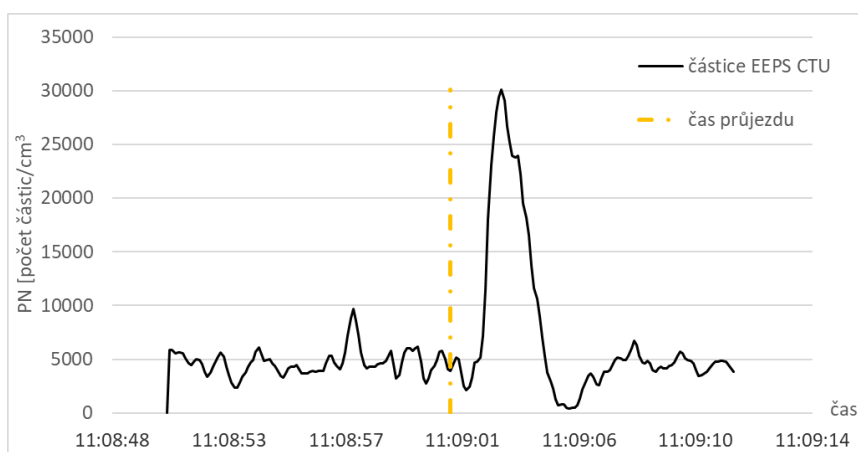


Obr. 29- Ukázka ze selekce kanálů EEPS

sice možné odhadnout, které velikostní kanály je vhodné pro měření sledovat, ale lepší by bylo tento odhad nějakým způsobem kvantifikovat. Proto bylo nutné data dále zpracovat. Kvůli úspoře času a zjednodušení práce s jednotlivými průjezdy vozidel a vykreslení naměřených emisí, bylo do všech souborů s daty implementováno automatické vykreslování grafů pro jednotlivé průjezdy. V ideálním případě stačí zadat číslo průjezdu daného vozidla a nechat soubor přepočítat data a vykreslí se příslušné grafy dat odpovídající danému průjezdu. Celý mechanismus vykreslení funguje tak, že po zadání čísla průjezdu vyhledá excel řádek se zápisem označení daného průjezdu. Z označení vykopíruje čas průjezdu, který následně vyhledá v naměřených datech. Vytvoří časové okno před a za



daným průjezdem obvykle 8 sekund na každou stranu. Z tohoto časového okna vybere odpovídající data a kopíruje je na místo, kde je označená oblast jako zdroj dat pro graf. Ukázkou tohoto zjednodušení je Obr. 30, kde jsou naměřené koncentrace částic z EEPS CTU v grafu označené černě. Čerchovaně žlutě je zde vyznačen i čas průjezdu vozidla, který tvoří střed grafu od, kterého jsou vynesena data v délce 8 sekund na každou stranu. Je zde pík koncentrace částic o hodnotě 30 tis. částic na  $\text{cm}^3$ , pravděpodobně od průjezdu vozidla Truck. Stejným postupem se vykreslí grafy pro data z ostatních přístrojů. Tyto grafy slouží hlavně k vizuální kontrole dat a k nastavení mechanismů, kterými budou následně data zpracována.



Obr. 30- Ukázka vytvořeného grafu pro průjezd „23.06.2021, 21, 11:09:01, veh: T, 8a“

Pro kvantifikaci toho, jak moc ovlivňují částice jednotlivých velikostí šum, byl zvolen výpočet poměru píku vůči šumu. Byly zvoleny průjezdy dvou vozidel Truck a Touran, z důvodu vysokého zachytu částic po jejich průjezdu. Pro každý vůz byly zpracovány 3 průjezdy. U každého grafu průjezdu byla nejprve vybrána oblast mimo nárůst koncentrace vlivem průjezdu. Z této oblasti mimo průjezd byla vypočítána směrodatná odchylka dat pro určení hodnoty šumu. Směrodatná odchylka se rovná druhé odmocnině rozptylu, určuje tedy, jak moc jsou naměřené hodnoty odchýleny od průměru hodnot. Zároveň z této oblasti byla vypočtena průměrná hodnota pozadové koncentrace částic. Z celého časového okna tohoto průjezdu byla nalezena maximální hodnota koncentrace částic, která byla označena jako pík. Takto nastaveným výpočtem byl spočítán výsledný poměr signál ku šumu ( $S/N$ , signal/noise), který se počítal pomocí vztahu (3).

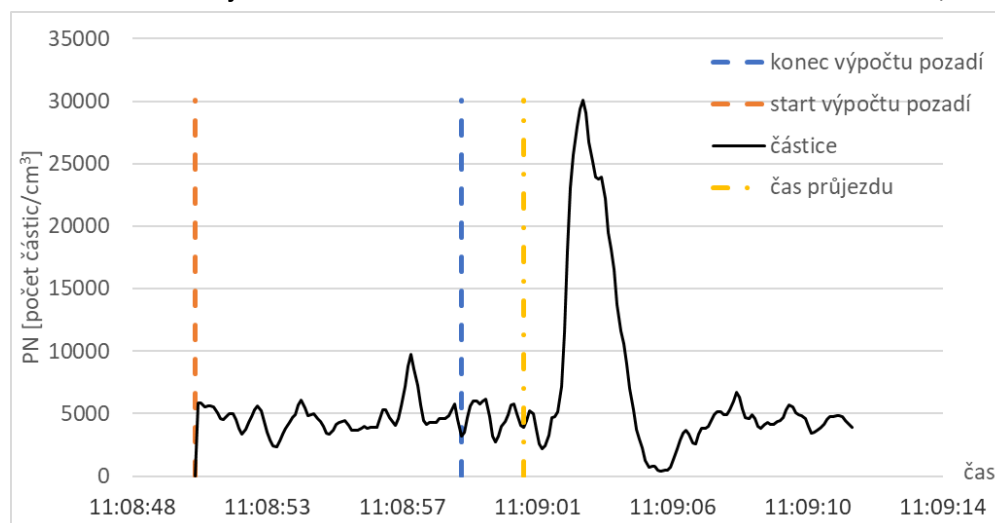
$$\text{výsledný poměr } S/N = \frac{\text{pík} - \text{pozadí}}{3 \cdot \text{směrodatná odchylka}} \quad (3)$$

Od píku se odečítá průměrná hodnota pozadí, aby se hodnota pozadí nepromítla do výsledného poměru. Následně se tento pík očištěný od pozadí vydělí trojnásobkem směrodatné odchylky. Trojnásobek směrodatné odchylky se obecně považuje za mez





detekce, tedy jako minimální hodnotu koncentrace, od které je možné odvodit průjezd vozidla. Obr. 31 ukazuje oblast mezi oranžovou a modrou čárkovanou čarou, ze které se



Obr. 31- Ukázka oblasti pro výpočet pozadí selekce kanálů EEPS

následně vypočítává směrodatná odchylka a průměrná hodnota pozadí před průjezdem vozidla. Výsledkem by tedy měl být poměr píku vůči šumu a je předpoklad, že pokud se kanál dané velikosti podílí více na píku a méně na šumu bude poměr vyšší, než když se daný kanál podílí spíše na šumu. Daný poměr byl spočítán zvlášť pro každou z velikostí částic a následně byl vynesena do grafu.

### 5.2.2 Mez detekce

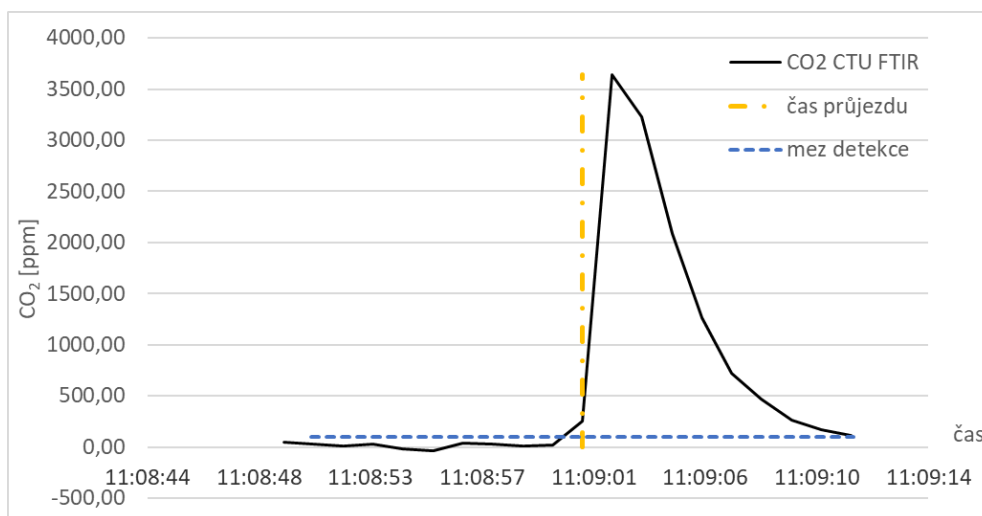
Pro identifikaci průjezdu v naměřených datech se určuje mez detekce. Jedná se o koncentraci, pro kterou je analytický signál statisticky významně odlišný od šumu. Mez detekce je trojnásobek směrodatné odchylky určené z místa, kde s jistotou není zaznamenán průjezd. Mez detekce na základě výpočtů směrodatných odchylek stanovena u FTIR CZU na hodnotu 230 ppm, u FTIR CTU na hodnotu 100 ppm, u EEPS CTU a EEPS CZU na 10 000 částic na  $\text{cm}^3$  a pro MSS je 10 000  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Běžná koncentrace  $\text{CO}_2$  ve vzduchu je cca 400 ppm, FTIR CZU vykazuje požadové hodnoty  $\text{CO}_2$  mírně nad 200 ppm.

### 5.2.3 Délka odezvy na průjezd

Délkou odezvy na průjezd vozidla je míněna doba, po kterou analyzátory zaznamenávají zvýšené koncentrace látek nad mez detekce. Tento údaj vypovídá o tom, jakou dobu ovlivňuje průjezd jednoho vozidla naměřené koncentrace. V případě, že budou dvě po sobě jedoucí vozidla mít mezi sebou větší rozestup, než je délka zmíněné odezvy, předpokládá se, že naměřená data nebudou navzájem ovlivněna.

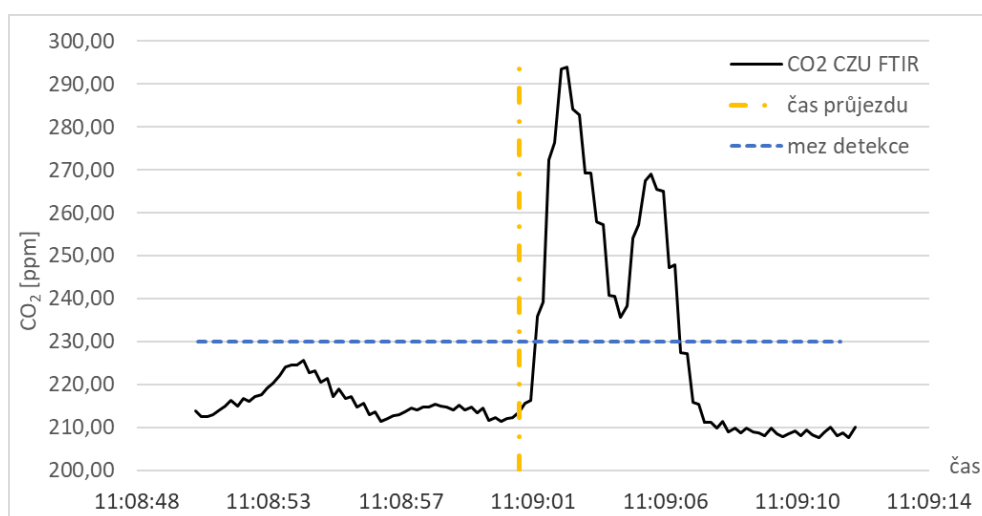


Data byla zpracována podobně jako v případě selekce kanálů EEPS. Opět bylo využito funkce, kde po zadání čísla průjezdu se vykreslí grafy příslušného časového okna daného průjezdu. Pro toto zpracování dat, bylo potřeba, aby jednotlivé průjezdy byly rozlišitelné navzájem, a aby se navzájem neovlivňovaly. Proto byla vybrána data z 23.06. od 10:58 do 11:50. Průjezdy jednotlivých vozidel zde byly plánovány s rozestupy 30 sekund. Vzhledem k prvním výsledkům délky odezvy se to zdálo býti dostačující. Vyhodnocovala se data ze dvou přístrojů FTIR CTU a FTIR CZU, kde CTU vzorkovalo ze středu jízdní dráhy a CZU z okraje jízdní dráhy a jednoho EEPS CTU, které vzorkovalo ze středu jízdní dráhy. Data z EEPS Van bohužel pro tento den nebyla dostupná. Zjišťování samotné délky odezvy probíhalo manuálním odečítáním hodnot z grafu.



Obr. 32- Ukázka odečítání délky odezvy na průjezd FTIR CTU

Ukázka odečítání je vidět na Obr. 32, kde je vidět čárkovaně modře vyznačená mez detekce 100 ppm pro CTU FTIR. Jedná se opět o průjezd vozidla Truck 23.6. v 11:09:01. V místech, kde se protíná mez detekce a naměřená koncentrace CO<sub>2</sub>, byl odečten čas v tomto případě trvala odezva od 11:09:00 do 11:09:10 tedy 10 sekund.

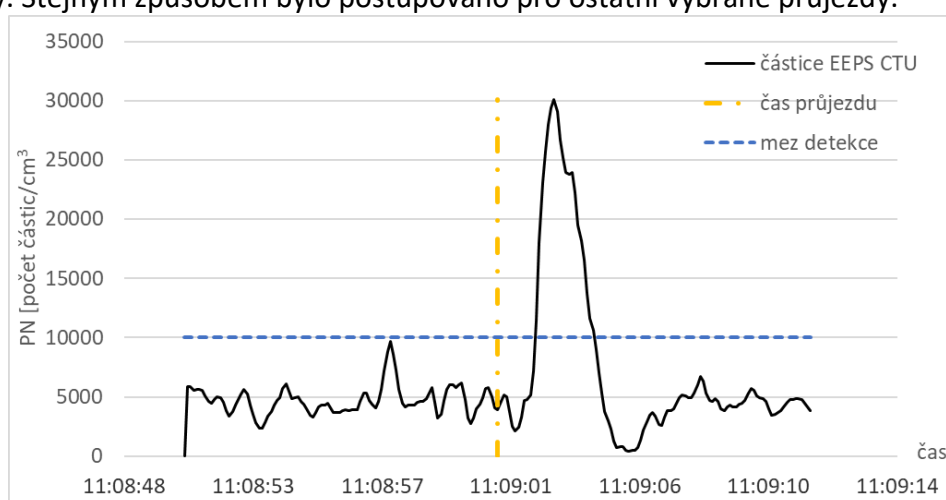


Obr. 33- Ukázka odečítání délky odezvy na průjezd FTIR CZU



Dále se vygeneruje Obr. 33, který zobrazuje stejný průjezd, avšak CO<sub>2</sub> je měřeno přístrojem FTIR CZU. Mez detekce je zde 230 ppm. Zde je vidět, že není pík tak vysoký jako v případě záchytu FTIR CTU, a navíc se zobrazuje v podobě dvou vrcholů. Žádný jiný průjezd v datech na tento čas zapsán není, je tedy předpoklad, že pochází rovněž od vozidla Truck. V tomto případě je délka odezvy 5 sekund.

Na Obr. 34 je vidět poslední ukázka z vygenerovaných grafů pro daný průjezd vozidla Truck. Jedná se o záznam koncentrace částic z EEPS CTU, kde je opět čárkovaně modře označena mez detekce 10 000 částic na cm<sup>3</sup>. V čase 11:08:57 se jeden z píků pravděpodobně šumu téměř dotkl meze detekce. Mezi délkou odezvy není počítán, neboť byl před zaznamenaným průjezdem a nepřevyšuje mez detekce, tak aby byl měřitelný. Délka odezvy je tedy 2 sekundy. Stejným způsobem bylo postupováno pro ostatní vybrané průjezdy.



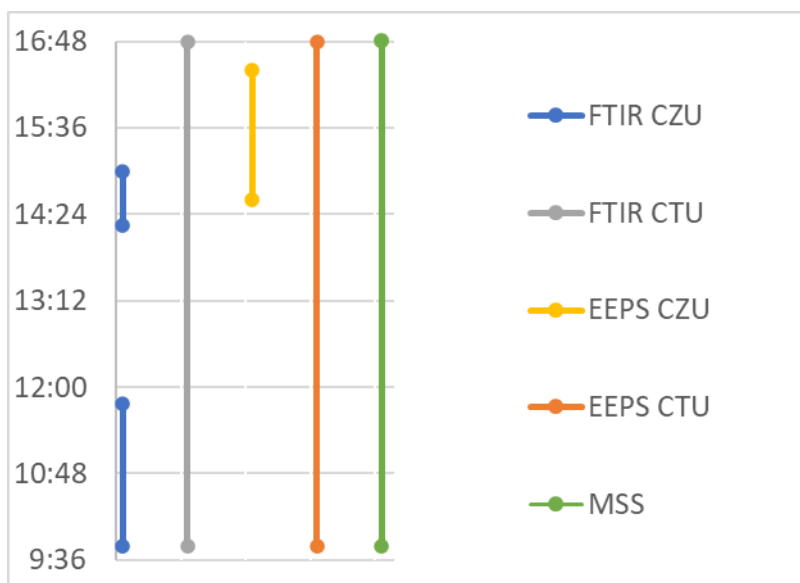
Obr. 34- Ukázka odečítání délky odezvy na průjezd EEPS CTU

#### 5.2.4 Porovnání místa vzorkování

Pro zjištění závislosti místa vzorkování a koncentrace naměřených emisí byl využit stejný postup jako u předchozího vyhodnocení délky odezvy na průjezd. Pro výpočet a záznam jednotlivých výsledků bylo využito v softwaru excel makra, které výrazně zrychlilo a automatizovalo výpočty jednotlivých průjezdů. Do kódu makra byla zadána informace o tom, z jakého sešitu mají být průjezdy spočítány a rozmezí průjezdů, které mělo vypočítat. Po spuštění, makro zadalo číslo průjezdu do buňky odkud všechny ostatní výpočty získávaly informace o tom, o jaký průjezd se jedná a podle toho se vypočítaly výsledky pro daný průjezd, které se zobrazily v jiném listu. Výsledky následně makro zkopírovalo do dalšího listu a do buňky pro výběr vozidla zapsalo následující číslo průjezdu a celý proces zopakovalo. Takto makro pokračovalo až vznikl záznam výsledků jednotlivých průjezdů. Tímto způsobem byla předzpracována všechna data o průjezdech z 24.6.2021. Pro každý z průjezdů byly zaznamenány píkové koncentrace dostupných analyzátorů. Bohužel se nepodařilo naměřit celý den všemi analyzátoři. Záznam z celého měření 24.6. je pouze z analyzátorů FTIR CTU, EEPS CTU a MSS, které vzorkovaly ze středu jízdní dráhy. FTIR van



vzorkovalo pouze do 15:00 a EEPS van vzorkovalo od 14:36. Všechny přístroje tedy vzorkovaly současně 24 minut. Na Obr. 35 jsou vidět graficky znázorněné časy záznamů jednotlivých přístrojů.



Obr. 35- Záznam analyzátorů 24.6.2021

Výpočty velikosti píků byly určovány v časovém okně o velikosti 4 sekundy, proto u některých průjezdů se stalo, že byl vyhodnocen jeden pík pro více průjezdů. Kvůli tomu bylo nutné ještě všechna data manuálně zkontrolovat a přiřadit správné píky daným průjezdům. Dále bylo vytvořeno grafické znázornění píků jednotlivých průjezdů v závislosti na vozidle a analyzátoru, tedy i místě vzorkování.

#### 5.2.5 Porovnání EEPS a MSS a různých zrychlení

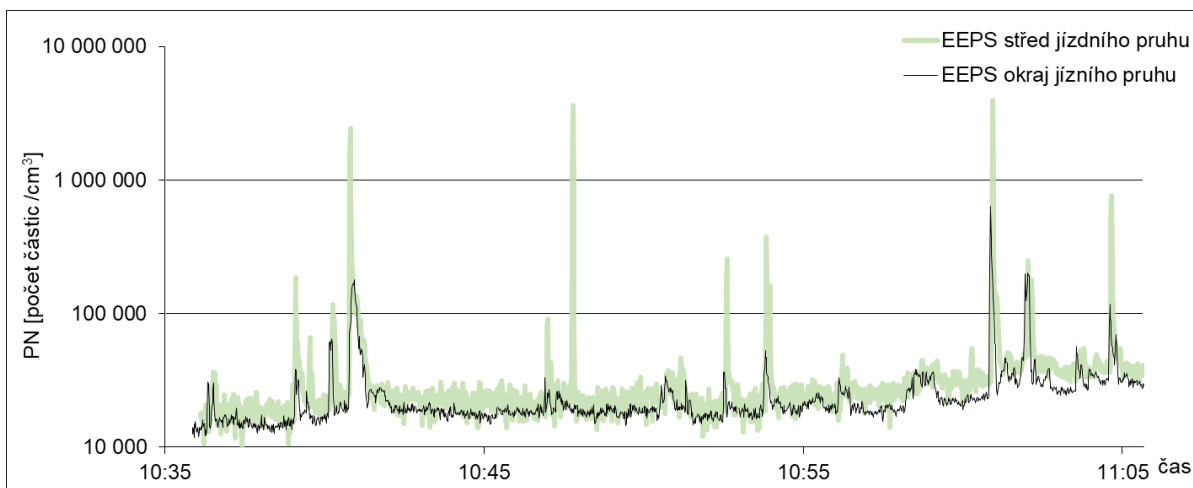
Zpracování dat pro tato dvě vyhodnocení byla velmi podobná předchozím. Byla využita v obou případech data z MSS a CTU EEPS, která vzorkovala celý den 24.6.2021 a ze stejného místa, tedy ze středu vozovky. Jednotlivé průjezdy bylo opět nutné projít a zkontrolovat, zda jsou píkové hodnoty přiřazené správnému vozidlu a případně je upravit. Následně byly vytvořeny grafy pro průjezdy jednotlivých vozidel v závislosti na měřícím přístroji, respektive na zrychlení. Různá rychlost průjezdů nebyla porovnávána, protože nebylo naměřeno dostatečné množství použitelných dat. V prvních dnech měření bylo měření MSS zatíženo chybou ve formě výrazné odezvy přístroje na tlakové rázy ve vzorkovacím potrubí.



## 6 Výsledky

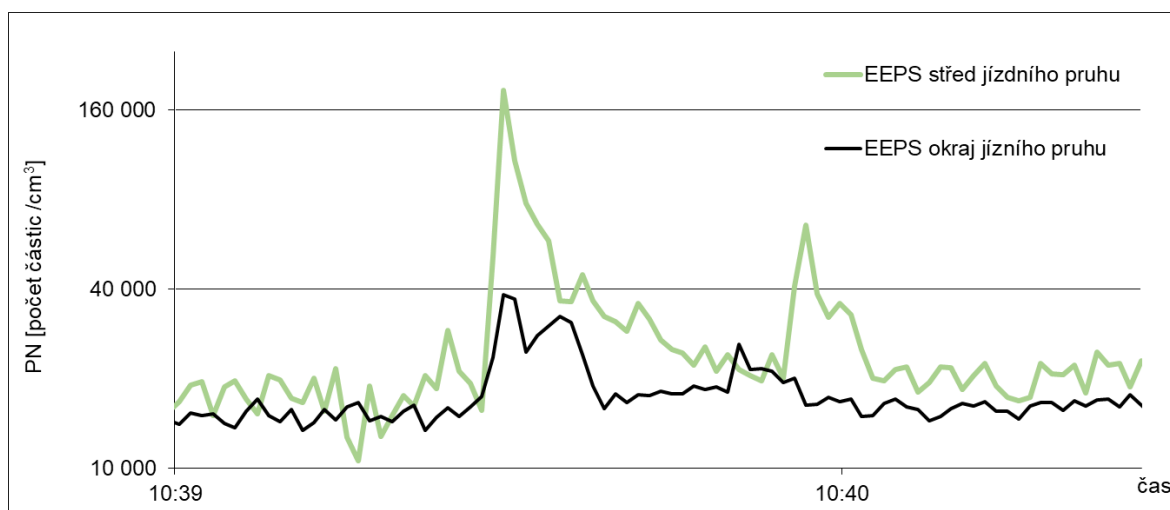
### 6.1 Pilotní experiment

Cílem pilotního experimentu bylo, zjistit, zda má smysl dále pokračovat ve vzorkování emisí z povrchu blízko středu jízdního pruhu. Obr. 36 ukazuje závislost naměřené celkové koncentrace částic všech velikostí v závislosti na čase měření a na umístění sondy.



Obr. 36- Porovnání vzorkování EEPS ze středu jízdního pruhu oproti okraji

Světle zeleně jsou zobrazena data z EEPS, které snímalo z povrchu blízko středu jízdního pruhu. Černě jsou zobrazena data, která byla snímána z okraje jízdního pruhu. Jelikož je

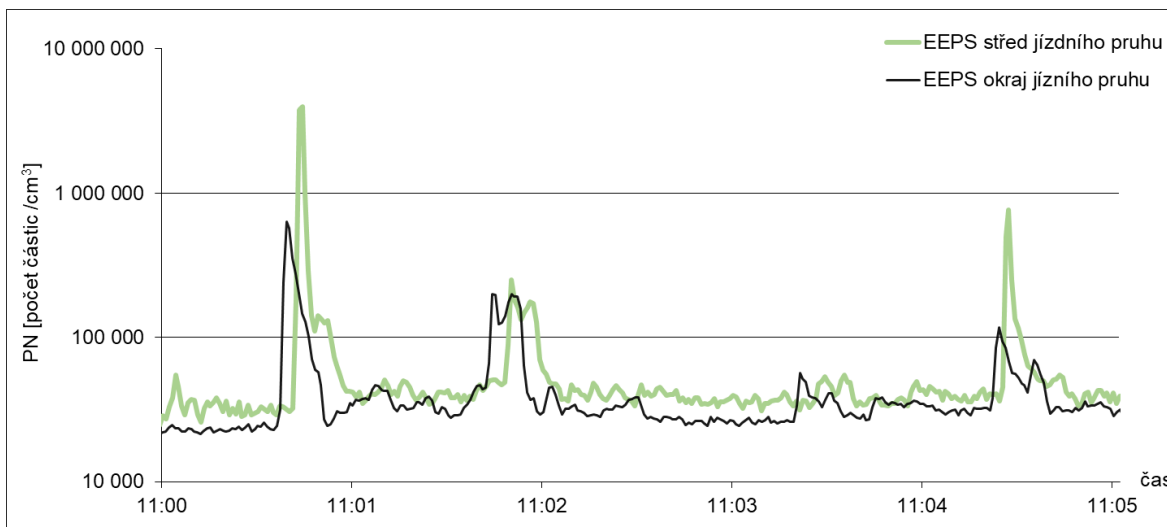


Obr. 37- Vybraný průjezd dvou vozidel

koncentrace částic v grafu vynesena v logaritmickeém měřítku, jsou zde lépe rozlišitelné vrcholy neboli píky od šumu pozadí. Píky, tedy zvýšené koncentrace částic, jsou přisuzovány průjezdu vozidla. Každý z přístrojů zaznamenal po daném průjezdu pík koncentrace částic v jiném čase. Je vhodné časově synchronizovat vrcholy píků jednotlivých přístrojů, aby byla data lépe porovnatelná. Avšak nikdy to není možné úplně synchronizovat. Při synchronizaci posouváme časovou osu dat naměřených z jednoho přístroje oproti druhému přístroji. Obr.



37 je detail z Obr. 36, kde jsou vidět pravděpodobně průjezdy dvou vozidel. Z grafu je zřejmé, že EEPS snímající ze středu jízdního pruhu naměřil v obou případech vyšší píkové koncentrace částic než EEPS snímající z okraje jízdního pruhu. U prvního průjezdu byla hodnota píku 186 tis. částic na  $\text{cm}^3$  u druhého průjezdu to bylo 65 tis. částic na  $\text{cm}^3$ . EEPS snímající z okraje vozovky naměřil u prvního průjezdu hodnotu píku 38 tis. částic na  $\text{cm}^3$  u druhého 26 tis. částic na  $\text{cm}^3$ . Zároveň pokud by se spočítala plocha ohraničená odezvou po průjezdu vozidla a pozadřovou koncentrací částic, byla by tato plocha v případě obou průjezdů vyšší u EEPS, které snímalo ze středu jízdní dráhy.



Obr. 38- Vybraný průjezd čtyř vozidel

Obr. 38 ukazuje detail z Obr. 36 od 11:00 do 11:05. Za tento časový úsek byly zachyceny přístroji EEPS nejspíše čtyři průjezdy vozidel. Mezi 11:00 a 11:01 byla zachycena oběma přístroji vysoká koncentrace částic pravděpodobně po průjezdu nákladního vozidla, starého vozidla bez DPF nebo vozidla s nefunkčním DPF. Vyšší hodnotu koncentrace částic zachytilo EEPS označené světle zeleně, které vzorkovalo ze středu jízdního pruhu, píkovaná koncentrace byla 4 miliony částic na  $\text{cm}^3$ . EEPS vzorkující z okraje vozovky, označené černě, naměřilo píkovou koncentraci 574 tis. částic na  $\text{cm}^3$ . Rozdíl v naměřených koncentracích v závislosti na vzorkovacím místě byl tedy velmi výrazný. Těsně před 11:02 byl zaznamenán oběma přístroji další nárůst koncentrace částic přisuzovaný průjezdu vozidla. Oba dva přístroje naměřily velmi podobné píkové hodnoty. EEPS vzorkující ze středu jízdního pruhu naměřilo pík o hodnotě 250 tis. částic na  $\text{cm}^3$  a EEPS vzorkující z okraje jízdního pruhu 200 tis. částic na  $\text{cm}^3$ . Z toho lze usuzovat, že po průjezdu některých vozidel za určitých podmínek jsou hodnoty naměřené z obou míst srovnatelné. Stejně tak tomu je u průjezdu vozidel mezi 11:03 a 11:04, kde oba dva přístroje naměřily podobně malé koncentrace těsně nad hranicí pravděpodobného pozadí. Rozdílnou koncentraci však přístroje opět naměřily při průjezdu vozidla mezi 11:04 a 11:05, kde vyšší koncentraci opět naměřilo EEPS vzorkující z povrchu blízko středu jízdního pruhu, konkrétně 762 tis. částic na  $\text{cm}^3$  oproti

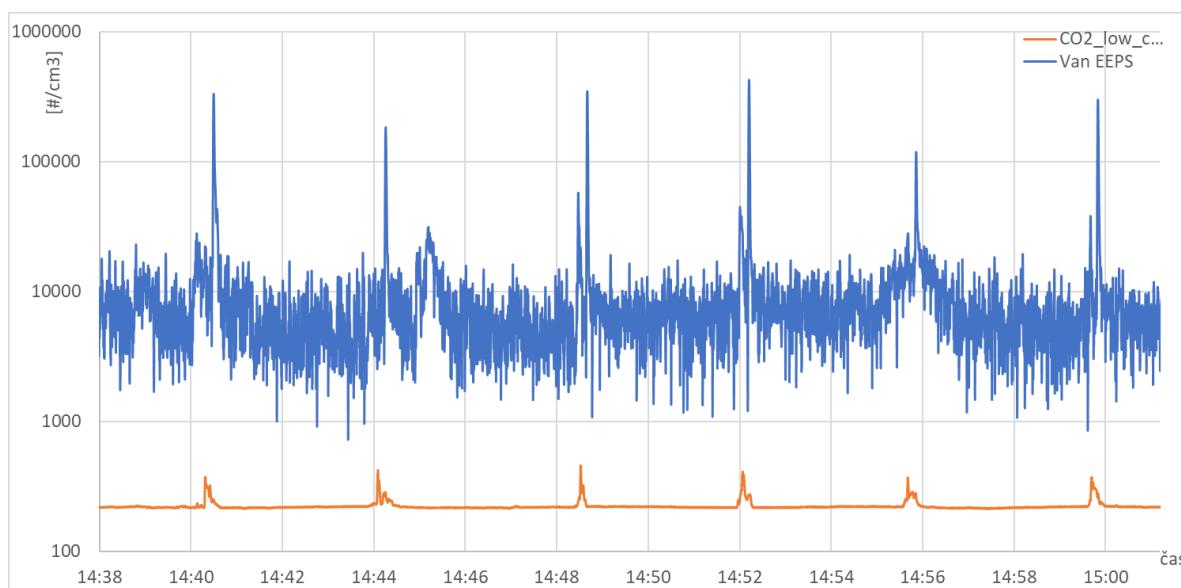


EEPS vzorkujícímu z kraje jízdního pruhu, které naměřilo píkovou hodnotu 117 tis. částic na  $\text{cm}^3$ .

## 6.2 Výsledky Lelystad

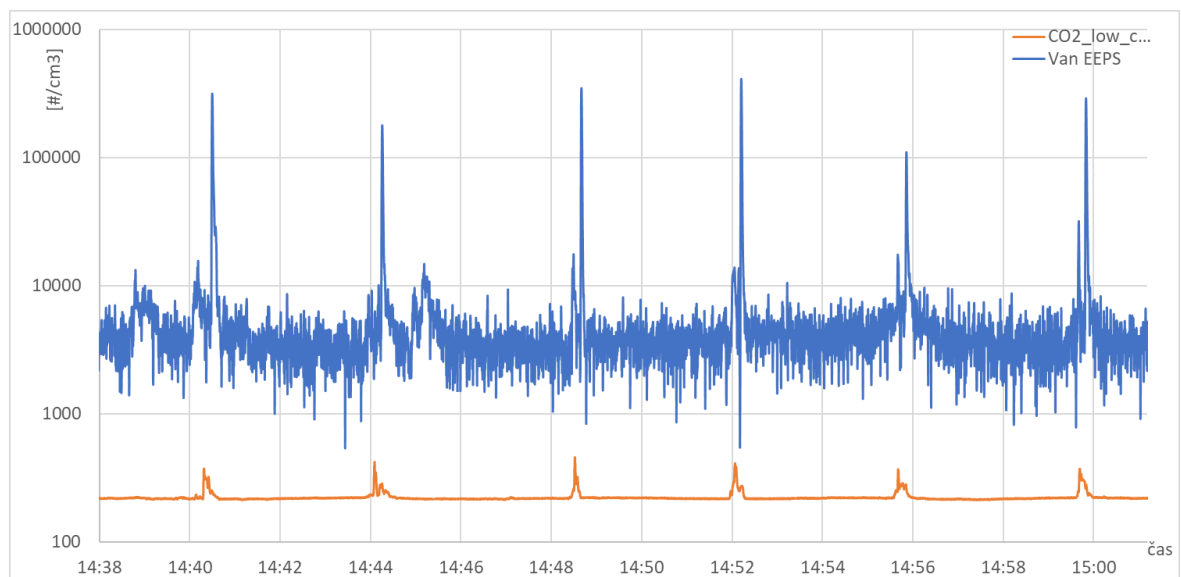
### 6.2.1 Selektce relevantních kanálů EEPS

Výsledky prvotní metody sledování změny šumu na měnicích se grafech prezentace v Powerpointu jsou vidět na Obr. 39 a Obr. 40. Data o koncentraci částic jsou v obou případech doplněna o záznam z FTIR, které snímalo koncentraci  $\text{CO}_2$  ze stejného místa. Data z FTIR lépe ukazují, kdy probíhal průjezd vozidel abychom jej bylo možné lépe identifikovat v naměřených koncentracích částic.



Obr. 39- EEPS částice od 6,04 nm do 523 nm

Obr. 39 ukazuje původní data s kanály všech velikostí z měření 24.6. od 14:38 do 15:01 z analyzátoru Van EEPS, které snímalo z okraje vozovky. Postupným odebráním kanálu

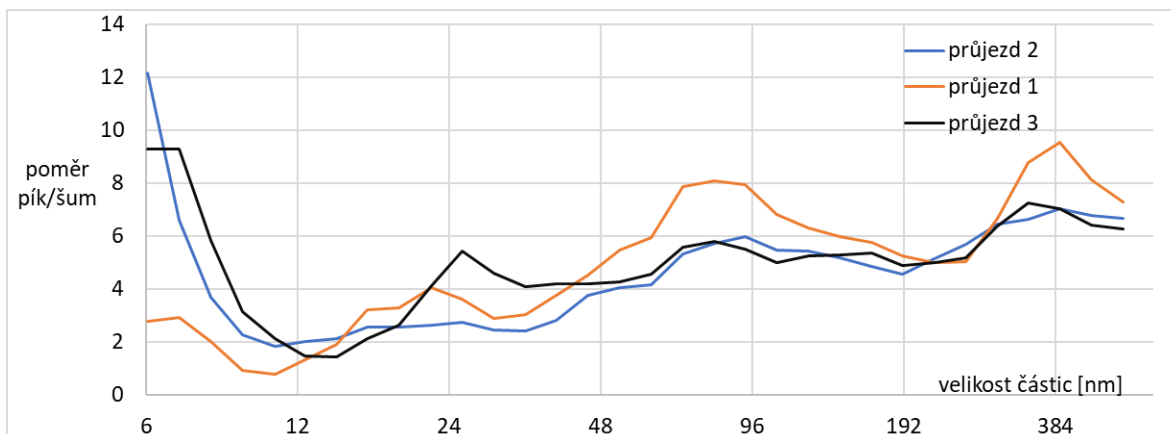


Obr. 40- EEPS částice od 12,4 nm do 523 nm



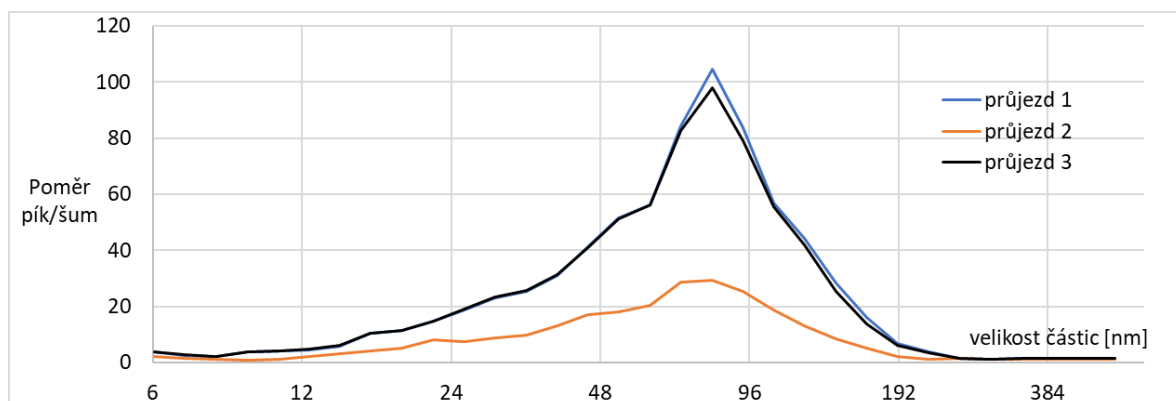
vznikl odhad, že nejvíce se na šumu za daných podmínek podílí částice do průměru 12,4 nm. Na Obr. 40 jsou naměřená data velikostí částic od 12,4 nm do 523 nm. Při porovnání obou grafů se zdá, že hodnoty píků jednotlivých průjezdů se změnily jen minimálně, avšak šum pozadí se zdá, že se snížil.

Data jednotlivých kanálů velikostí částic ze 3 samostatných průjezdů dvou vozidel byla kvantifikována pomocí poměru toho, jakou měrou se podílí na tvorbě šumu pozadí a nakolik se podílí na výsledném píku.



Obr. 41- Závislost velikosti částic na tvorbě šumu u průjezdů vozidla Truck

Obr. 41 hodnotu poměrů píku vůči šumu v závislosti na jednotlivých velikostech částic u tří průjezdů nákladního vozidla označeného jako Truck. Průjezd 1 v grafu označený oranžově je průjezd v datech značený jako 14 z 23.6. 11:05:26. Průjezd 2 v grafu označený modře je průjezd v datech značený jako 21 z 23.6. 11:09:01. Průjezd 3 v grafu označený černě je průjezd v datech značený jako 28 z 23.6. 11:12:33. Odhad získaný selekcí kanálů pomocí prezentace, který předpokládal, že částice menší než 12 nm se na tvorbě šumu pravděpodobně nepodílejí, tento graf spíše nepotvrzuje. Nejblíže odhadu jsou data z prvního průjezdu, kde poměr píku vůči šumu s narůstající velikostí částic narůstá a zároveň nejmenší částice nemají největší podíl na tvorbě píku. Zdá se, že u všech průjezdů se poměr v okolí velikosti 12 nm výrazně propadl a stává se nejnižším bodem celého grafu všech průjezdů. Podobný propad ne však, tak výrazný je vidět v okolí velikosti 250 nm.



Obr. 42- Závislost velikosti částic na tvorbě šumu u průjezdů vozidla Touran

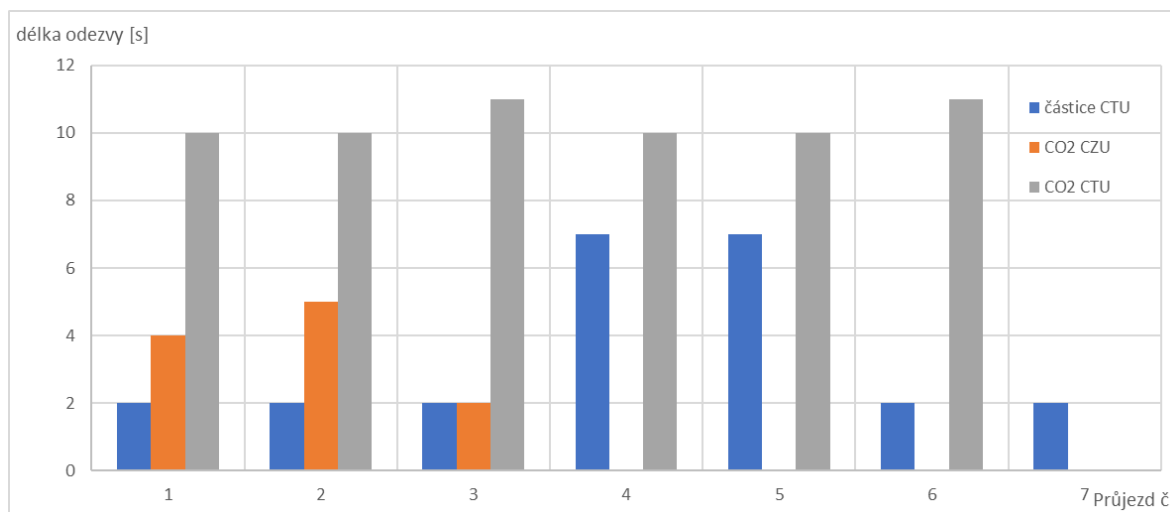




Obr. 42 znázorňuje hodnotu poměrů píku vůči šumu v závislosti na jednotlivých velikostech částic u tří průjezdů nákladního vozidla označeného jako Touran. Průjezd 1 v grafu označený modře je průjezd v datech značený jako 15 z 23.6. 11:06:09. Průjezd 2 v grafu označený oranžově je průjezd v datech značený jako 22 z 23.6. 11:09:35. Průjezd 3 v grafu označený černě je průjezd v datech značený jako 29 z 23.6. 11:13:14. Jedná se tedy o průjezdy za vozidlem Truck vždy, ale s minimálně 30 sekundovými rozestupy. Z Obr. 42 je již patrnější, že na tvorbě píku se u všech třech průjezdů podle výpočtů podílí částice v okolí průměru 80,6 nm. Částice o průměru do 12,4 nm se velkou měrou podílí na tvorbě šumu, stejně, tak jako částice s průměrem větším než 191,1 nm. Zdá se, že vyhodnocení průjezdů vozidla Touran spíše potvrzuje odhad z prvotního srovnání pomocí prezentace, že částice menší než 12,4 nm se podílejí spíše na tvorbě šumu a méně na píku po průjezdu vozidla. Je velmi zajímavé, že první a třetí průjezd vozidla Touran, které od sebe dělí více než 7 minut, vykreslují na Obr. 42 velmi podobné křivky. Toto kladně přispívá k vypovídající hodnotě celého měření a výpočtů.

#### 6.2.2 Délka odezvy na průjezd

Touto metodou bylo zpracováno 61 průjezdů vozidel od 10:58 do 11:50. Na obrázcích níže jsou průjezdy vozidel s nejdelší odezvou na průjezd, u ostatních vozidel byly odezvy na průjezd buď pod mezí detekce nebo velmi krátké. Proto ze zpracovaných dat byla vybrána dvě vozidla, která byla nejčastěji zachycena a měla nejdelší odezvu. Konkrétně vozidla Touran a Truck.

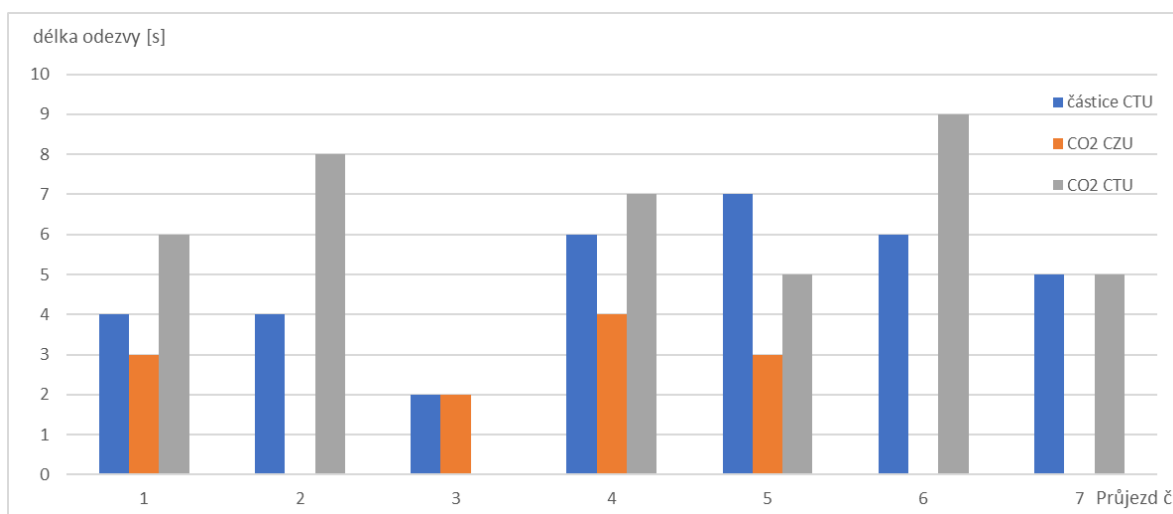


Obr. 43- Délka odezvy na průjezdy vozidla Truck

Na Obr. 43 jsou zobrazeny délky odezvy na průjezd vozidla Truck. V tomto časovém rozmezí bylo zachyceno 7 průjezdů. FTIR CZU snímající CO<sub>2</sub> z okraje jízdního pruhu zaznamenal zvýšenou koncentraci nad mez detekce pouze u prvních tří průjezdů. Délka odezvy v tomto případě byla 2, 4 a 5 sekund. Naopak velmi dlouhé délky odezvy zachytilo FTIR CTU, které vzorkovalo ze středu jízdní dráhy. Kromě posledního sedmého průjezdu, kde již chyběla



naměřená data se povedlo zachytit zvýšenou koncentrací CO<sub>2</sub> nad mez detekce v délce od 10 do 11 sekund. Odezva koncentrace částic na průjezd vozidla měřená EEPS CTU ze středu jízdního pruhu byla zachycena u všech 7 průjezdů. Kromě dvou průjezdů čtvrtého a pátého, kdy byla délka odezvy 7 sekund, byla ve všech ostatních délka odezvy 2 sekundy. Z výsledků je tedy zřejmé, že kromě odezvy na oxid uhličitý u měření ze středu jízdního pruhu se odezvy v rámci jednotlivých přístrojů a průjezdů velmi liší. V případě měření FTIR ze středu jízdního pruhu by muselo být další vozidlo vzdáleno minimálně 11 sekund od vozidla Truck, aby jej Truck neovlivňoval. Pro měření částic ze středu jízdního pruhu by to bylo minimálně 7 sekund a pro měření FTIR z okraje jízdního pruhu by to bylo minimálně 5 sekund.



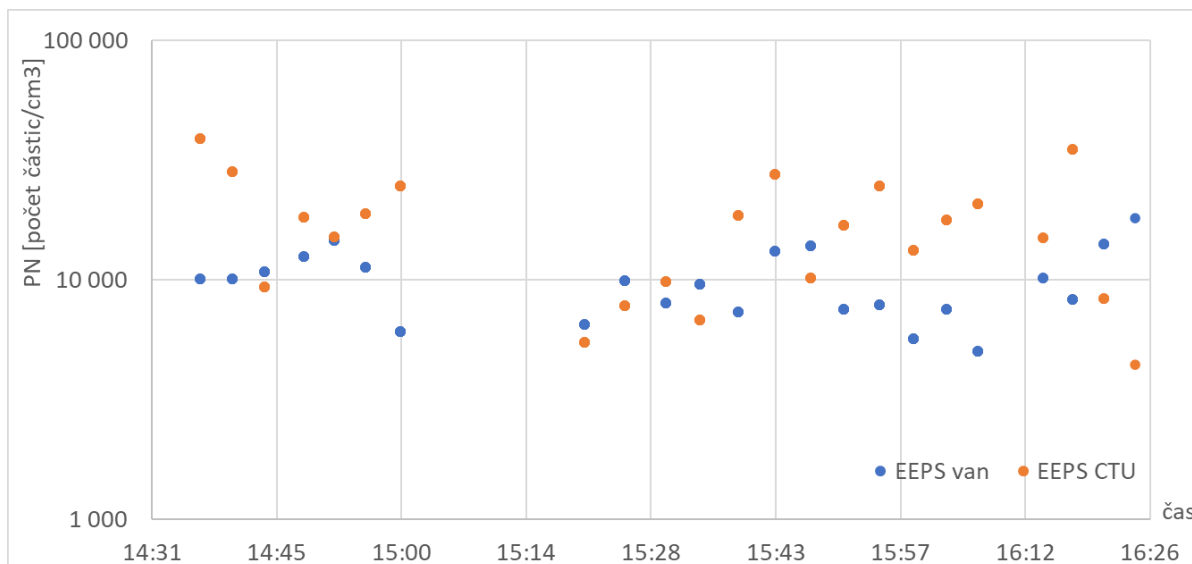
Obr. 44- Délka odezvy na průjezdy vozidla Touran

Obr. 44 zobrazuje délky odezvy na 7 průjezdů vozidla Touran. U všech sedmi průjezdů zachytil odezvu přístroj CTU EEPS, který vzorkoval ze středu jízdní dráhy. FTIR CZU, které vzorkovalo z okraje jízdního pruhu, zachytilo zvýšenou koncentraci nad mez detekce pouze u průjezdů 1, 3, 4, 5. Délka odezvy vozidla Touran byla mírně menší než u vozidla Truck, dvakrát byla zaznamenána odezva 3 sekundy jednou 4 a jednou 2 sekundy. FTIR CTU, které vzorkovalo ze středu jízdní dráhy, naměřilo u vozidla Touran kratší délky odezvy než u vozidla Truck. Konkrétně naměřilo dvakrát 5 sekund, jednou 6, 7, 8 a 9 sekund a jednou u průjezdu 3 nenaměřilo žádnou zvýšenou koncentraci nad mez detekce. EEPS CTU, které vzorkovalo ze středu jízdní dráhy naměřilo u všech průjezdů zvýšenou koncentraci částic nad mez detekce. Konkrétní délky odezvy byly jednou 2, 5 a 7 sekund a dvakrát 4 a 6 sekund. Pro vzorkování ze středu jízdní dráhy pomocí FTIR by měl být rozestup mezi vozidly po průjezdu vozidla Touran minimálně 9 sekund, aby nedošlo k ovlivnění výsledků následujícího vozidla. Pro vzorkování pomocí FTIR z okraje jízdního pruhu by měl stačit rozestup vozidel minimálně 4 sekundy a pro vzorkování EEPS ze středu jízdní dráhy minimálně 7 sekund.



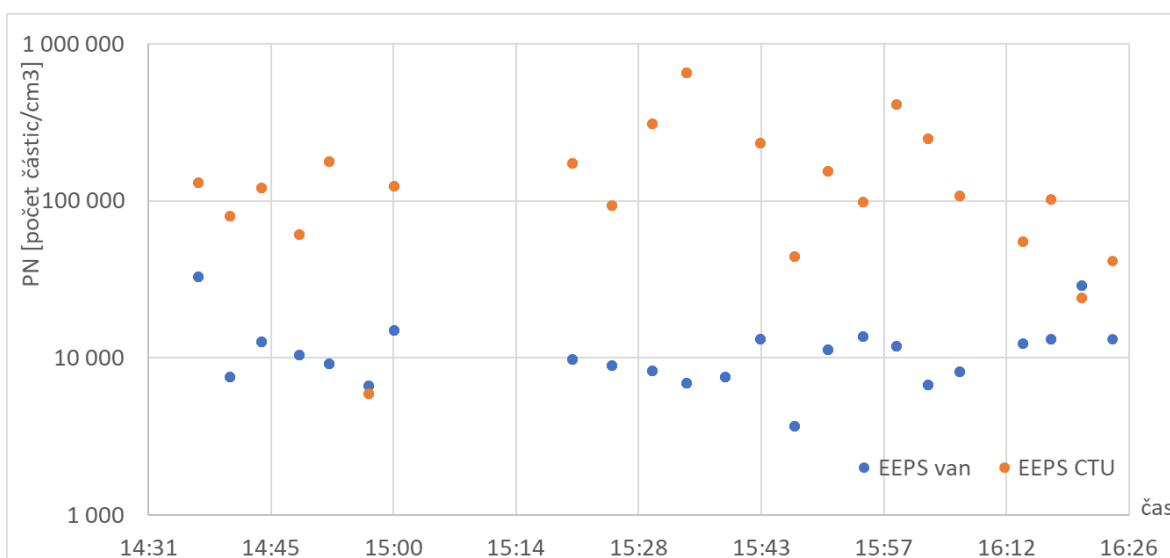
### 6.2.1 Porovnání místa vzorkování

Pro porovnání umístění vzorkovací sondy byla vybrána data z EEPS CTU, které vzorkovalo z povrchu blízko středu jízdního pruhu a EEPS CZU, které vzorkovalo z okraje jízdního pruhu. Dne 24.6. od 14:36 do 16:24, vzorkovaly oba dva přístroje současně a naměřily 151 průjezdů vozidel těmito přístroji.



Obr. 45- Porovnání místa vzorkování průjezdů vozidla Caddy

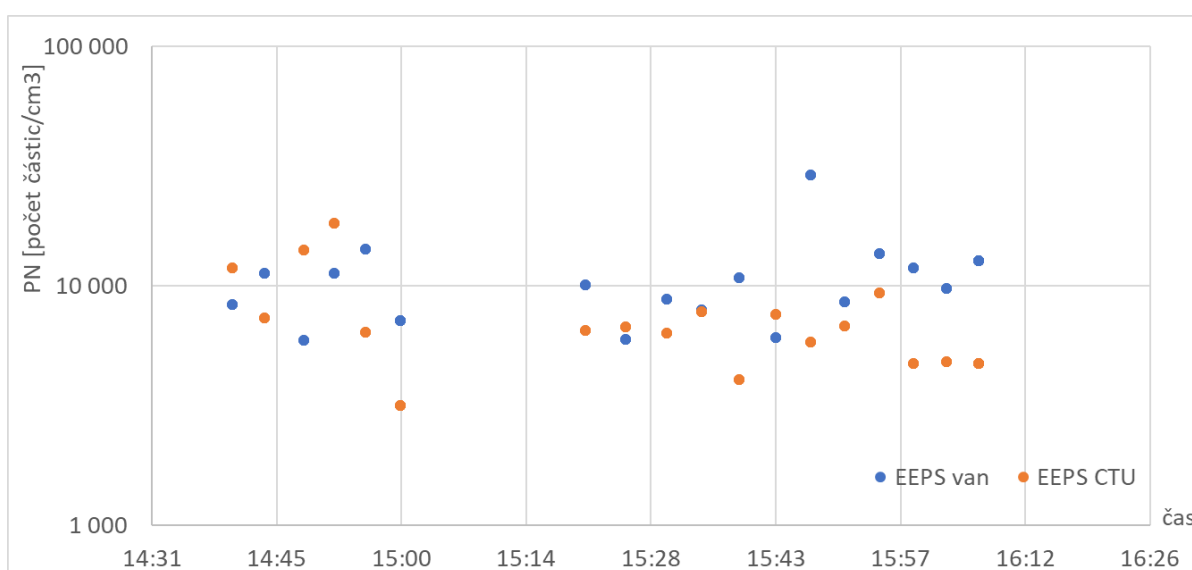
Na Obr. 45 je vidět 23 průjezdů vozidla Caddy, tak jak přístroje zaznamenaly píkové hodnoty koncentrace částic za jeho průjezdy. Caddy bylo v této části měření provozováno bez DPF čemuž odpovídají zvýšené koncentrace částic. Kromě šesti průjezdů, které byly na hranici detekce 10 000 částic na  $\text{cm}^3$ , vždy zachytilo větší pík EEPS CTU ze středu jízdního pruhu. Zároveň naměřilo až čtyřnásobně vyšší koncentrace nad mez detekce. U tohoto vozidla se zdá, že vzorkování uprostřed jízdního pruhu je výhodnější oproti okraji vozovky.



Obr. 46- Porovnání místa vzorkování průjezdů vozidla Touran

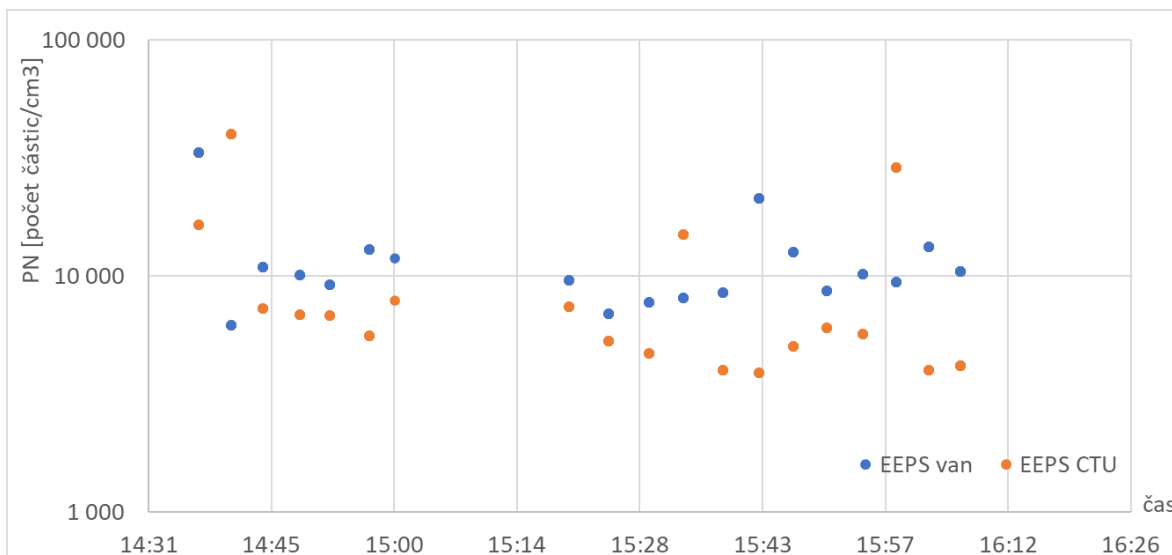


Na Obr. 46 jsou data z 22 průjezdů vozidla Touran, který byl provozován taktéž bez filtru pevných částic. Jsou zde vyobrazeny maximální hodnoty koncentrací částic po průjezdu daného vozidla. Oranžově označené body odpovídají vzorkování ze středu jízdního pruhu pomocí EEPS CTU a modré body vzorkování z okraje jízdního pruhu pomocí EEPS CZU. Mnohonásobně vyšší koncentrace částic byly naměřeny ze středu jízdní dráhy, někdy až stonásobně vyšší koncentrace. Kromě dvou průjezdů, kdy byly naměřené koncentrace téměř totožné. Naměřené hodnoty pomocí EEPS van se často pohybovaly okolo meze detekce, zároveň je vidět, že pokud byl po průjezdu záchyt vysoké koncentrace na jednom přístroji oproti ostatním průjezdům hodnota byla vysoká i pro druhý přístroj, stejně tak obráceně pokud byla nízká. Zda se že i pro toto vozidlo je výhodnější vzorkování ze středu jízdního pruhu.



Obr. 47- Porovnání místa vzorkování průjezdů vozidla Scooter

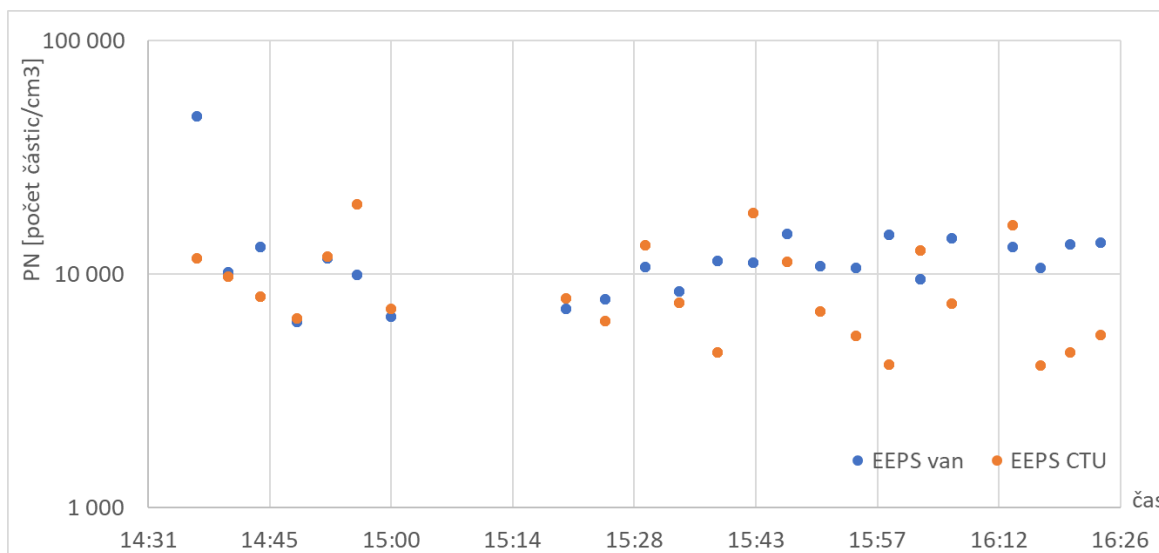
Na Obr. 47 je zaznamenáno 18 průjezdů vozidla Scooter. Vzhledem k logaritmickému měřítku se zdá, že relativní rozdíly jsou veliké, avšak absolutní rozdíly jsou v řádů jednotek tisíc částic na  $\text{cm}^3$ . Z těchto 18 průjezdů byla 14krát naměřená koncentrace z okraje vozovky vyšší než ze středu jízdního pruhu. Téměř všechny naměřené maximální hodnoty koncentrace se pohybovaly okolo meze detekce 10 000 částic na  $\text{cm}^3$ . Pro toto vozidlo není umístění sondy tolik důležité, protože v obou případech umístění byly naměřeny nízké hodnoty koncentrací.



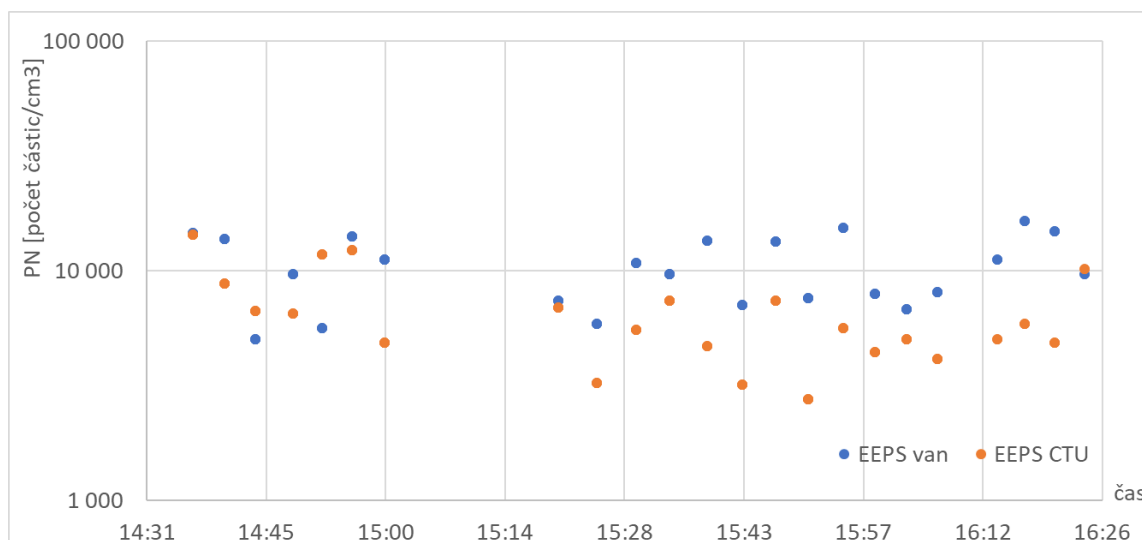
Obr. 48- Porovnání místa vzorkování průjezdů vozidla Motorbike

Na Obr. 48 jsou průjezdy vozidla Motorbike, které jsou velmi podobné vozidlu Scooter. Občasné zvýšené koncentrace jsou způsobeny pořadím vozidel v jakém za sebou jela. Vozidlo Motorbike jelo přímo za vozidlem Touran, které za sebou nechávalo vysoké zbytkové koncentrace a u průjezdů s malými rozestupy mohlo a dle dat velmi často ovlivnilo naměřené koncentrace vozidla za ním jedoucím.

Velmi podobné výsledky jsou vidět i u vozidel Truck na Obr. 49 a u vozidla Transporter na Obr. 50. Obě vozidla byla vybavena funkčním filtrem pevných částic a proto velmi často byly naměřené koncentrace pod mezí detekce.



Obr. 49- Porovnání místa vzorkování průjezdů vozidla Truck

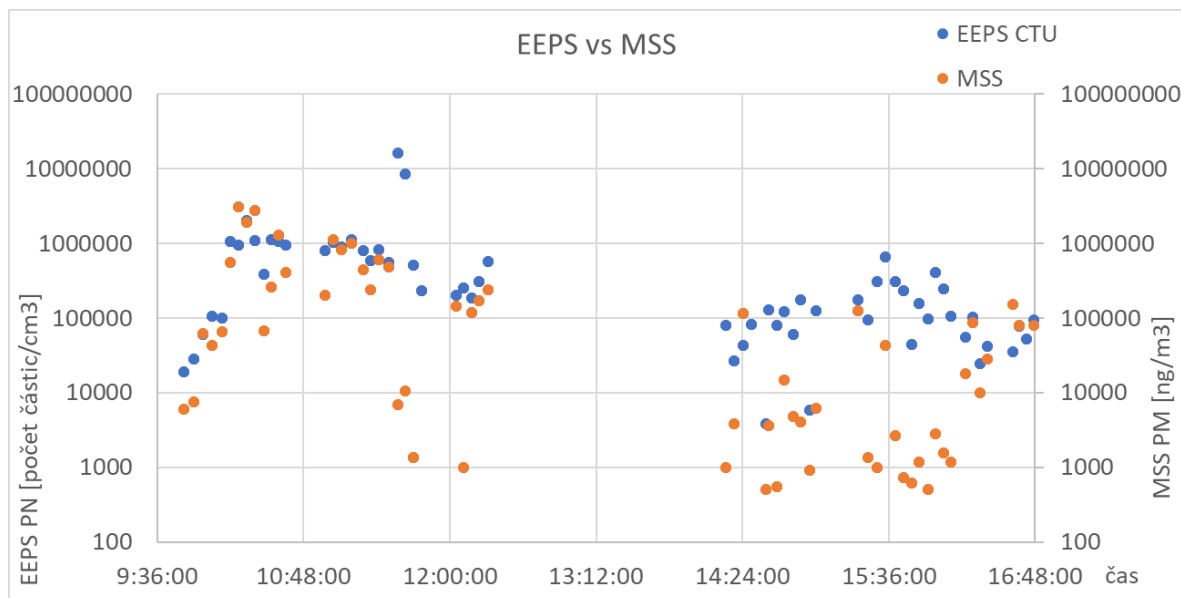


Obr. 50- Porovnání místa vzorkování průjezdů vozidla Transporter

### 6.2.2 Porovnání EEPS vs. MSS

Pro porovnání dvou přístrojů vyhodnocujících množství částic v ovzduší EEPS a MSS byla vybrána data z 24.6.2021. Oba dva přístroje naměřily všech 414 průjezdů ten den. Byly zaznamenány špičkové koncentrace částic obou přístrojů, koncentrace částic z EEPS byla v počtu částic na  $\text{cm}^3$  a MSS zaznamenal hmotnostní koncentrace pevného uhlíku v ovzduší v miligramech na  $\text{m}^3$ .

Pro větší názornost při zachování zavedených jednotek pro EEPS byly naměřené hodnoty převedeny do nanogramů na  $\text{m}^3$ . Mez detekce průjezdů přístrojů je 10 000 částic na  $\text{cm}^3$

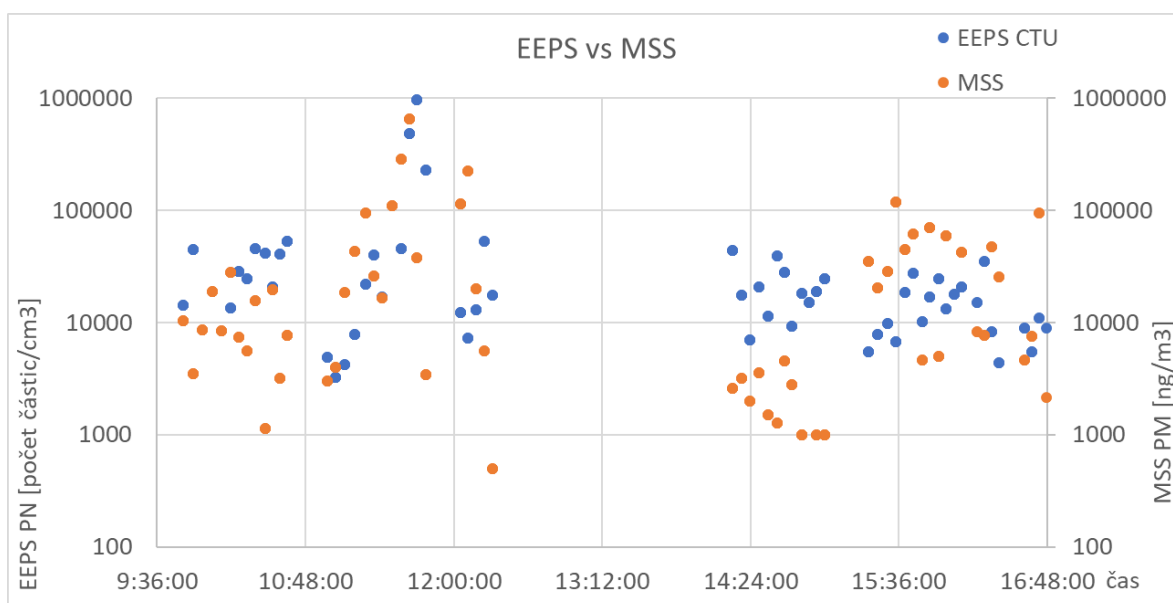


Obr. 51- Porovnání EEPS vs MSS vozidlo Touran



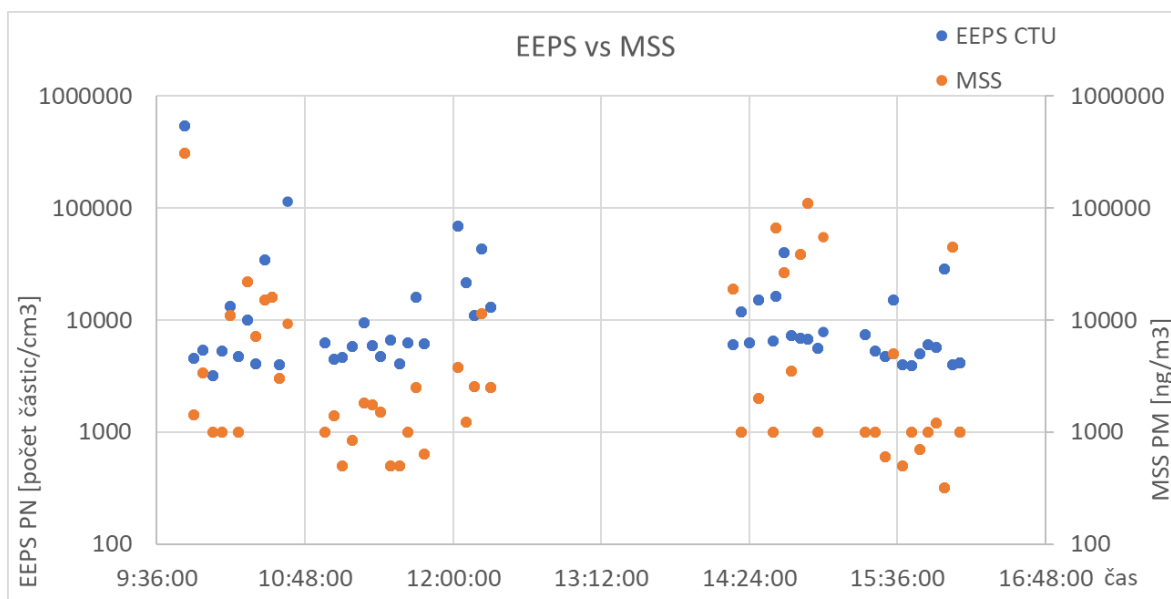
pro EEPS a 10 000 nanogramů na m<sup>3</sup> pro MSS. Mez detekce MSS je podle výrobce 1000 nanogramů na m<sup>3</sup>.

Na Obr. 51 jsou vyneseny píky koncentrací pro dané průjezdy vozidla Touran, modře od EEPS CTU a oranžově od MSS. Po průjezdu tohoto vozidla by měly přístroje ideálně vždy zachytit zvýšenou koncentraci částic. Pokud je hranice pro zachycení zvýšené koncentrace 10 000, pak EEPS CTU až na dva průjezdy ji vždy zachytil, avšak MSS ji zhruba v polovině průjezdů, hlavně první polovině dne. V první polovině dne jsou naměřené hodnoty z obou přístrojů velmi podobné. Při průjezdu tohoto vozidla se zdá, že je spolehlivější měření pomocí EEPS CTU. Vzhledem k faktu, že Touran byl benzínový lze očekávat, že částice budou volatilní to znamená, že spaliny budou obsahovat méně elementárního uhlíku, který zaznamenává MSS.



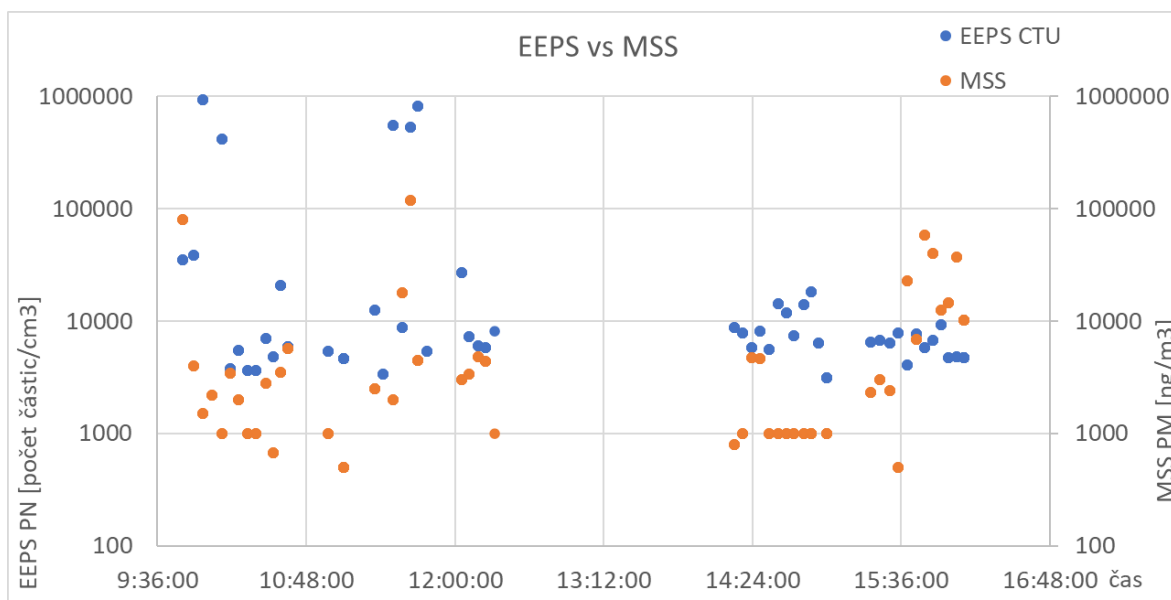
Obr. 52- Porovnání EEPS vs MSS vozidlo Caddy

Na Obr. 52 jsou průjezdy vozidla Caddy. Maximální hodnoty koncentrací obou přístrojů jsou velmi podobné hlavně opět v první polovině dne. Zdá se, že vícekrát zachytil koncentraci nad mez detekce EEPS CTU. Vozidlo Caddy mělo v některých částech měření v Lelystadu bypass (přemostění) filtru pevných částic, to by se mělo projevit řádovým zvýšením emise částic, který by měly zachytit oba dva přístroje. Zvýšené hodnoty u prvního průjezdu mohly být způsobené buď bypassem DPF nebo studeným startem vozidla.



Obr. 54- Porovnání EEPS vs MSS vozidlo Motorcycle

Na Obr. 54 jsou vidět maximální hodnoty koncentrací pro průjezdy vozidla Motorcycle tedy Yamaha MT-07. Téměř ve všech případech byly hodnoty naměřené MSS menší, než byla mez detekce 10 000 ng/m<sup>3</sup>. Stejně tak píky naměřené pomocí EEPS CTU byly velmi často pod hranicí detekce. U vozidla Motorcycle se očekává že za určitých podmínek může vyprodukovat vysoké množství částic, avšak jsou to méně časté jevy. Výhodu jednotlivých analyzátorů v odhalení velkých znečišťovatelů lze u tohoto vozidla jen obtížně porovnat.



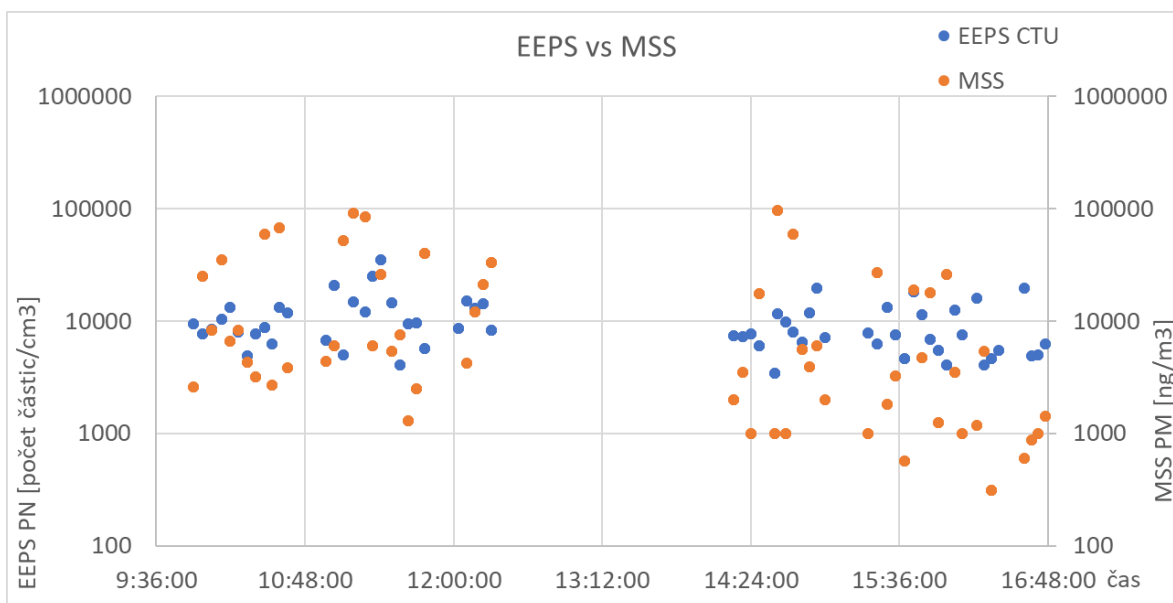
Obr. 53- Porovnání EEPS vs MSS vozidlo Scooter

Na Obr. 53 jsou znázorněny píky koncentrací jednotlivých průjezdů vozidla Scooter tedy Yamaha NMAX. Z výsledků je zřejmé, že jen výjimečně překročily píky z MSS mez detekce. Častěji překročily mez detekce průjezdy zachycené přístrojem EEPS CTU, avšak spíše se





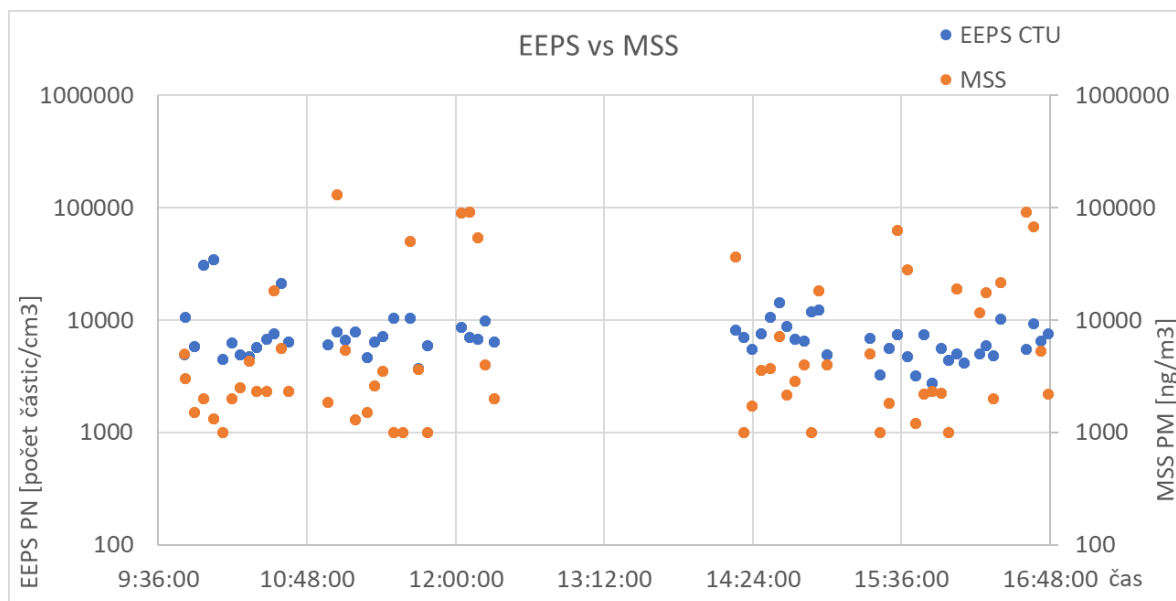
hodnoty pohybovaly okolo meze detekce a ve druhé půlce dne téměř nepřekračovaly mez detekce. Scooter může stejně jako Motorcycle za určitých podmínek vypustit veliké množství částic, ale za jasného znečišťovatele jej považovat nelze.



Obr. 55- Porovnání EEPS vs MSS vozidlo Truck

Na Obr. 55 jsou maximální koncentrace pro průjezdy vozidla Truck. Vozidlo bylo vybaveno filtrem pevných částic a neměly by tedy být po průjezdu nijak zvlášť zvýšené koncentrace částic. Je zřejmé, že koncentrace naměřené přístrojem EEPS CTU jsou soustředěné okolo meze detekce a mají velmi malý rozptyl mezi jednotlivými průjezdy. Kdežto průjezdy naměřené pomocí MSS mají oproti EEPS vysoký rozptyl a častěji dosahují vyšších koncentrací. V druhé polovině dne jsou naměřené hodnoty spíše pod mezí detekce. Pomocí tohoto vozidla je velmi obtížné porovnávat schopnost zachycení producentů vysokého znečištění, avšak výsledky průjezdů z EEPS jsou více konzistentní.

Na Obr. 56 je znázornění píkových hodnot koncentrací částic pro průjezdy vozidla Transporter. Vozidlo Transporter bylo vybaveno stejně jako Truck filtrem pevných částic, což znamená, že by neměly naměřené koncentrace převyšovat mez detekce ani jednoho z přístrojů. V případě MSS byly častěji naměřené hodnoty pod mezí detekce, ale opět několik průjezdů výrazně převyšuje danou mez detekce, což opět poukazuje na již zmíněný vysoký rozptyl hodnot pro tento přístroj. Naměřené hodnoty pro EEPS byly většinou pod hranicí detekce až na sedm průjezdů, které ji převyšují jen ve velmi malé míře. Pro tento

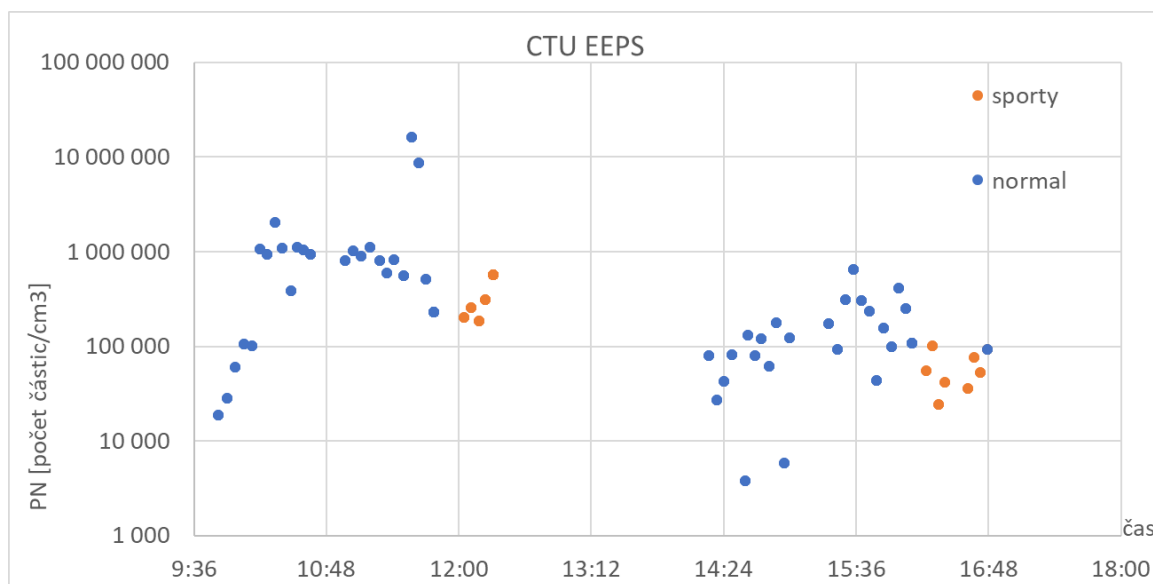


Obr. 56- Porovnání EEPS vs MSS vozidlo Transporter

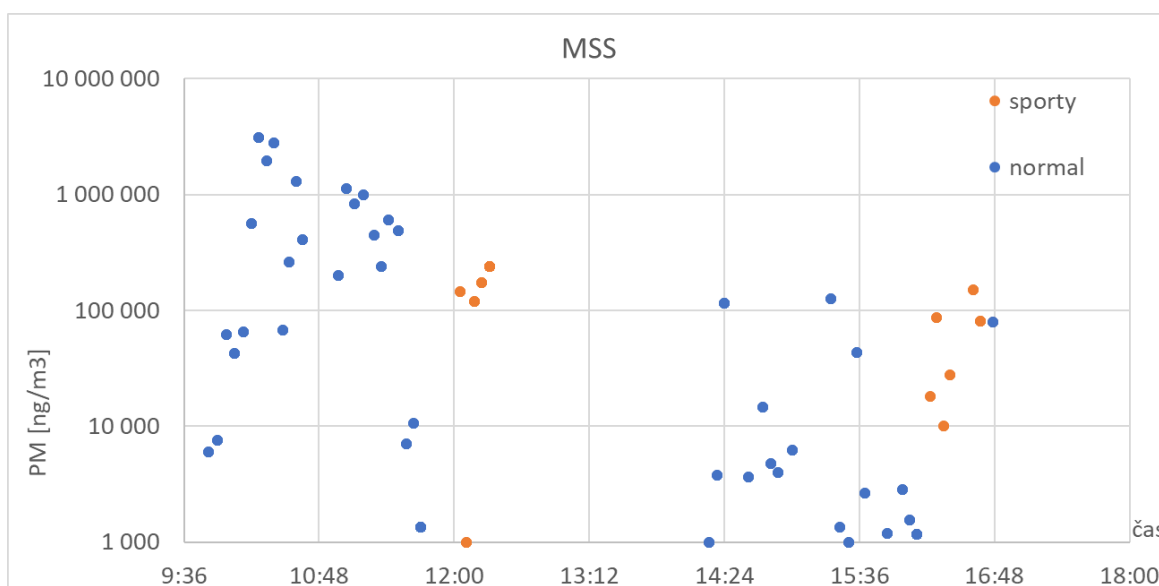
typ vozidla se zdá být vhodnější použít přístroj EEPS opět pro jeho velmi malý rozptyl hodnot a téměř všechny hodnoty pod mezí detekce.

### 6.2.3 Porovnání jízdních podmínek

V porovnání jízdních podmínek byl sledován vliv akcelerace na koncentraci naměřených částic. Projíždějící vozidla akcelerovala buď normálně nebo sportovně na plné sešlápnutí plynového pedálu. Byla vyhodnocena data z 24.6.2021 pro přístroje CTU EEPS a MSS, protože oba dva měřily celý den, a tudíž zachytily všechny průjezdy, jak části měření, kde se vozidla rozjížděla normální (běžnou) akcelerací, ale i ty části, kde se vozidla rozjížděla sportovně na plný plyn. Ostatní přístroje neměřily celý den nebo nebyla data, například z FTIR CTU, dostatečně spolehlivá.

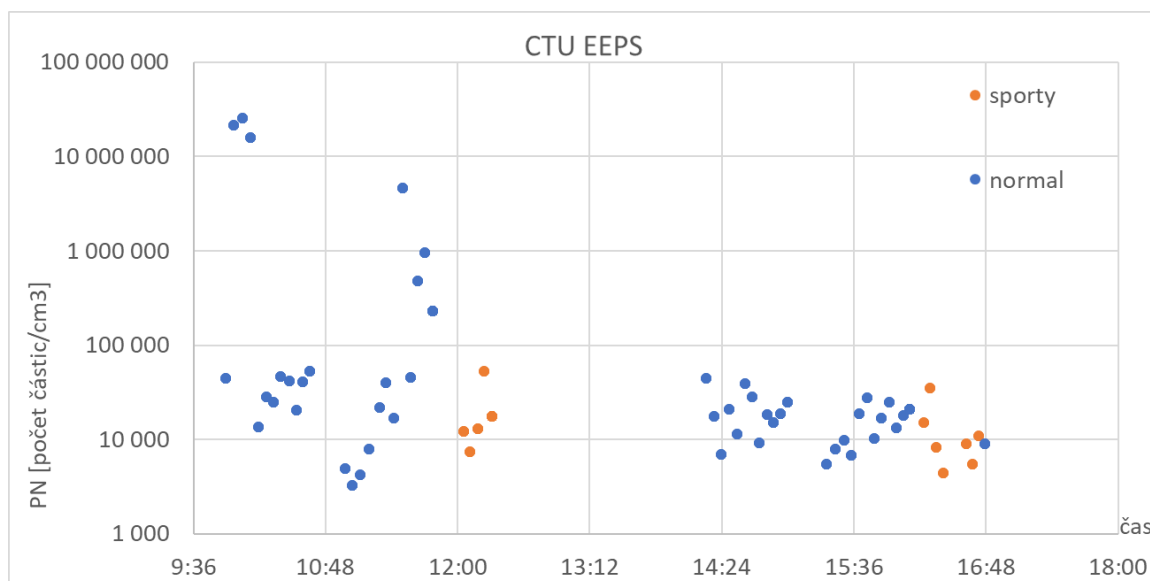


Obr. 57- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Touran z EEPS CTU

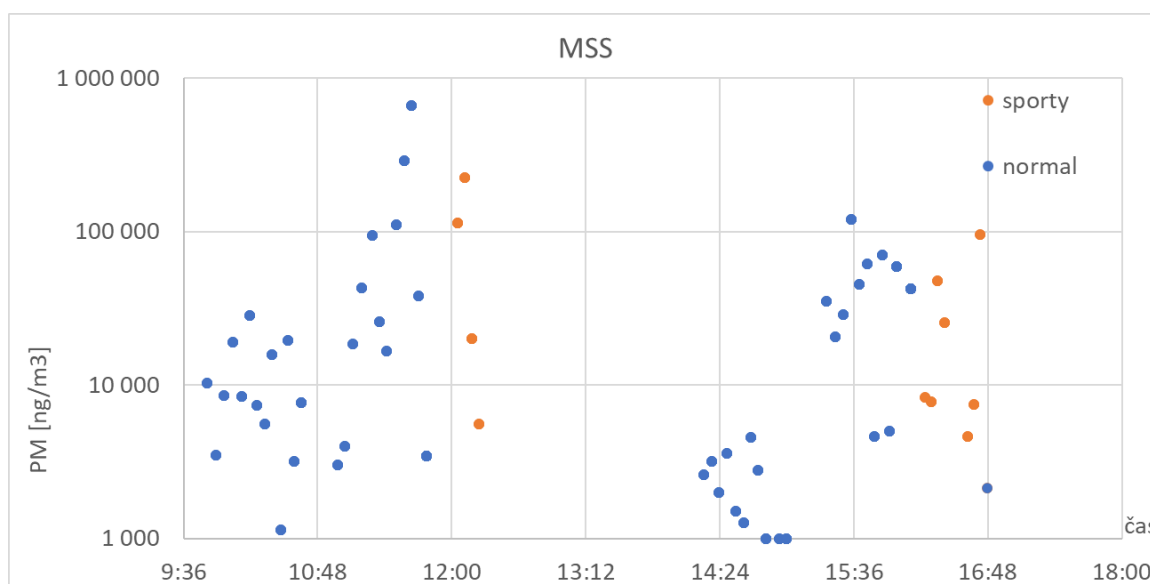


Obr. 58- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Touran z MSS

Na Obr. 57 a Obr. 58 jsou vidět maximální hodnoty koncentrací částic pro průjezdy vozidla Touran. Modře jsou vyznačené průjezdy, kde vozidlo akcelerovalo normálně a oranžově jsou vyznačeny průjezdy se sportovní akcelerací. Pro hodnoty naměřené EEPS CTU se nezdá, že by měla mít různá akcelerace větší vliv. Kdežto u MSS až na jeden průjezd jsou všechny hodnoty koncentrací nad mezí detekce pro sportovní akceleraci, ale pro normální akceleraci je jich nad touto mezí výrazně méně. V tomto případě se zdá že má sportovnější akcelerace vliv jistotu záchytu zvýšené koncentrace částic.

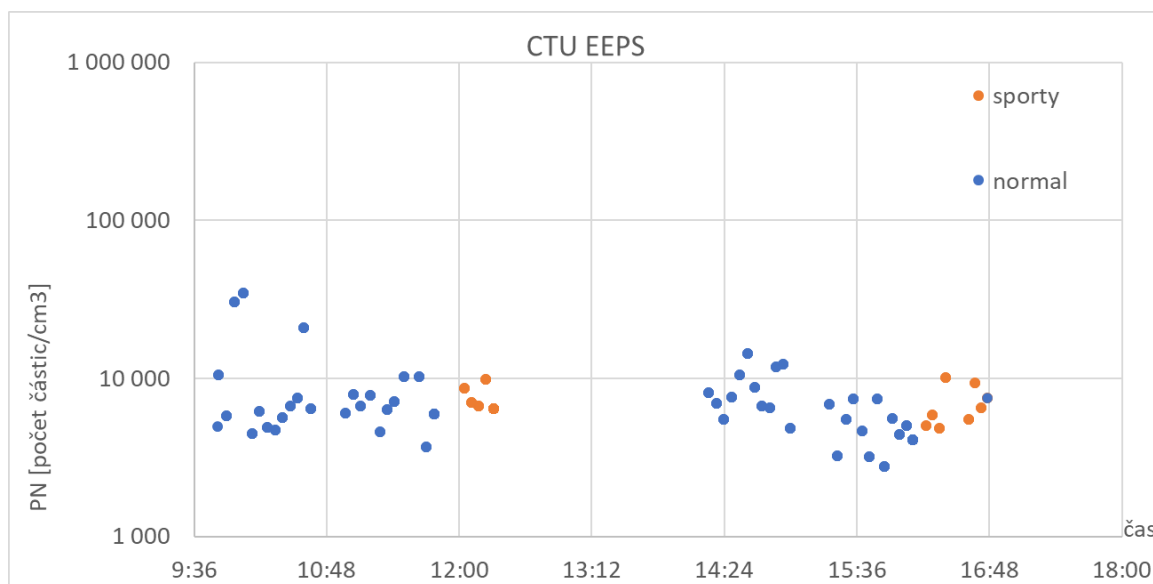


Obr. 59- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Caddy z EEPS CTU

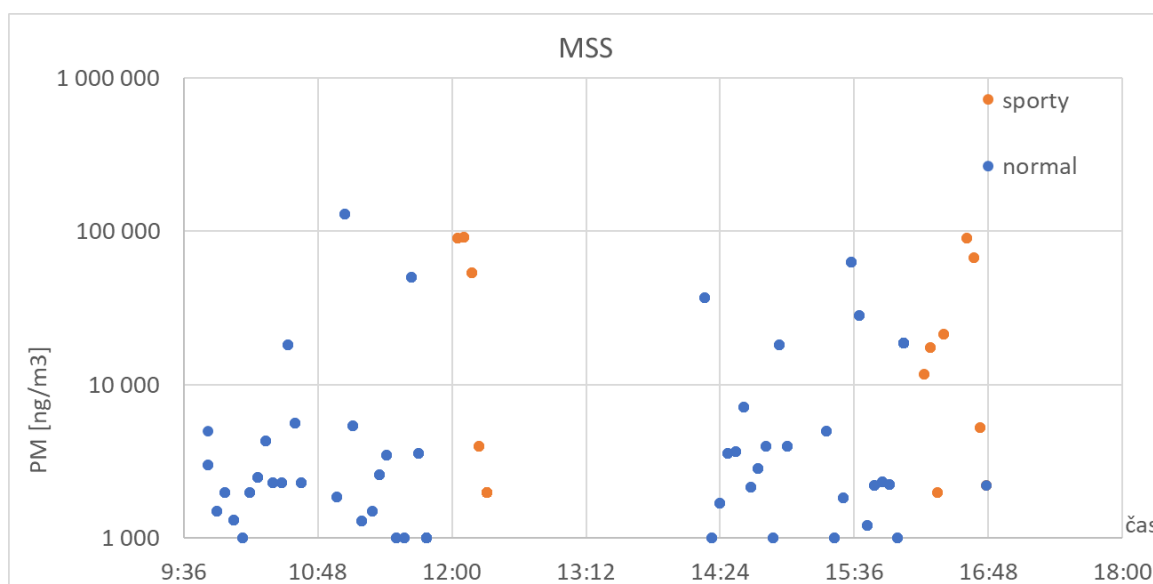


Obr. 60- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Caddy z MSS

Na Obr. 59 a Obr. 60 jsou graficky vyneseny hodnoty pro maximální koncentrace částic vozidla Caddy. U obou přístrojů se nezdá, že by byly maximální hodnoty koncentrace pro úseky se sportovní akcelerací výrazně vyšší než u úseků s normální akcelerací.

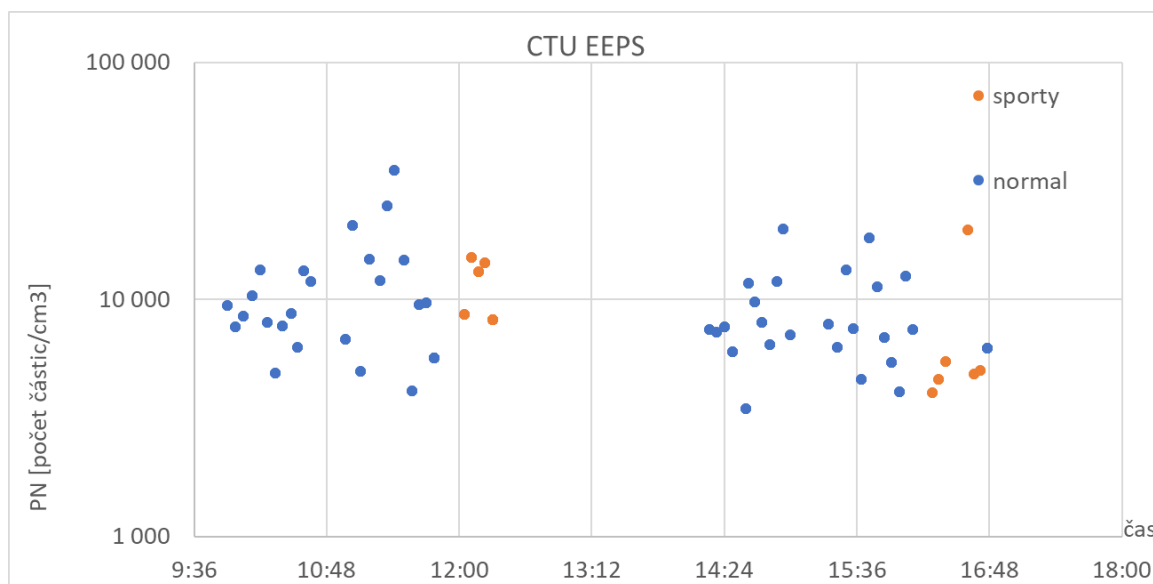


Obr. 61- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Transporter z EEPS CTU

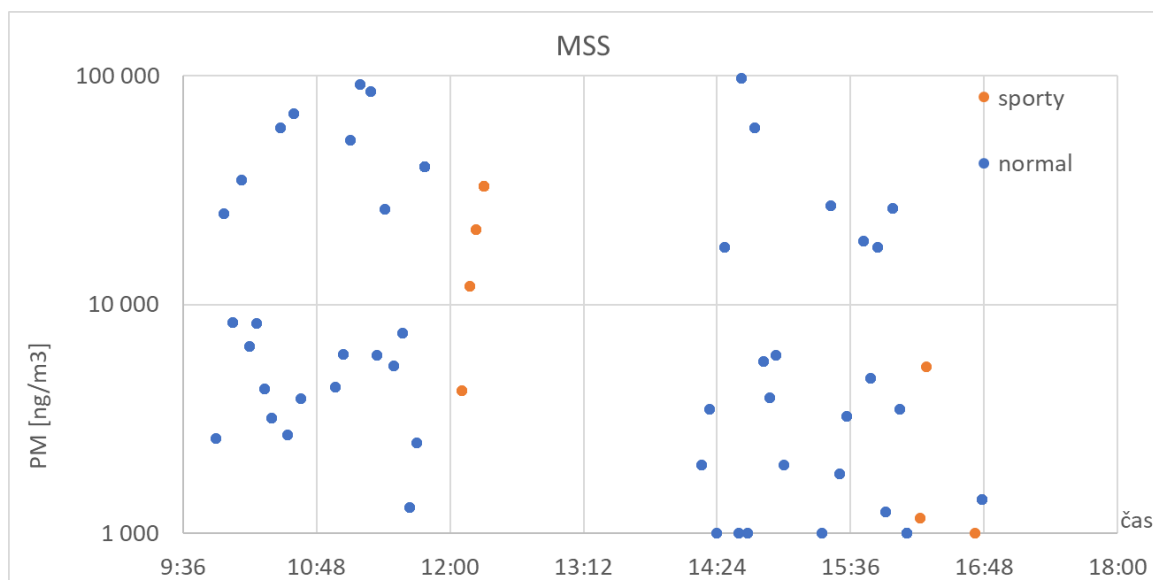


Obr. 62- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Transporter z MSS

Na Obr. 61 a Obr. 62 jsou vidět píkové hodnoty koncentrací naměřených po průjezdu vozidla s filtrem pevných částic Transporterem. U CTU EEPS se naměřené hodnoty příliš neliší v závislosti na typu akcelerace a jsou většinou pod mezí detekce. Kdežto u MSS jsou naměřené hodnoty velmi rozptýleny, a to i nad mez detekce. Průjezdy, u nichž byla zaznamenána koncentrace nad mez detekce, jsou častější pro sportovní akceleraci než pro normální, když je brán v potaz poměr počtu průjezdů daného typu a počtu průjezdů nad mez detekce.

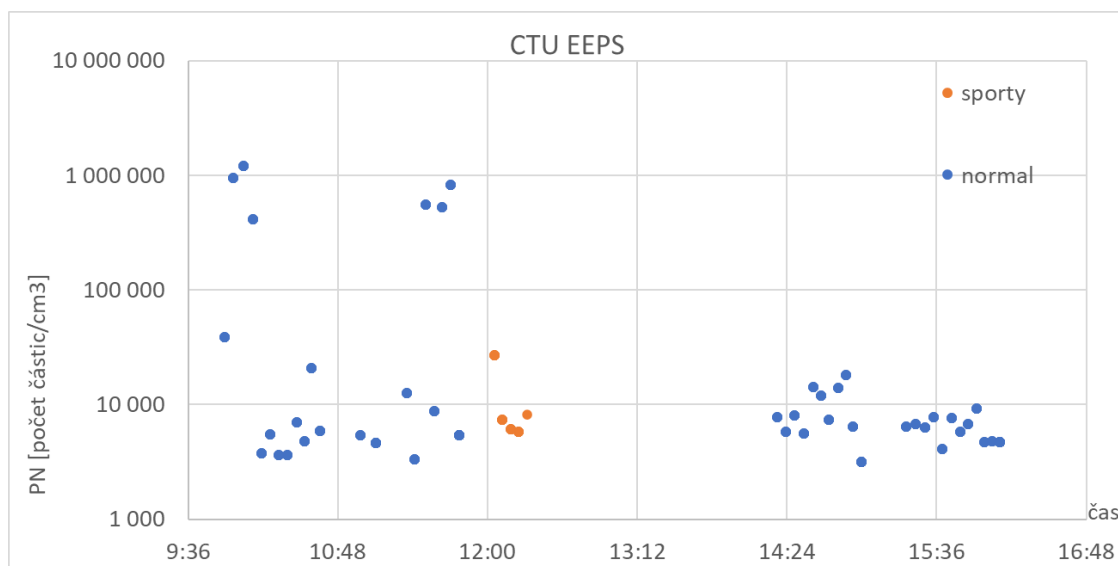


Obr. 63- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Truck z EEPS CTU

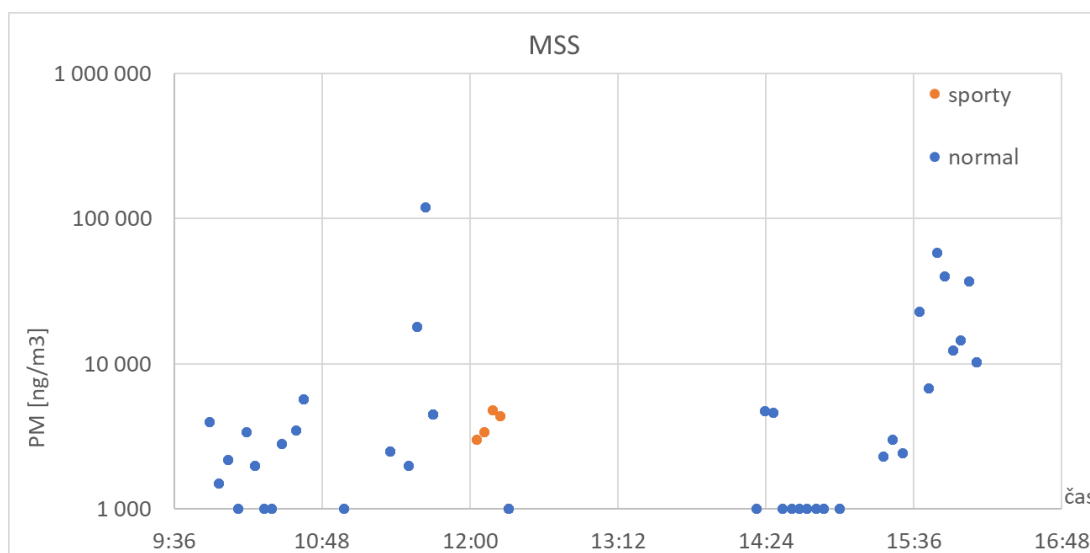


Obr. 64- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Truck z MSS

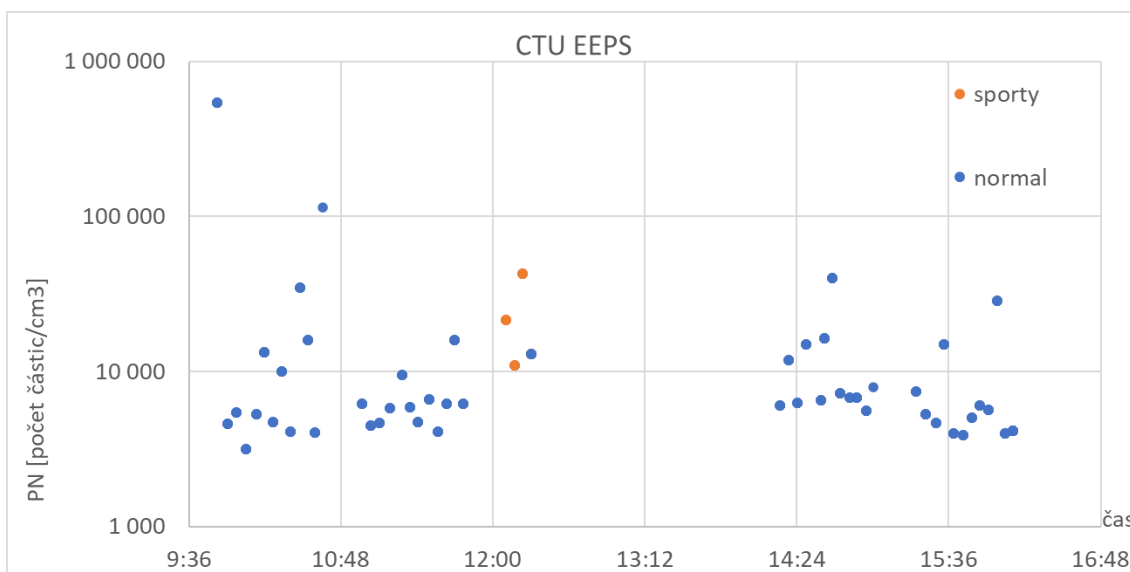
Na Obr. 63 a Obr. 64 jsou zobrazeny průjezdy vozidla Truck, který byl opět vybaven filtrem pevných částic. Píkové hodnoty zaznamenané pomocí CTU EEPS jsou výrazně méně rozptýlené kolem meze detekce a zdá se, že typ akcelerace nemá vliv na naměřené koncentrace částic. Stejně tak tomu je i v případě MSS, kde jsou hodnoty sice více rozptýlené, avšak opět se nezdá, že by měla sportovní akcelerace větší vliv na záchyt větší koncentrace částic.



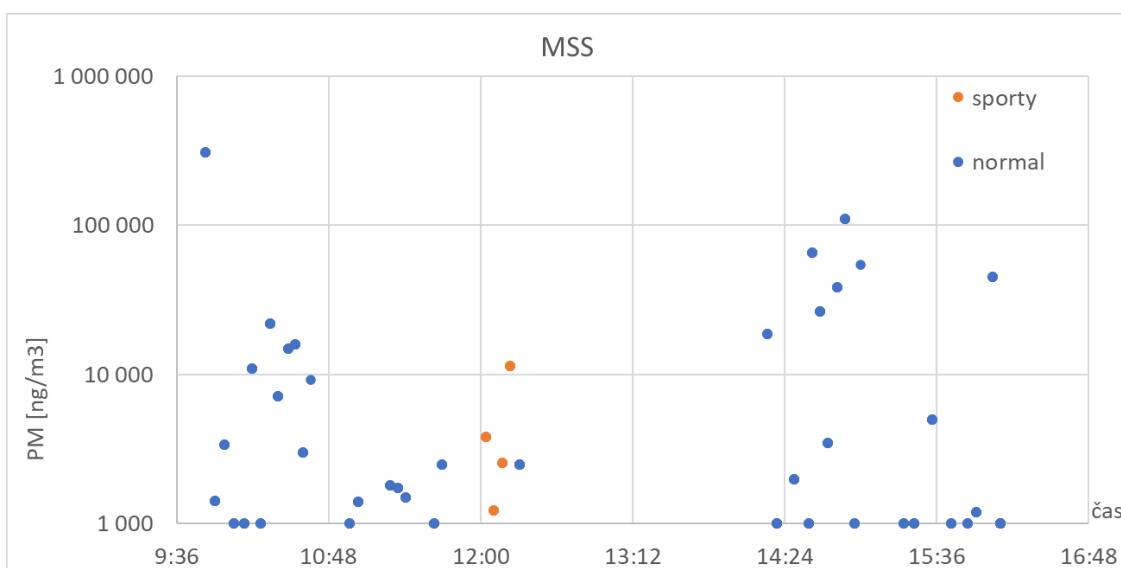
Obr. 65- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Scooter z EEPS CTU



Obr. 66- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Scooter z MSS



Obr. 67- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Motorcycle z EEPS CTU



Obr. 68- Porovnání vlivu akcelerace vozidla Motorcycle z MSS

Na Obr. 65, Obr. 66, Obr. 67 a Obr. 68 jsou vidět průjezdy dvou vozidel Scooter a Motorcycle. Obě vozidla se neúčastnila průjezdů poslední části tohoto dne, kdy ostatní vozidla jezdila sportovní akcelerací. Je tedy k dispozici z každého přístroje 3 až 5 průjezdů se sportovním zrychlením. Z dostupných dat se zdá, že pro tato vozidla nemá typ akcelerace výraznější vliv.





## 7 Diskuze

U pilotního experimentu vykazovala data vysoký šum, což mohlo být způsobeno několika důvody. Jedním z nich je, že přístroje nebyly dostatečně vyčištěné a zkališované před začátkem měření, protože se jednalo pouze o pilotní experiment, který měl pouze nastínit možnosti dalšího vývoje, nebyl na to kladem takový důraz. Dalším možným důvodem vyššího šumu mohl být samotný průjezd vozidel, vzhledem k faktu, že nebyl veden žádný záznam o projíždějících vozidlech, mohl být způsoben zdánlivý šum vozidla, která měla menší emise částic oproti velkým znečišťovatelům. Přirozeně je ale při měření v Praze vyšší koncentrace pozadí než při měření na testovacím okruhu v Nizozemsku. Píky naměřené jednotlivými přístroji, u kterých je předpoklad, že patří stejnému vozidlu byly zaznamenány v různých časech. To může být způsobeno několika vlivy, ale hlavně rozdílnou dobou mezi tím než částice, která opustí výfukový systém vozidla, doletí přímo do vyhodnocovací části přístroje. Tato doba závisí na délce trubice, kterou je vzorek nasáván a také šířením spalin za vozidlem. Předpokládá se, že doprostřed vozovky částice doletí dříve než na její okraj. Tato doba se velmi často mění, z důvodů různého proudění za vozidly nebo změnou počasí. Proto nelze stanovit stejnou konstantu časové synchronizace pro všechny průjezdy daného měření. Pro účely určení nadměrného znečišťovatele emisí částic je ideální záznam, kde je píková koncentrace co nejvyšší, avšak doba ovlivnění dat po průjezdu co nejnižší. Je otázkou, co je výhodnější? Z okraje jízdního pruhu při pilotním experimentu naměřilo EEPS nižší koncentrace oproti středu, ale mnohem kratší odezvu na průjezd což je výhodnější. V případě, že bude píková koncentrace dostatečná i z okraje vozovky pro identifikaci vozidla s nadměrnými emisemi, zdá se být v některých případech výhodné vzorkovat i z okraje.

Při selekci relevantních kanálů EEPS z měření v Lelystadu se u průjezdu vozidla Touran ukázalo, že velikostní kanály do 12,4 nm se podílejí velmi málo na tvorbě píku po průjezdu. Stejně tak částice větší než 191,1 nm. Odebráním těchto kanálů by mohlo být dosaženo menšího šumu pozadí tedy menší směrodatné odchylky naměřených koncentrací mimo průjezd, a tedy spolehlivějšímu přiřazení naměřených koncentrací konkrétnímu vozidlu. Otázkou je, zda je nutné používat takto přesné přístroje, zda by nebylo možné využít méně přesné klasifikátory částic, které budou obdobně schopné rozlišit řádové rozdíly v koncentraci částic mezi vozidly, která jsou v pořádku z hlediska emisí a s vozidly, která vypouští větší množství částic, než by měla. Využití méně přesných přístrojů, které nebudou rozlišovat částice dle velikosti, by mohlo výrazně zlevnit celé měření.

Z vyhodnocení délky odezvy na průjezd je patrné, že pokud nemají být data o průjezdu daného vozidla ovlivněna průjezdem vozidla před ním musí být jejich rozestup vyšší, než je doba odezvy na daný průjezd. Pro některá vozidla to bylo u dat z EEPS okolo 7 sekund. V případě využití pokročilých vyhodnocovacích matematických postupů, kdy by se do



výpočtů promítla naměřená data z předchozího průjezdu a rozestup těchto vozidel, by se mohl vypočítat přírůstek naměřené koncentrace pro vozidlo, s menším rozestupem, než je doba odezvy na průjezd. Pro tento výpočet by bylo nutné určit průběh ředění spalín v závislosti na čase, který závisí opět na mnoha okolních vlivech.

V porovnání místa odběru vzorku při vyhodnocování koncentrace částic bylo hlavně u průjezdů vozidla Touran vidět, že při vzorkování ze středu jízdního pruhu jsou emise částic až o řád vyšší oproti vzorkování z okraje vozovky. Rozdíl koncentrací může být způsoben mírou zředění výfukových plynů, než dorazí k odběrnému místu, ale také chováním vzduchu za projíždějícím vozidlem, jak je vidět na Obr. 15 na straně 26. Výsledkem může být větší pravděpodobnost záchytu vozidla s nadměrnými emisemi při vzorkování ze středu jízdního pruhu, ale také delší ovlivnění výsledků pro průjezdu vozidla, než se koncentrace částic dostane opět na úroveň pozadí.

Při porovnání EEPS a MSS je potřeba vzít v potaz, že naměřené koncentrace pomocí MSS byly zkreslené, protože při přejíždění trubice vznikaly tlakové rázy, které se promítly do výsledků výraznou zápornou hodnotou koncentrace částic. Je to způsobeno tím, že na rozdíl od EEPS MSS pracuje na principu fotoakustiky, která je citlivá na jakékoliv rázy. Tento problém by mohlo vyřešit umístění trubice, tak aby nebyla přímo přejížděna nebo aby se při průjezdu nedeformovala.

Pro porovnání jízdních podmínek byla využita pouze data z klasifikátorů částic, velmi zajímavé by bylo, pokud by mohla být využita i data o koncentraci plynných emisí. To by mohlo vytvořit lepší představu o tom, zda je vozidlo opravdu nadměrným znečišťovatelem nebo má pouze v tomto režimu sportovní akcelerace vysokou spotřebu, která by se ukázala zvýšenou koncentrací CO<sub>2</sub>. Bohužel FTIR CTU neměřilo spolehlivě a FTIR CZU vzorkovalo z okraje vozovky, a navíc pouze část dne, proto data z těchto přístrojů nebyla použita pro toto srovnání. Jelikož při většině průjezdů vozidla akcelerovala normálně a ve výrazně menším počtu akcelerovala sportovně byl vzorek pro porovnání obou typů akcelerace velmi malý. Z dostupných dat bylo však i tak zřejmé že typ akcelerace má velmi malý vliv na výsledné emise částic. Je otázkou proč, když má vozidlo při sportovnější akceleraci většinou vyšší spotřebu, jak je možné, že se to neprojeví na množství vypuštěných částic. Jedním z možných vysvětlení je rozdílné chování oblaku spalín za vozidlem při různé akceleraci. Může se stát, že při sportovní akceleraci se vzduch za vozidlem více rozvíří a spaliny se rychleji zředí a tím se vyrovná rozdíl v množství vypuštěných částic.



## 8 Závěry

V rámci této diplomové práce byla vyhodnocena dvě různá měření. První bylo pilotní měření a druhé bylo měření z Lelystadu v rámci projektu CARES. U měření z Lelystadu bylo dále vyhodnoceno přes 500 průjezdů, které byly měřeny několika přístroji.

Cílem pilotního experimentu bylo zjistit, zda má přínos vzorkování ze středu jízdní dráhy. Šlo tedy o porovnání vzorkování částic z okraje vozovky oproti vzorkování ze středu jízdního pruhu. Ukázalo se, že maximální koncentrace po pravděpodobném průjezdu jsou až řádově vyšší při vzorkování ze středu jízdního pruhu a celková plocha shora omezená nárůstem koncentrace po průjezdu a zdola koncentrací pozadí byla větší než při vzorkování z okraje vozovky. Bylo tedy shledáno, že vzorkování ze středu jízdního pruhu může být přínosem pro přesnější a kvalitnější povědomí o emisích měřeného vozidla.

Dále již z dat z experimentálního projektu CARES byla provedena analýza relevantních velikostních kanálů EEPS pro měření přírůstku koncentrace částic po průjezdu vozidla. Z analýzy vyplynulo, že pro nadměrné znečišťovatele, které představovalo vozidlo Touran, je důležité snímat hlavně velikostní kanály od 12,4 nm do 192,1 nm ostatní kanály jsou v nárůstu koncentrace velmi málo zastoupeny. To znamená, že nejvyššího poměru signálu ku šumu bylo dosaženo pro kanály odpovídající průměru částic v rozmezí od 12 do 192 nm. Vyhodnocení délky odezvy na průjezd může přispět k určení minimálních rozestupů vozidel pro to, aby se jejich naměřené výsledky navzájem neovlivňovaly. Odezva u snímání zvýšené koncentrace CO<sub>2</sub> byla nejdelší pro FTIR CTU, a to až 11 sekund pro průjezd vozidla Truck. Délka odezvy na zvýšené koncentrace částic byla až 7 sekund pro CTU EEPS, které vzorkovalo ze středu jízdní dráhy. Z tohoto lze usuzovat, že pro spolehlivé přiřazení naměřených emisí danému vozidlu musí být rozestup mezi vozidly minimálně 11 sekund v případě oxidu uhličitého a minimálně 7 sekund v případě částic. V případě využití pokročilejších matematických postupů při vyhodnocování naměřených dat by mohl být vyčíslen přírůstek danému průjezdu i v případě, že se dva průjezdy navzájem ovlivňují.

Z porovnání umístění vzorkovací sondy se ukázalo, že mnohem spolehlivěji byly naměřeny nadměrně vysoké emise částic u vzorkování ze středu jízdního pruhu. U vozidel Touran a Caddy, které v tu dobu neměly filtr pevných částic, naměřil výrazně vyšší hodnoty CTU EEPS, který vzorkoval ze středu jízdního pruhu, kdežto EEPS van často naměřil koncentrace pouze na mezi detekce.

Při porovnání dvou různých klasifikátorů částic EEPS a MSS bylo zjištěno, že velmi často vykazují naměřené maximální hodnoty vysoký rozptyl pro MSS oproti EEPS. V některých částech měření pro vozidlo Caddy jsou data velmi podobná a vykazují minimální rozdíly. V jiných částech naopak byla data velmi rozdílná a neodpovídala množství částic, které by



měla být naměřena vzhledem ke stavu vozidla. Důvodem nepřesností může být vysoká citlivost MSS na přejezd trubice projíždějící vozidlem.

Z porovnání vlivu jízdních podmínek tedy typu akcelerace na emisi částic vozidel vyplývá, že rozdíly mezi sportovnější a normální akcelerací jsou minimální, pouze v některých případech přispívá sportovní akcelerace k větší jistotě záchytu nadměrného znečišťovatele.

Shrnutím by tedy bylo, že metoda ověření funkce filtru pevných částic pomocí dálkového měření by mohla být použitelná bez dalších úprav pro snímání pomocí EEPS ze středu jízdního pruhu, které by se mohlo zpřesnit vyloučením některých velikostních kanálů, a v případě průjezdu vozidel většími rozestupy než 11 sekund. Pro použití MSS by byla nutná úprava vzorkovací sondy pro vzorkování ze středu jízdního pruhu. Při použití vhodného vyhodnocovacího algoritmu by mohly být snímána vozidla s menšími rozestupy. Dané výsledky jsou pro průjezdy vozidel pouze jednosměrnou komunikací. Pro měření v obou směrech nebo více jízdních pruzích by bylo nutné další zkoumání. Nejlepším umístěním měřicí aparatury, vzhledem k těmto podmínkám měření, by bylo v místech, kde je pouze jednosměrný provoz, kde jsou vozidla nucena akcelerovat a mají co největší rozestupy.



## 9 Literatura

- [1] Ambient (outdoor) air pollution. World Health Organization [online]. 22 September 2021 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [2] Explaining road transport emissions — A non-technical guide. European environment agency (2016) [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/explaining-road-transport-emissions>
- [3] TAKÁTS, Michal. Měření emisí spalovacích motorů. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01632-3.
- [4] Emise výfukových plynů [online]. In: . [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://cv.vscht.cz/files/uzel/0014041/0013~c83NLE5VKDu8N600Ox9IJWcoFORU5h1dDwA.pdf?redirected>
- [5] SKÁCEL, Jan, Roman TURZA, Petr VOMÁČKA, Michal VOJTÍŠEK a Martin PECHOUT. Zpráva o technickém stavu vozového parku na území hl. města Prahy za rok 2017.
- [6] MACHALOVÁ, Milena. Metodický postup měření emisí vozidel ve stanicích měření emisí (SME), ve stanicích technických kontrol (STK) a při provádění technických silničních kontrol (TSK) [online]. In: . 18.9. 2019 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Ministerstvo/Vestniky-dopravy/Vestniky-dopravy-2019/Vestnik-dopravy-10-2019/Metodicky-postup-mereni-emisi-18-9-2019.pdf.aspx>
- [7] 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 [online]. 2022, 816 [cit. 2022-07-19]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151609
- [8] AIP automotive: Portable Emission Measurement PEMS / RDE [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.aip-automotive.de/en/Products/Emission-Technology/Portable-Emission-Measurement>
- [9] BERNARD, Yoann, John GERMAN a Rachel MUNCRIEF. WORLDWIDE USE OF REMOTE SENSING TO MEASURE MOTOR VEHICLE EMISSIONS [online]. APRIL 29, 2019 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://theicct.org/publication/worldwide-use-of-remote-sensing-to-measure-motor-vehicle-emissions/>
- [10] HUANG, Yuhan, Bruce ORGAN, John L. ZHOU, Nic C. SURAWSKI, Guang HONG, Edward F.C. CHAN a Yat SHING YAM. Remote sensing of on-road vehicle emissions: Mechanism, applications and a case study from Hong Kong. 19 March 2018
- [11] BISHOP, Gary A., Rachel HOTTOR-RAGUINDIN, Donald H. STEDMAN, et al. On-road Heavy-duty Vehicle Emissions Monitoring System. Environmental Science & Technology [online]. 2015, 49(3), 1639-1645 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es505534e
- [12] XIE, Jingwei, Chun-Ho LIU, Ziwei MO, Yuhan HUANG a Wai-Chuen MOK. Near-field dynamics and plume dispersion after an on-road truck: Implication to remote



- sensing. Science of The Total Environment [online]. 2020, 748 [cit. 2022-05-20]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141211
- [13] MERCK: What is FTIR Spectroscopy? [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ftir-spectroscopy>
- [14] Research and Development Indian institute of technology Kanpur: Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: [https://www.iitk.ac.in/dordold/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=221&Itemid=240](https://www.iitk.ac.in/dordold/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=221&Itemid=240)
- [15] VOJTISEK-LOM, Michal, Alden Fred ARUL RAJ, Petr JINDRA, David MACOUN a Martin PECHOUT. On-road detection of trucks with high NOx emissions from a patrol vehicle with on-board FTIR analyzer. Science of The Total Environment [online]. 2020, 738 [cit. 2022-05-24]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139753
- [16] Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: [https://tsi.com/getmedia/12b02ee1-ef84-44c0-a039-3e2e6b316235/3090\\_EEPS-Spectrometer-Spec-Sheet-US-2980244A?ext=.pdf](https://tsi.com/getmedia/12b02ee1-ef84-44c0-a039-3e2e6b316235/3090_EEPS-Spectrometer-Spec-Sheet-US-2980244A?ext=.pdf)
- [17] BOSMAL: TSI EEPS 3090 spectrometer [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.bosmal.eu/index.php?modul=urzadzenie&id=1488808198>
- [18] Bagustris@wordpress: PhotoAcoustic Imaging and its Application [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://bagustris.wordpress.com/2012/01/24/photoacoustic-imaging-and-its-application/>
- [19] AVL: MSSplus - AVL Micro Soot Sensor [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.avl.com/-/mssplus-avl-micro-soot-sensor>
- [20] CARES: Remote Emission Sensing Campaigns [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://cares-project.eu/remote-emission-sensing-campaigns/>
- [21] Google maps [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/@52.4570781,5.514988,2164m/data=!3m1!1e3?hl=cs>