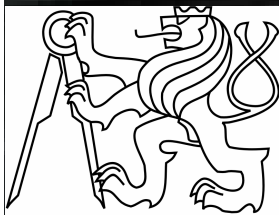


# Inovativní metody pro sledování toxicity výfukových emisí ze spalovacích motorů v podmínkách městského provozu

**LIFE10 ENV/CZ/651**



**Doc. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.**

**Centrum vozidel udržitelné mobility**

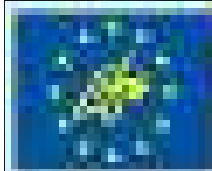
**Fakulta strojní, ČVUT v Praze**

**EU LIFE+ projekt MEDETOX,**

**Technická univerzita v Liberci**

**[michal.vojtisek@fs.cvut.cz](mailto:michal.vojtisek@fs.cvut.cz)**

**tel. (+420) 774 262 854**



**Projekt MEDETOX (LIFE10 ENV/CZ/651)**  
**Inovativní metody pro sledování toxicity výfukových emisí ze spalovacích motorů v podmínkách městského provozu**  
**2011-2016**

**1.223.524 EUR celkový rozpočet, 50% EU, 14% MŽP**  
**Demonstrační projekt**

**Ústav experimentální medicíny AV ČR,  
Technická univerzita v Liberci  
(+ Michal Vojtíšek FS ČVUT v Praze),  
Ministerstvo životního prostředí ČR**

**Městský provoz:**

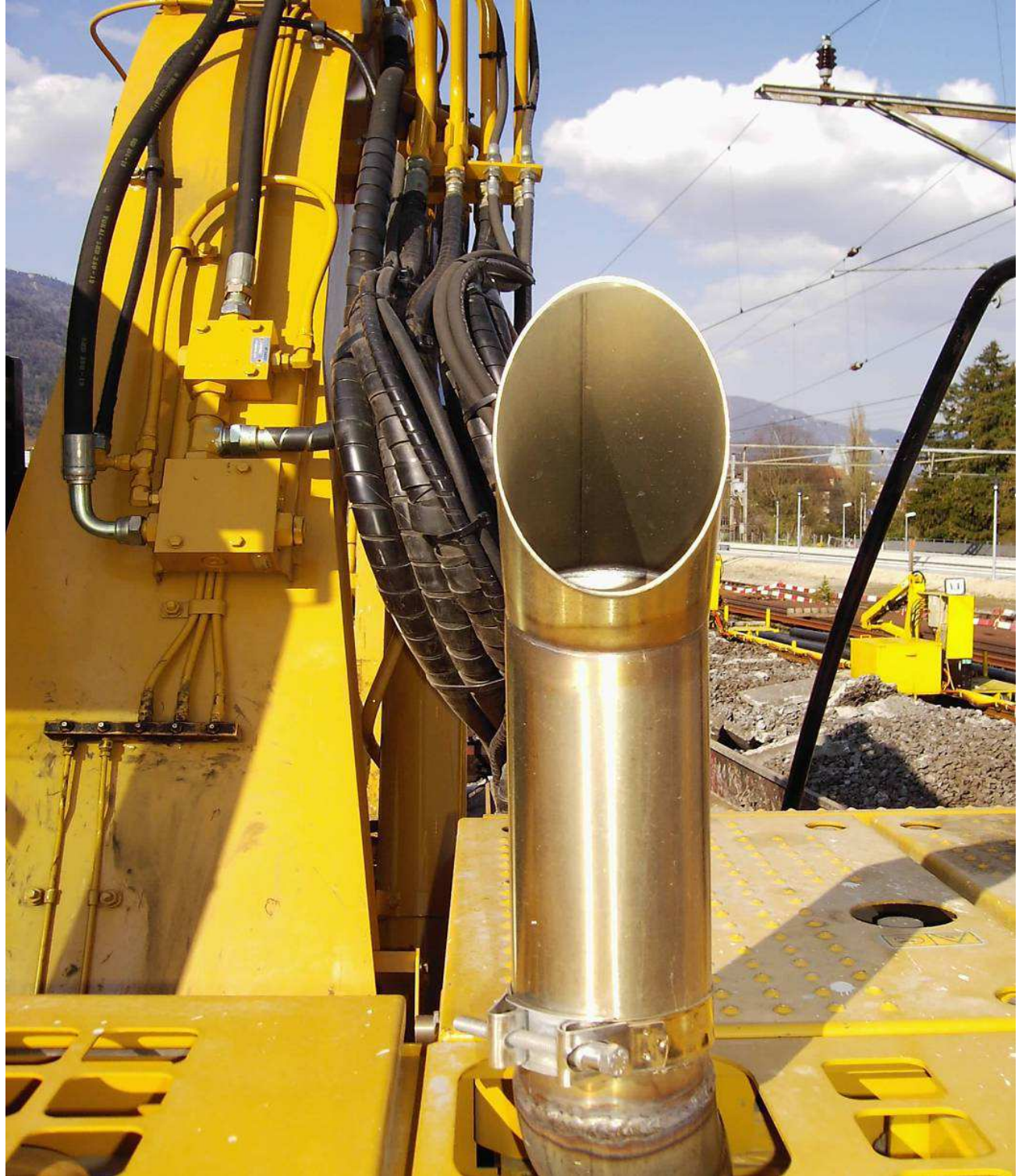
- nejvíce technicky náročný z hlediska emisí**
- nejvyšší míra expozice (blízkost, počet lidí)**



**Spalovací motory  
produkují velmi  
malé a zdraví  
nebezpečné  
částice, a to v těsné  
blízkosti lidí.**

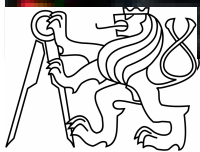
**Technická řešení  
dostupná jsou,  
ale nevyužíváme je  
v dostatečné míře,  
a samotná nestačí.**

**Má-li být zlepšení  
ovzduší dosaženo,  
rozhodování musí  
být kvalifikované  
a podložené fakty.**



# Proč nás zajímají částice?

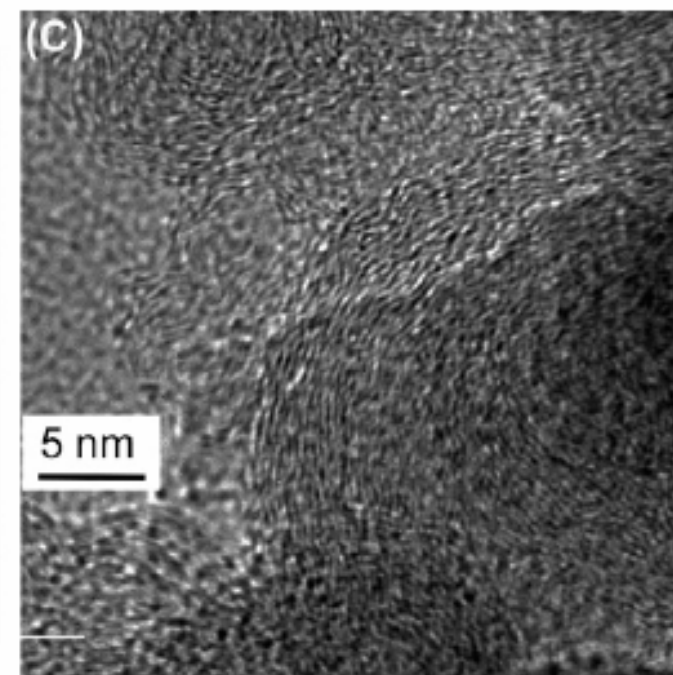
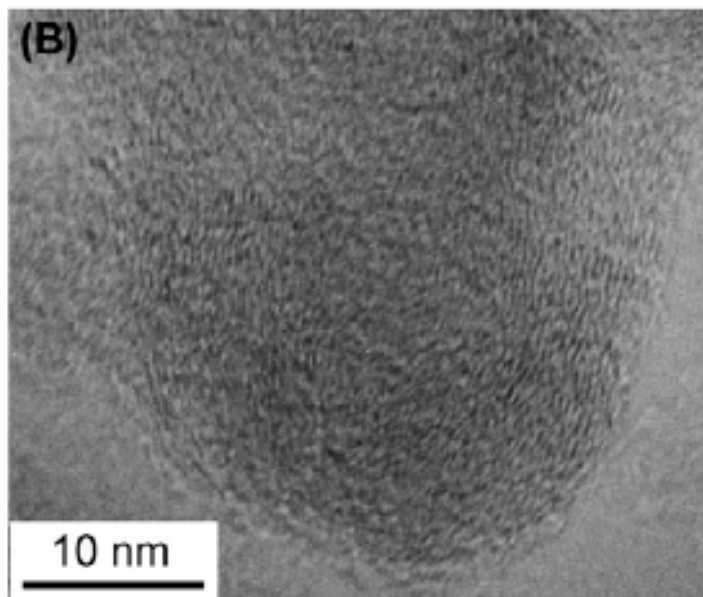
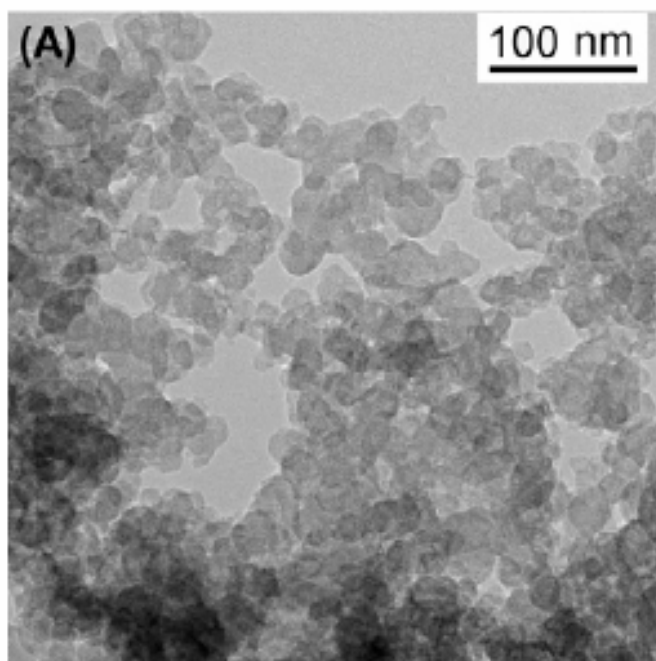
**Částice a ozon v přízemních  
vrstvách atmosféry jsou příčinou  
cca 406 tisíc předčasných úmrtí  
v EU ročně  
(dopravní nehody „jen“ 39 tisíc)**



# Spalovací motory – hlavní zdroj nanočástic

## Částice ve výfukových plynech naftového motoru

**Zvětšíme-li tyto částice na velikost zrnka máku, částice o průměru 10 mikrometrů (součást PM10) bude velká jako meloun.**

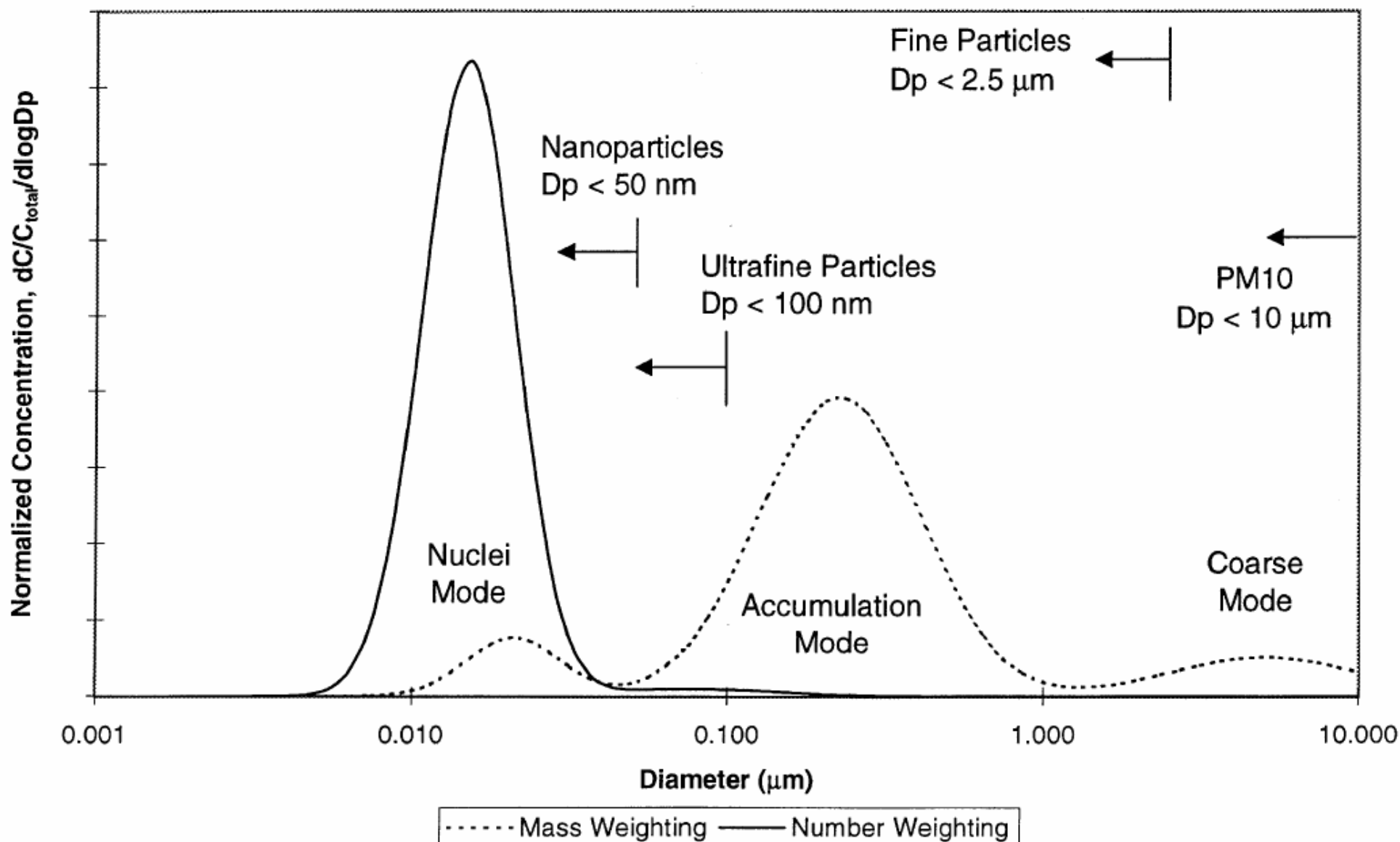


Liati A., Dimopoulos P.E., *Combustion and Flame* 157 (2010) 1658–1670.



# Spalovací motory – hlavní zdroj nanočástic

## Typické velikostní spektrum částic - vznětové motory



Kittelson, *J. Aerosol Sci.* Vol. 29, No. 5/6, pp. 575-588, 1998



# Spalovací motory – hlavní zdroj nanočástic

## Fractional Deposition of Inhaled Particles (Oberdörster)

Zachycovací účinnost dýchacího systému

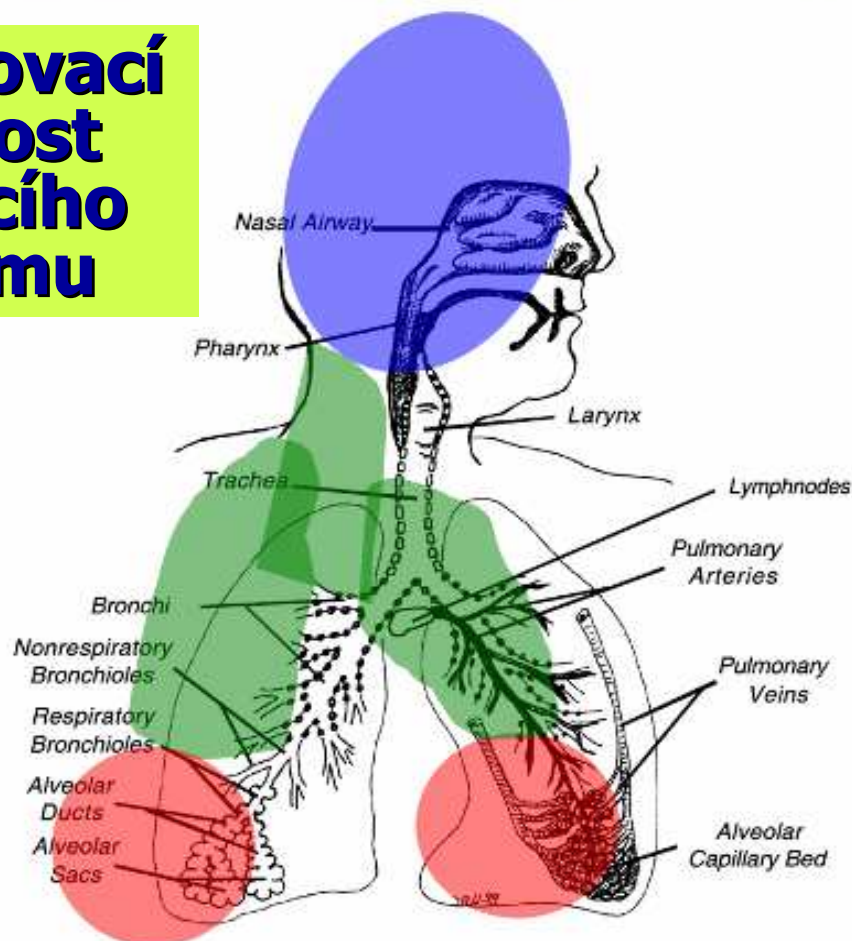
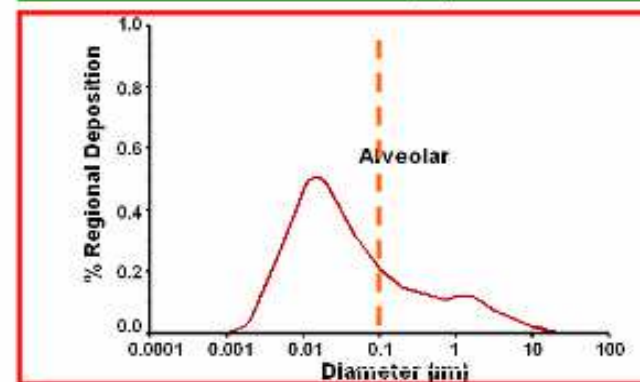
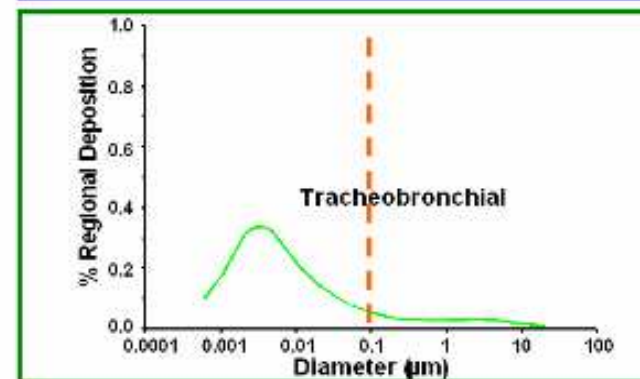
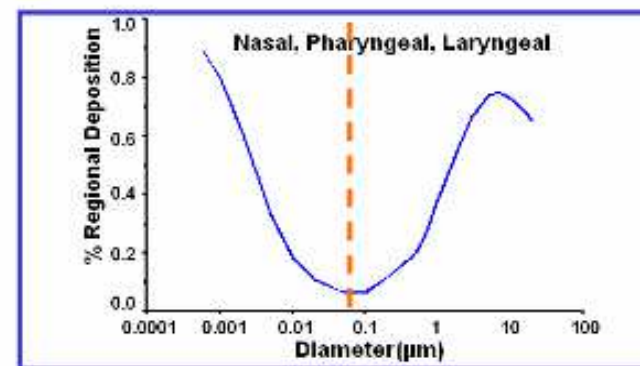


Figure courtesy of J.Harkema

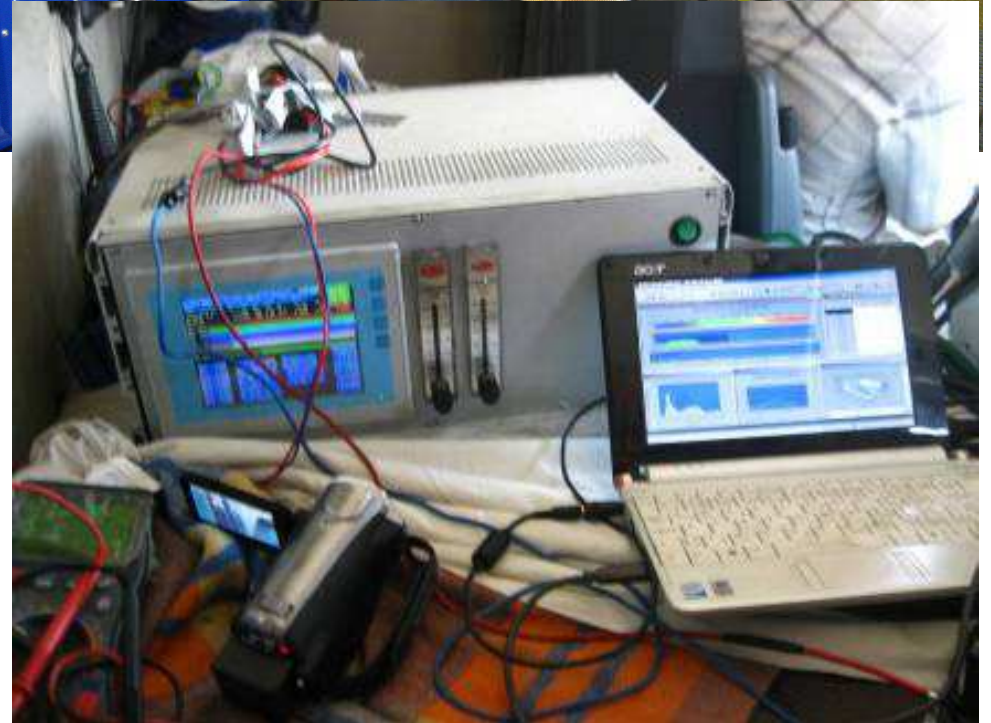
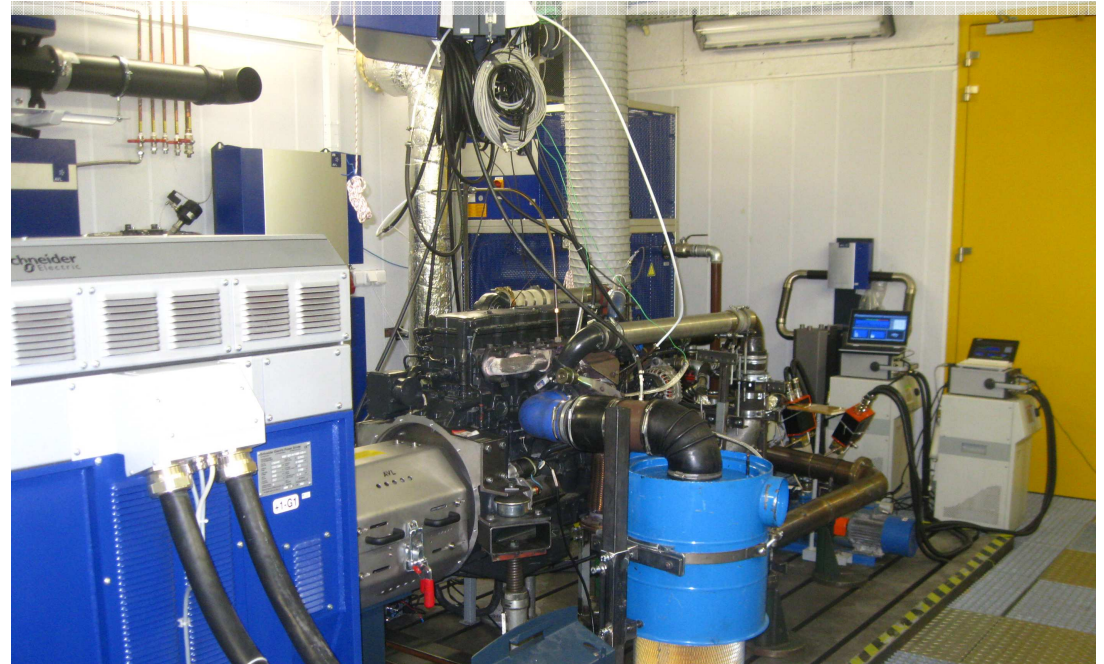


A. Mayer, 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, 2008



# S čím si hrajeme v naší laboratoři

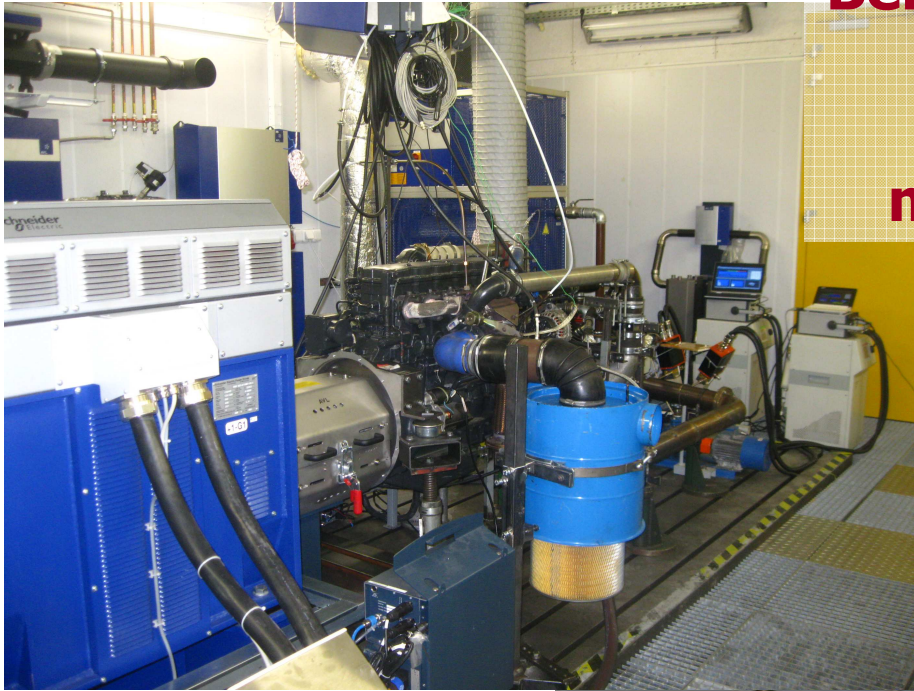
Online měření částic  
VTP Roztoky (ČVUT v Praze)





# Vzorkování částic ve VTP Roztoky (nové laboratoře ČVUT v Praze)

**Benzinové a naftové automobily a motory,  
klasická a alternativní paliva,  
klasické i neregulované emise,  
měření & vysokoobjemové vzorkování**



# S čím si hrajeme v naší laboratoři

**Představení... Co děláme... Měření emisí za reálného provozu**  
... měření nanočástic ve výfukových plynech a jejich vzorkování pro toxikologické analýzy

„Celý den jezdí  
auty sem a  
tam, aby  
ukázali, že  
ježdění autem  
je špatné pro  
životní  
prostředí.“  
(Steve Taylor,  
New York)



**(A taky traktorem, kamionem, lokomotivou, bagrem, autobusem, sekačkou, nakladačem, malým letadlem, na motorce, trajektem, ... )**



# S čím si hrajeme v naší laboratoři

## Měření emisí za reálného provozu – projekt MEDETOX

... měření nanočástic ve výfukových plynech a jejich vzorkování pro toxikologické analýzy



Rychlý klasifikátor  
částic (EEPS)

Přenosný systém – PEMS  
CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>,  
částice

(Jezdíme traktorem, kamionem, lokomotivou, bagrem, autobusem, sekačkou, nakladačem, malým letadlem, na motorce, trajektem, ... )



# S čím si hrajeme v naší laboratoři

**Měření autobusu za provozu  
(s tímto přívěsem měří Centrum dopravního výzkumu)**



# Měření emisí za reálného provozu pomocí přenosných zařízení

## Konstrukce autora



První funkční zařízení  
Pittsburgh, USA, 1996-1999



První komerčně prodávané  
zařízení - OEM-2100  
vyráběné 1999-2002



Foto: Měření na Pennsylvania  
State University, USA, 2001-2003



# Měření emisí za reálného provozu pomocí přenosných zařízení

## Konstrukce autora



**Komerčně prodávané  
zařízení**

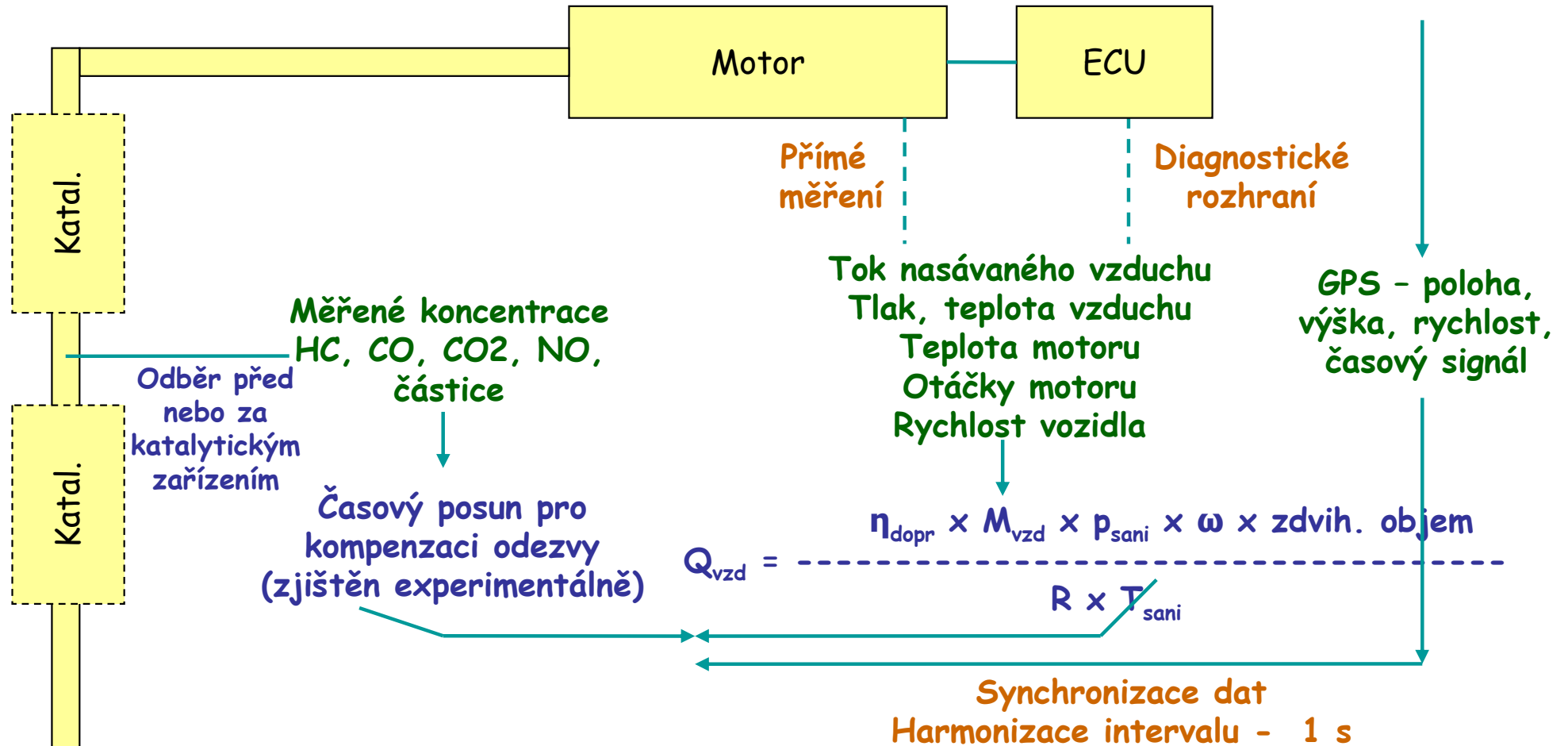
**Montana system  
vyráběný 2002-2005**



**Mobilní spektrometr  
FTIR  
prototyp, 2004-2006**



# Koncept přenosné palubní aparatury - výpočet emisí



1. Výpočet toku výfukových plynů

(tok nasávaného vzduchu, složení vzduchu, paliva, emisí)

2. Hmotnostní tok emisí = const. x koncentrace x tok výf. plynů

3. Spotřeba paliva = emise uhlíku (PM, HC, CO, CO<sub>2</sub>) / podíl uhlíku v palivu

Integrace: Emise na test, km, kg paliva

Záznam všech dat po 1 s

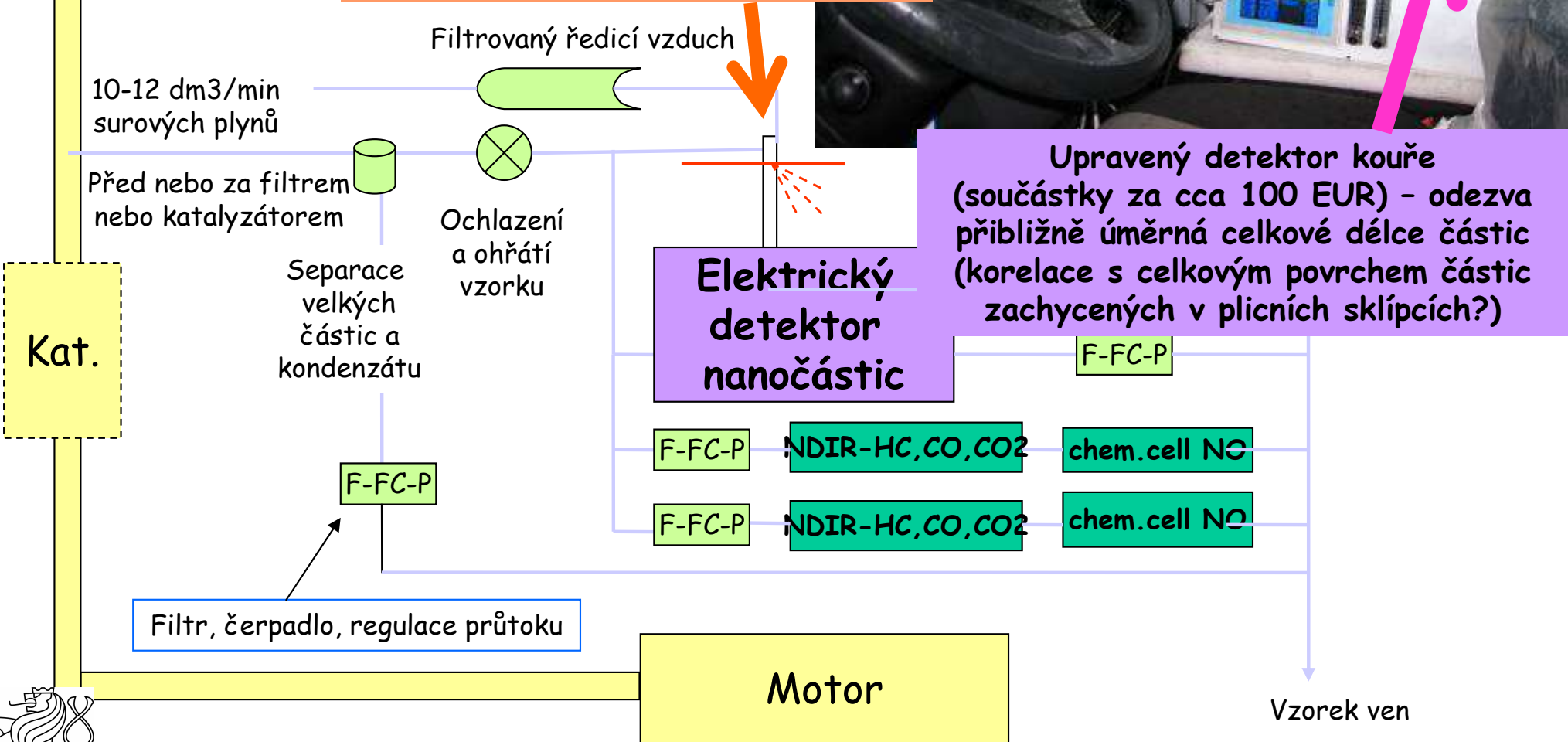


# Palubní měřicí zařízení

Odezva přibližně úměrná hmotnostní koncentraci částic (představte si laserové ukazovátko namířené do cigaretového kouře)

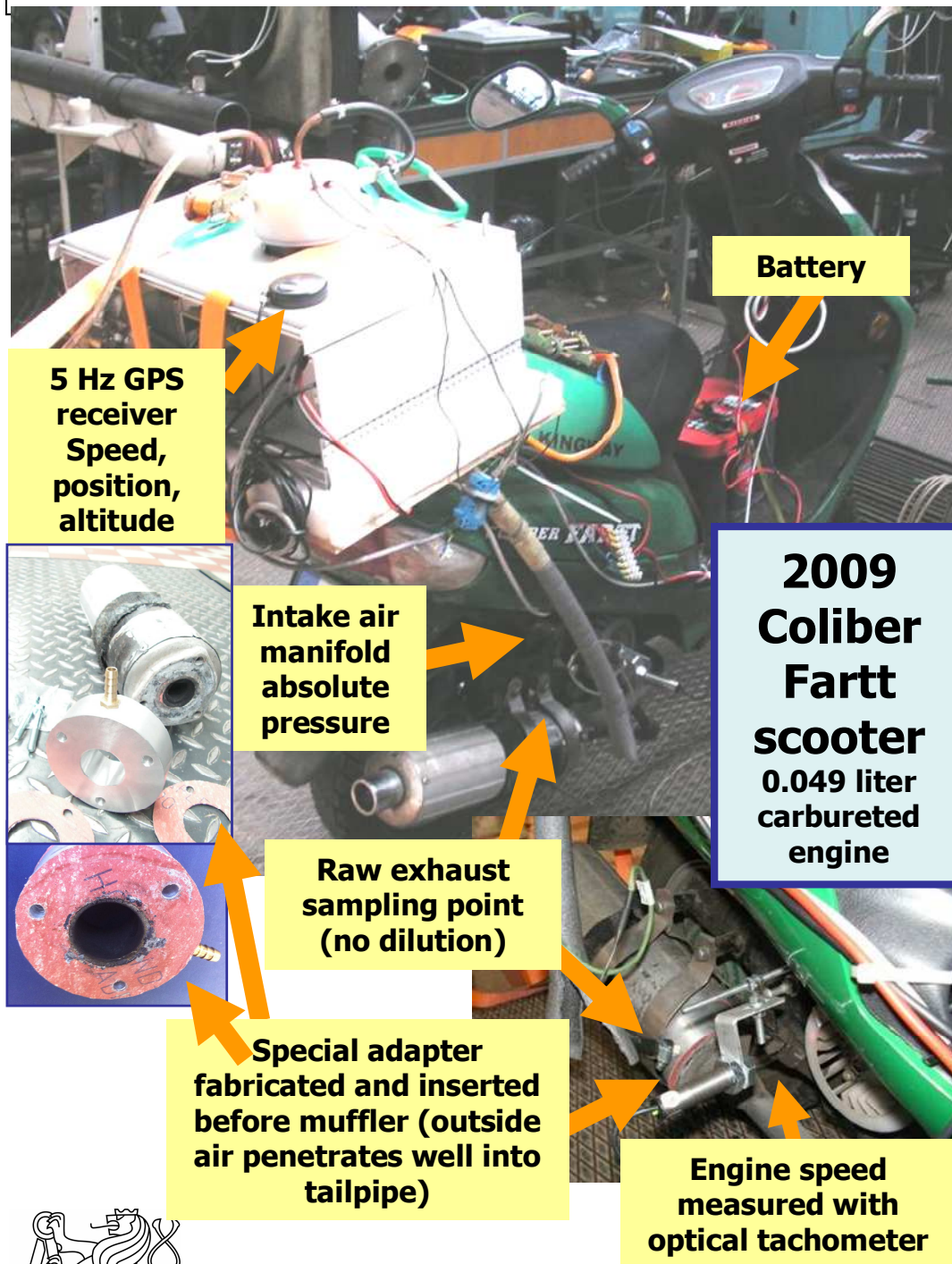


**Nefelometer (rozptyl laserového paprsku)**





# On-board system versatility: Motorcycle to locomotive



## Koncentrace částic:

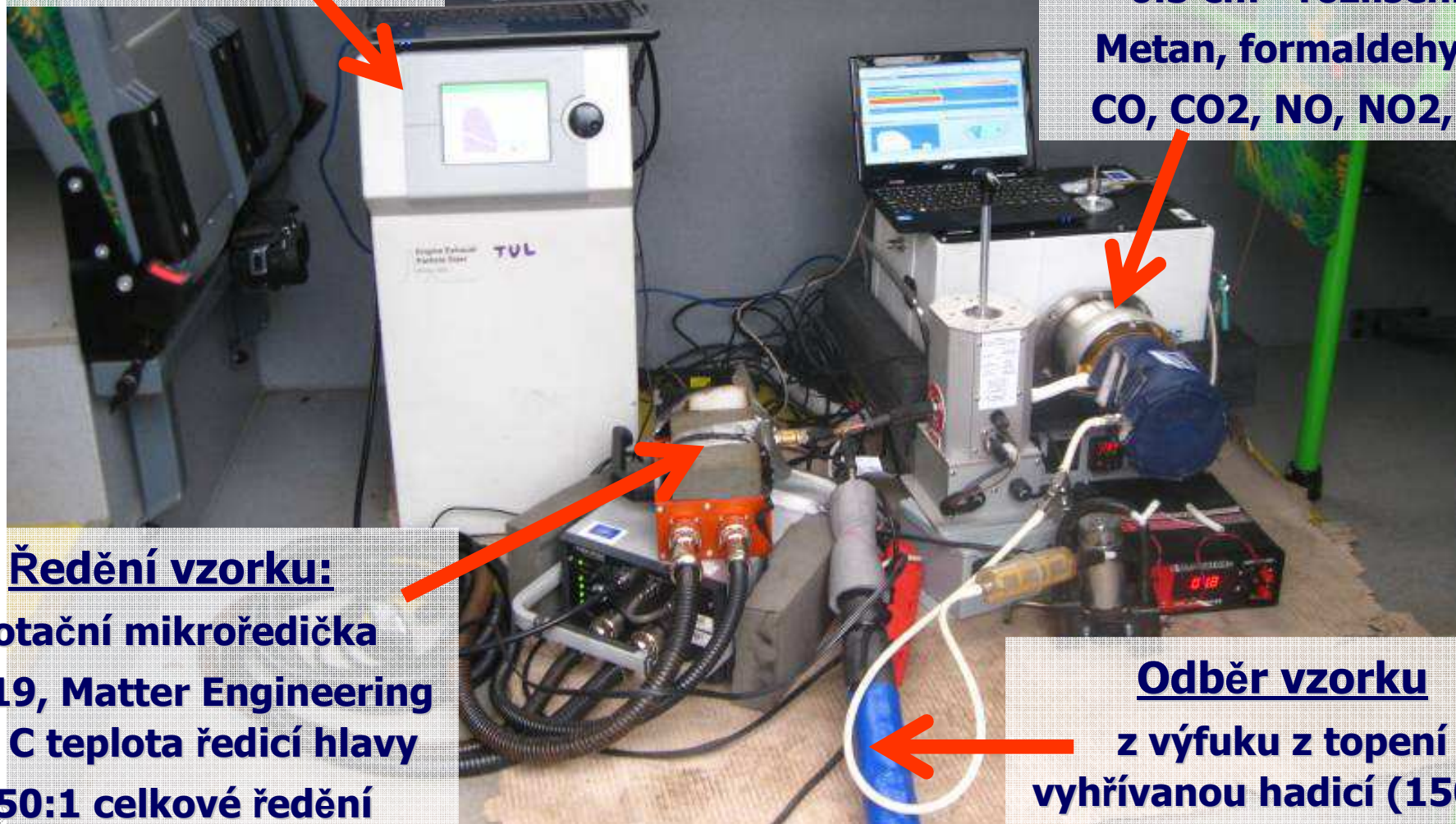
Klasifikátor na bázi mobility v elektrickém poli  
EEPS model 3090, TSI  
průběžné měření částic  
5-560 nm

# MEDETOX

## prototyp

## Plynné emise:

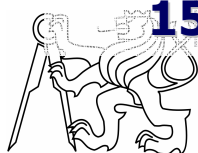
FTIR spektrometr  
MIDAC I-series  
650-4000  $\text{cm}^{-1}$   
6 m optická dráha  
0.5  $\text{cm}^{-1}$  rozlišení  
Metan, formaldehyd,  
CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, ...



## Ředění vzorku:

Rotační mikroředička  
MD-19, Matter Engineering  
150 C teplota ředicí hlavy  
150:1 celkové ředění

Odběr vzorku  
z výfuku z topení  
vyhřívanou hadicí (150 C)



# S čím si hrajeme v naší laboratoři

Měření autobusu za provozu – projekt MEDETOX

Přenosný FTIR analyzátor – online měření mnoha plynných látek



# Toxikologické zkoušky - vzorkování částic vysokoobjemovými vzorkovači s následnou extrakcí částic nebo organických látek a in-vitro studii

## Spolupráce autora s Ústavem experimentální medicíny AV ČR



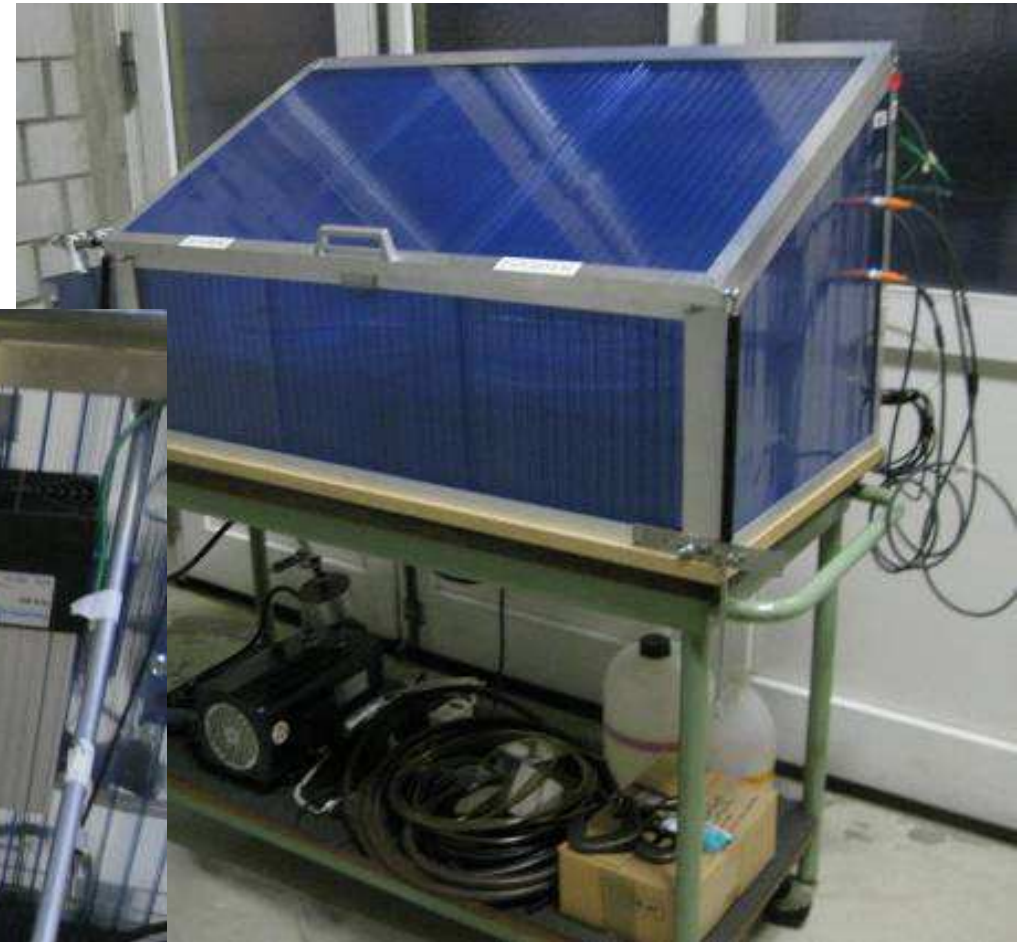
# Toxikologické zkoušky - vystavení řezů plic potkanů výfukovým plynům

Prof. Jean-Paul Morin, Université de Rouen, Francie



# Toxikologické zkoušky - vystavení buněčných kultur výfukovým plynům

Prof. Barbara Rothen, Université de Fribourg, Švýcarsko



# Portable proportional sampling

Diluted sample flow through filter is constant (20-50 dm<sup>3</sup>/min).

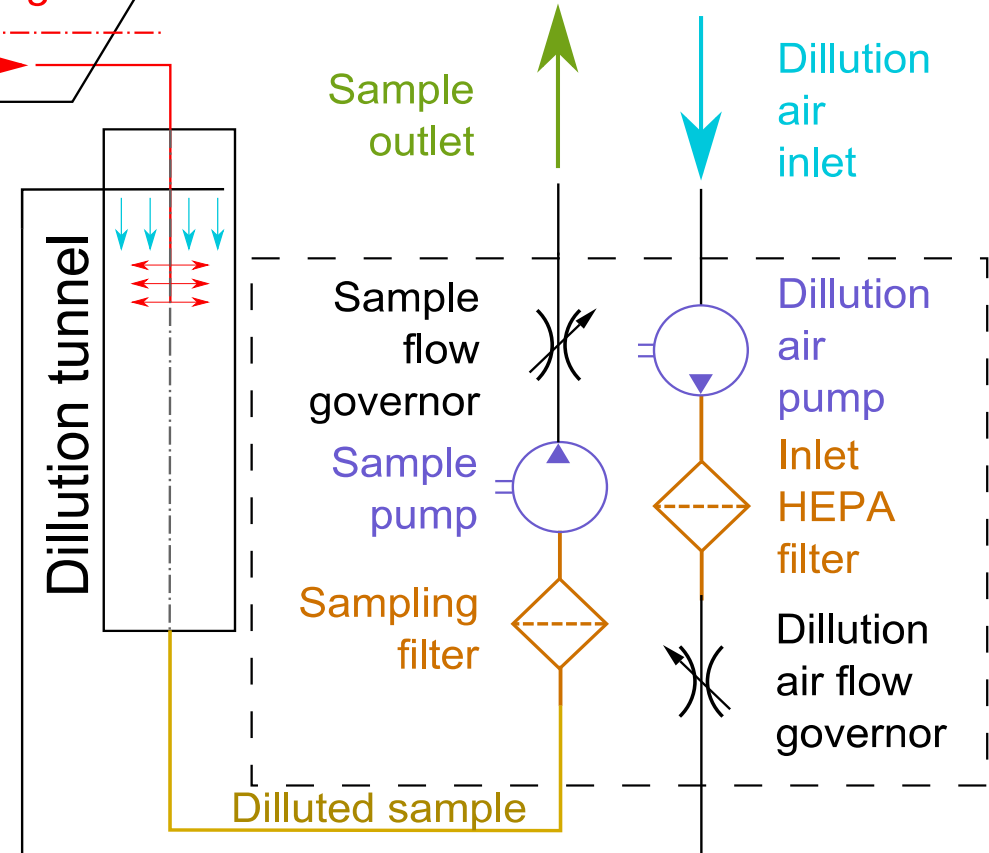
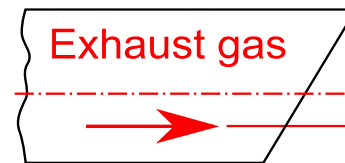
Dilution air flow is regulated so that raw exhaust flow into microdilution tunnel is proportional to the total exhaust flow.

HEPA filtered air is metered into microdilution tunnel near sampling point.

Raw exhaust flow =

= total sample flow – dilution air flow

Exhaust flow ~ measured intake air flow



# A co malé motory? Třeba sekačky? Měření emisí částic malých motorů

**Benzinové motory také produkují částice**

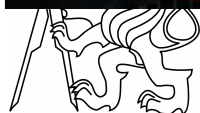
**Malé motory – levné, jednoduché technologie**

**- těsná blízkost operátora**

**- neexistující emisní limity pro částice**



**Spálením 1 litru benzínu v malém motoru vznikne stejně částic jako spálením stovek až tisíců litrů nafty v Euro 6 autobusu.**





# Škola hrou: Studentský projekt TU v Liberci n-butanol a isobutanol jako alternativní paliva

Sériově vyráběný benzinový motor provozovaný na E85, butanol, isobutanol, ...



Dopady nových paliv na emise, ovzduší, zdraví:  
FTIR měří formaldehyd, acetaldehyd, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>...



# Velikostní spektra částic

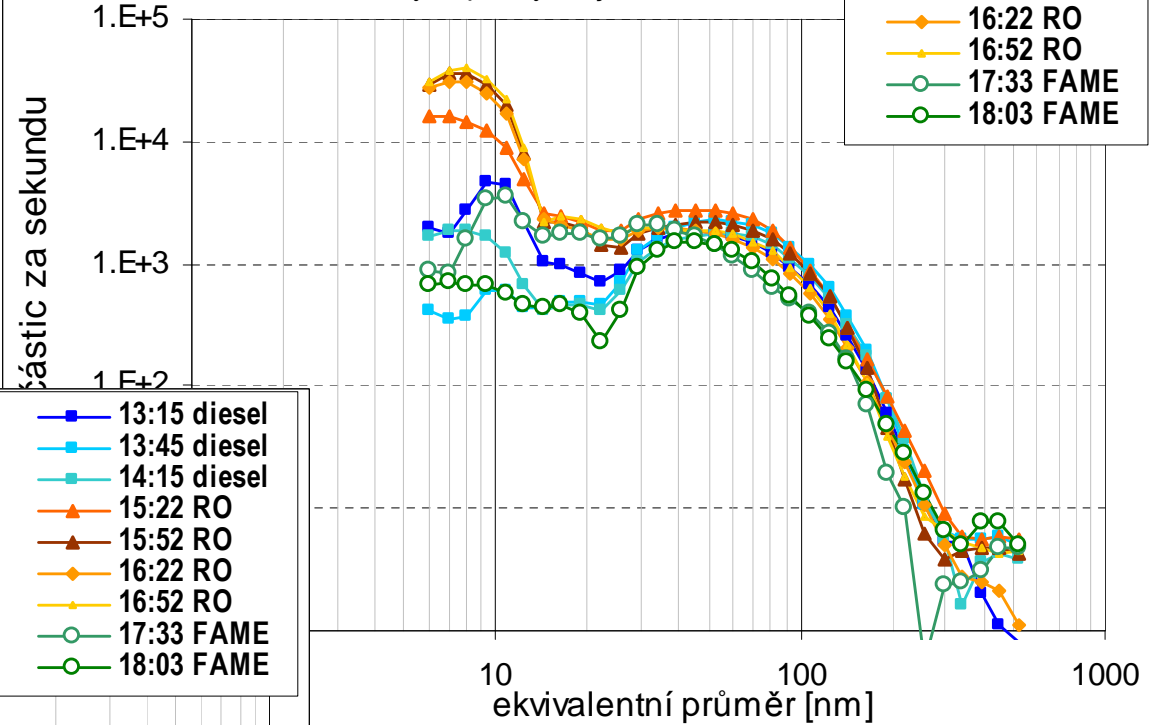
Motor Cummins ISBe4  
Nafta, bionafta,  
Rostlinný olej

Vojtíšek a kol., SAE 2011-24-0104

## Velikostní spektra částic - volnoběh

vznětový motor Cummins ISBe4

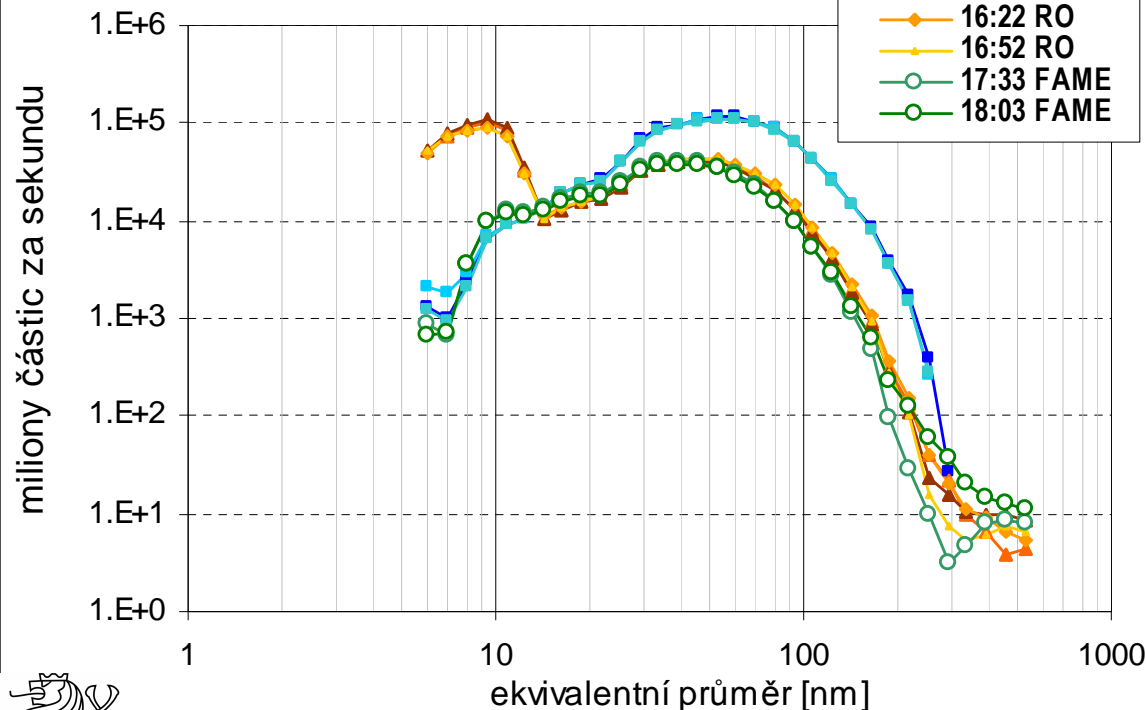
diesel = nafta, RO = ohřátý řepkový olej, FAME = bionafta



## Velikostní spektra částic - plný výkon

vznětový motor Cummins ISBe4

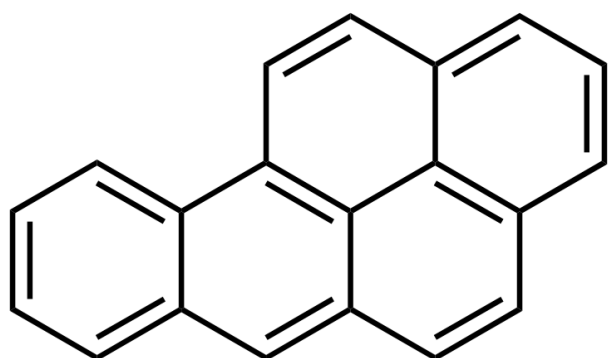
diesel = nafta, RO = ohřátý řepkový olej, FAME = bionafta



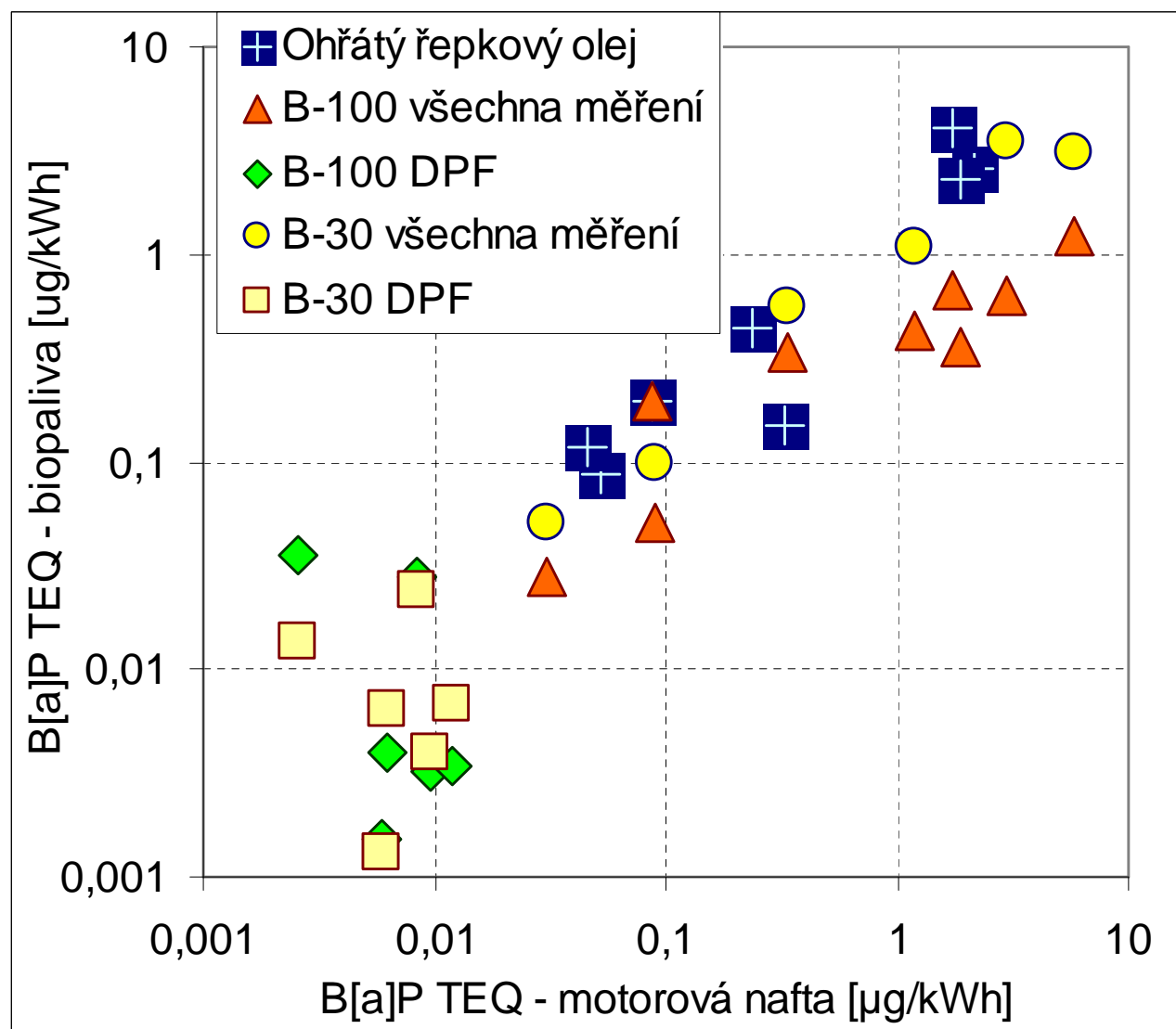
# Emise PAU při provozu na biopaliva vzhledem k motorové naftě

B-30 (směsná nafta), B-100 (bionafta), řepkový olej  
4 motory, 2 laboratoře motorů, 3 analytické laboratoře  
Vojtíšek a kol., Atmospheric Environment, 2012

Střední hodnoty  
toxického ekvivalentu  
(TEQ) benzo(a)pyrenu  
(BaP).

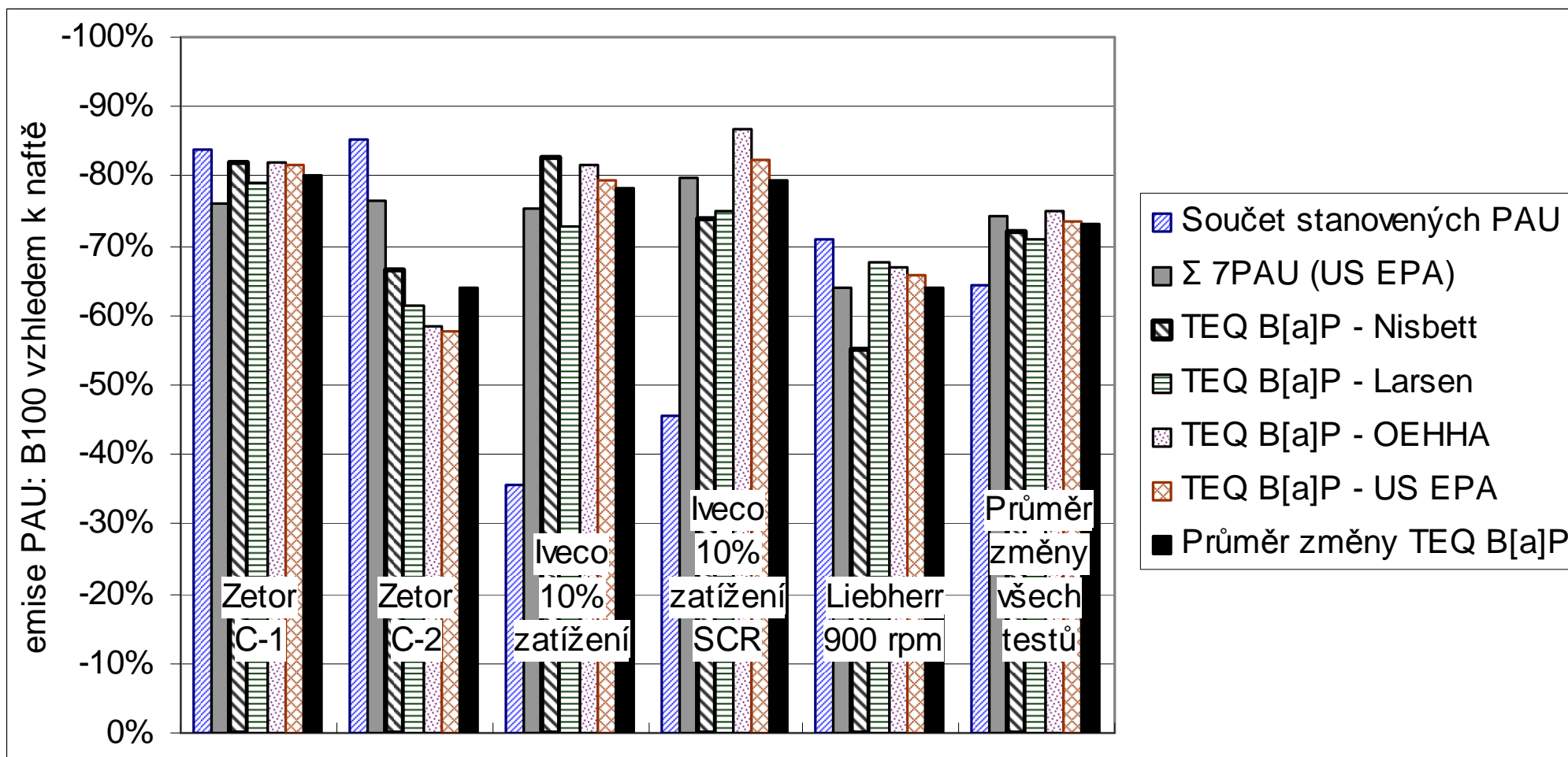


benzo(a)pyren (BaP).



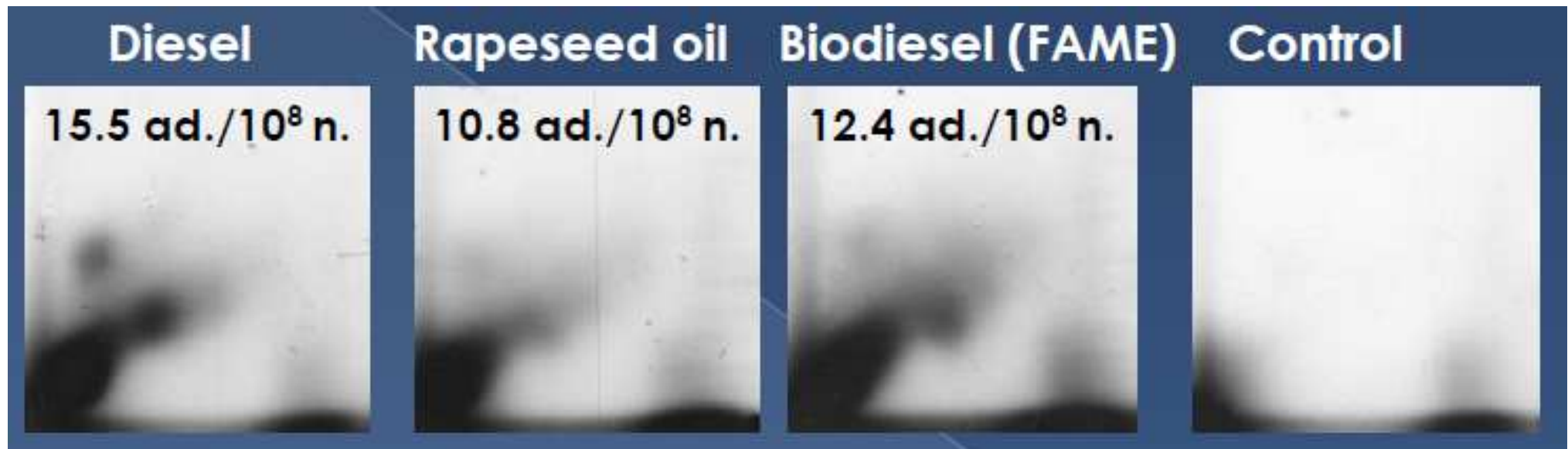
# Emise PAU při provozu na B-100 vzhledem k motorové naftě

4 motory (2 i s DPF), 2 laboratoře motorů, 3 analytické laboratoře  
Vojtíšek a kol., Atmospheric Environment, 2012



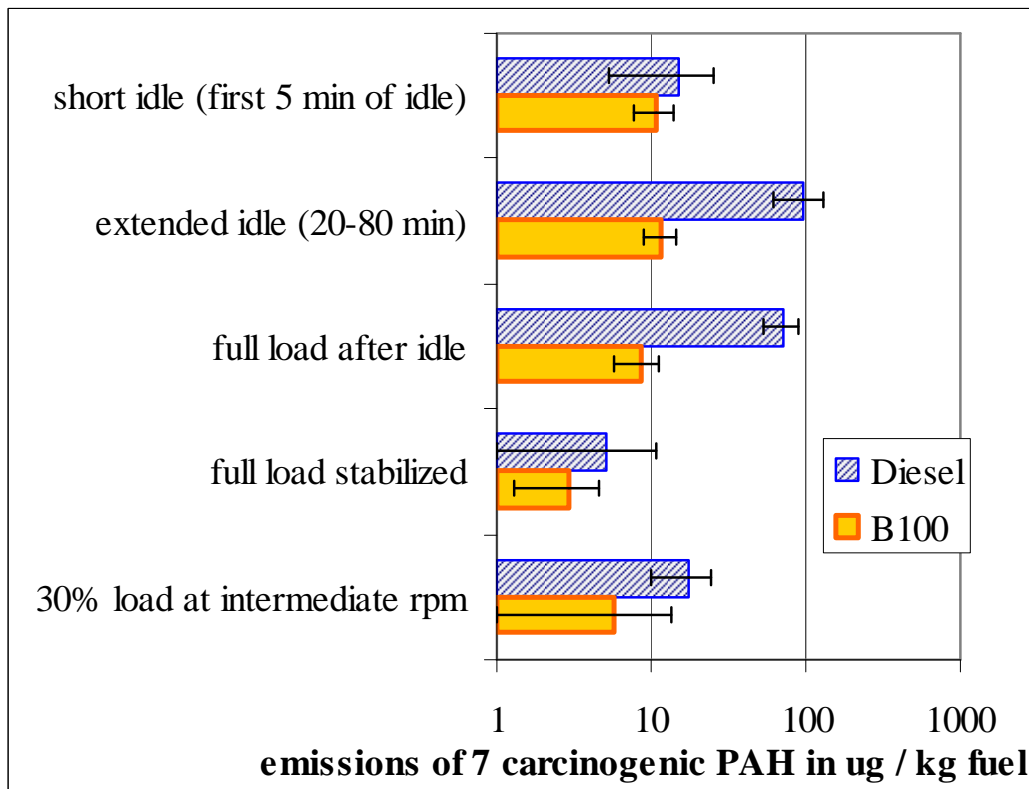
# DNA adukty - vliv částic z nafty a biopaliv na DNA

Topinka a kol., Toxicology letters, 2012

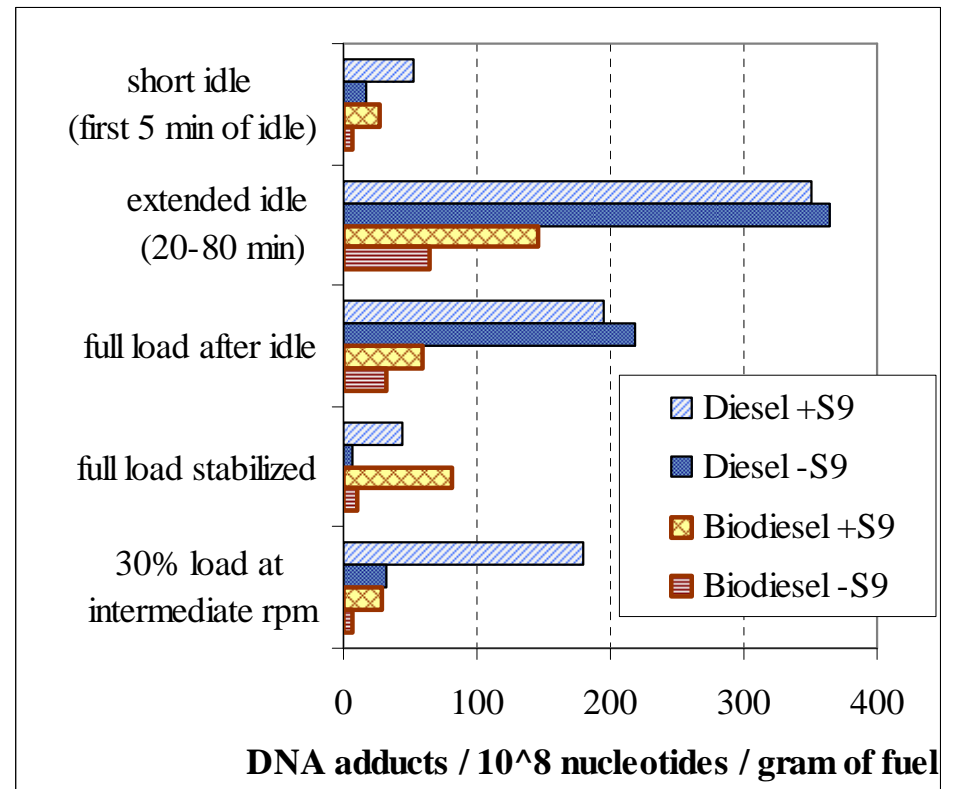


# Emise PAU a DNA adukty při dlouhém provozu naftového motoru na volnoběh

Vojtíšek a kol., Atmospheric Environment, 2015



cPAH



Genotoxicity



# Kolik nanočástic vdechujeme ve škole a kolem ní?



Michal Vojtíšek\*, Erik Zoubek, Eliška Hrnčiariková, Lukáš Kuneš, Jakub Sýkora,  
Adam Černík, Šimon Peterka, Michal Vojtíšek, Eliška Víravová

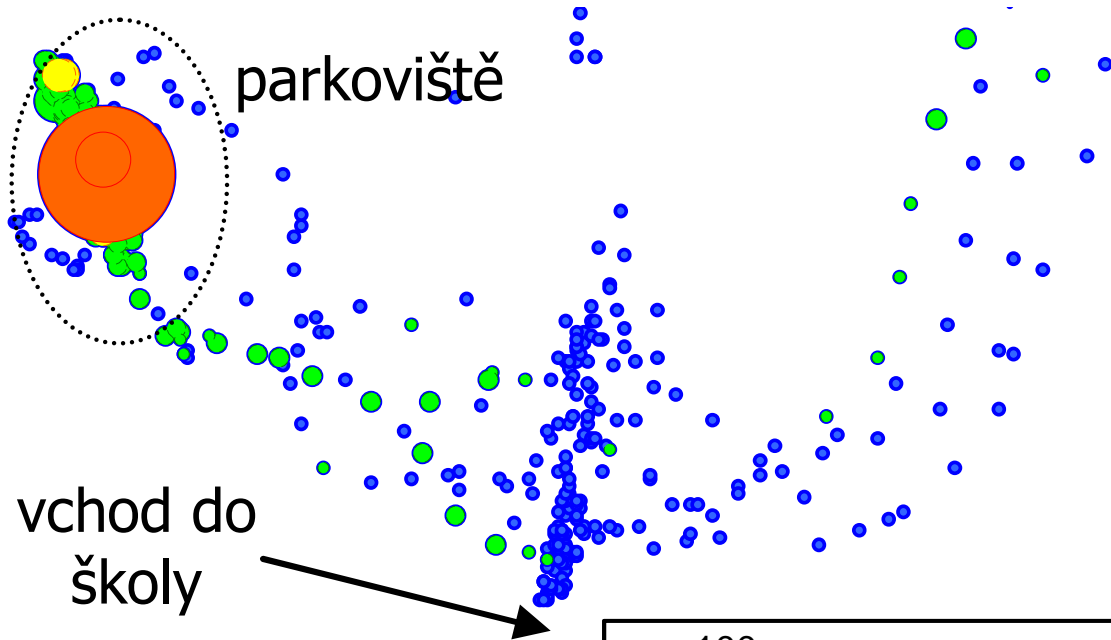
Základní škola Sion J. A. Komenského v Hradci Králové, Na Kotli 1201, 500 09 Hradec Králové

\* Centrum vozidel udržitelné mobility, Fakulta strojní ČVUT v Praze, michal.vojtisek@fs.cvut.cz, tel. (+420) 774 262 854

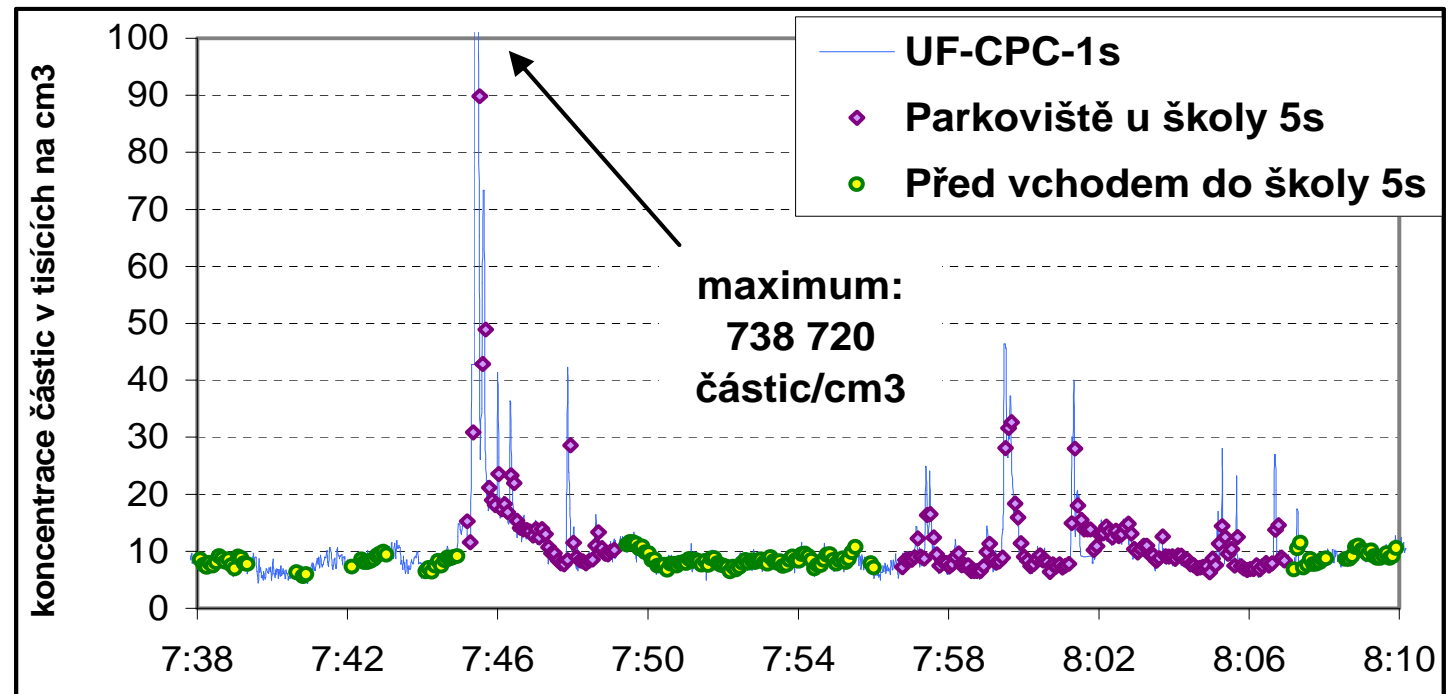
Den vědeckých pokusů na ZŠ SION J.A.Komenského, Hradec Králové, 23. ledna 2015

Prezentace výsledků – Ovzduší 2015, Brno, 20.-22.4.2015

# Nejhorší je parkoviště u školy!!!

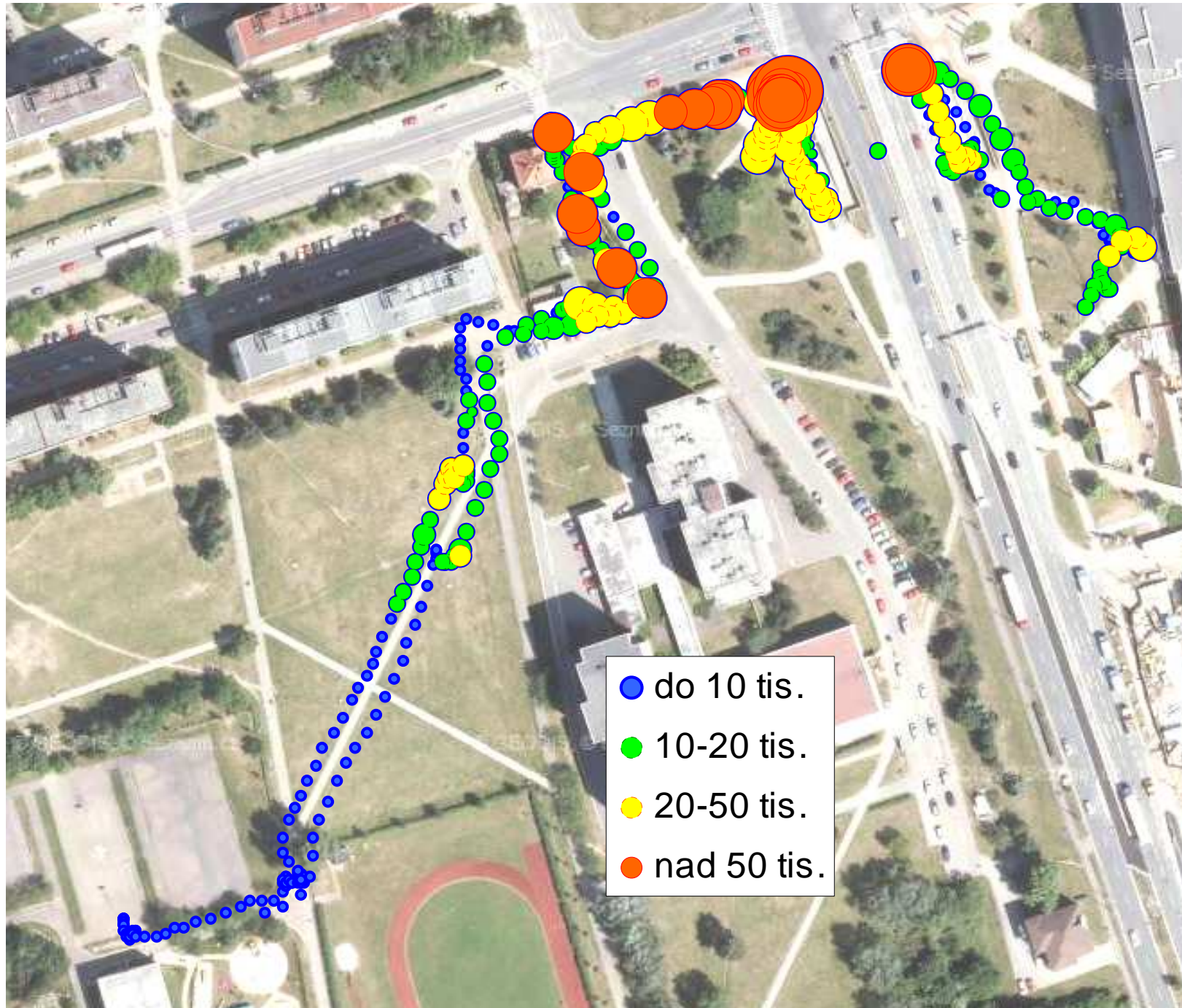


**Nejhorší je parkoviště...  
Ne všechna auta přispívají  
stejně, zdaleka nejvíc  
produkuje vozidla špatně  
navržená či seřízená nebo ve  
špatném technickém stavu!!!**





# Exkurze k výpadovce Brněnská



## Výfukové emise částic nadměrně zvyšují:

- **vytloukání a demontáž filtrů částic (DPF)**

(demontáž samotná nelegální výslovně není, ale provoz takového vozidla již je)

- **vyřazování z provozu a demontáž redukčních katalyzátorů (SCR)**

(demontáž samotná nelegální výslovně není, ale provoz takového vozidla již je)

- **přečipování motorů vozidel na vyšší výkon**

(přečipování samotné nelegální výslovně není, ale provoz takového vozidla je)

- **nevhodná, nedostatečná či žádná údržba motoru**

- **podvádění na emisních měřeních STK**

(jejichž cílem je nalézt vozidla s nadměrnými emisemi a tyto opravit)

- **ladění motorů na homologační cykly, ne na reálný**

**PROVOZ** (předmětem nové EU legislativy pro měření za provozu)

- **velmi vysoká rychlost jízdy**

- **nadměrný výskyt kongesce**

(přetížené a proto částečně či zcela nefunkční části dopravní sítě)

- **přílišná intenzita (zvláště zbytné) silniční dopravy**

(přetížené a proto částečně či zcela nefunkční části dopravní sítě)



# Návrh národních legislativních opatření

- vytloukání a demontáž filtrů částic (DPF)

(demontáž samotná nelegální výslovně není, ale provoz takového vozidla již je)

- vyřazování z provozu a demontáž redukcí katalyzátorů (SCR)

(demontáž samotná nelegální výslovně není, ale provoz takového vozidla již je)

- předčipování motorů vozidel na vyšší výkon

(předčipování samotné nelegální výslovně není, ale provoz takového vozidla již je)

- podřezávání motorů vedoucích k technické nezpůsobilosti k provozu

(je třeba vyřadit vozidla s žádnou údržbou motoru v rámci STK)

- ladění motorů na homologační cykly, ne na reálný provoz

(předmětem nové EU legislativy pro objektivní a realistické hodnocení dopadu staveb na dopravu-emise-ovzduší)

- velmi vysoká rychlost jízdy

- nadměrný výskyt kongescí

(přetížené a proto částečně či zcela nefunkční části dopravní sítě)

- přílišná intenzita (zvláště zbytné) silniční dopravy

(přetížené a proto částečně či zcela nefunkční části dopravní sítě)

**Kontroly technického stavu nákladních a osobních vozidel přímo na silnici**

**Postihování úprav vedoucích k technické nezpůsobilosti k provozu**

**Objektivní a realistické hodnocení dopadu staveb na dopravu-emise-ovzduší**

**Spolupráce mezi ministerstvy/institucemi  
Jednotný přístup  
Kompetentní odborníci  
udržující znalosti v oboru**





# Spořilov – nanočástice v ovzduší

~  $10^4$  částic/cm<sup>3</sup> klidná část Spořilova

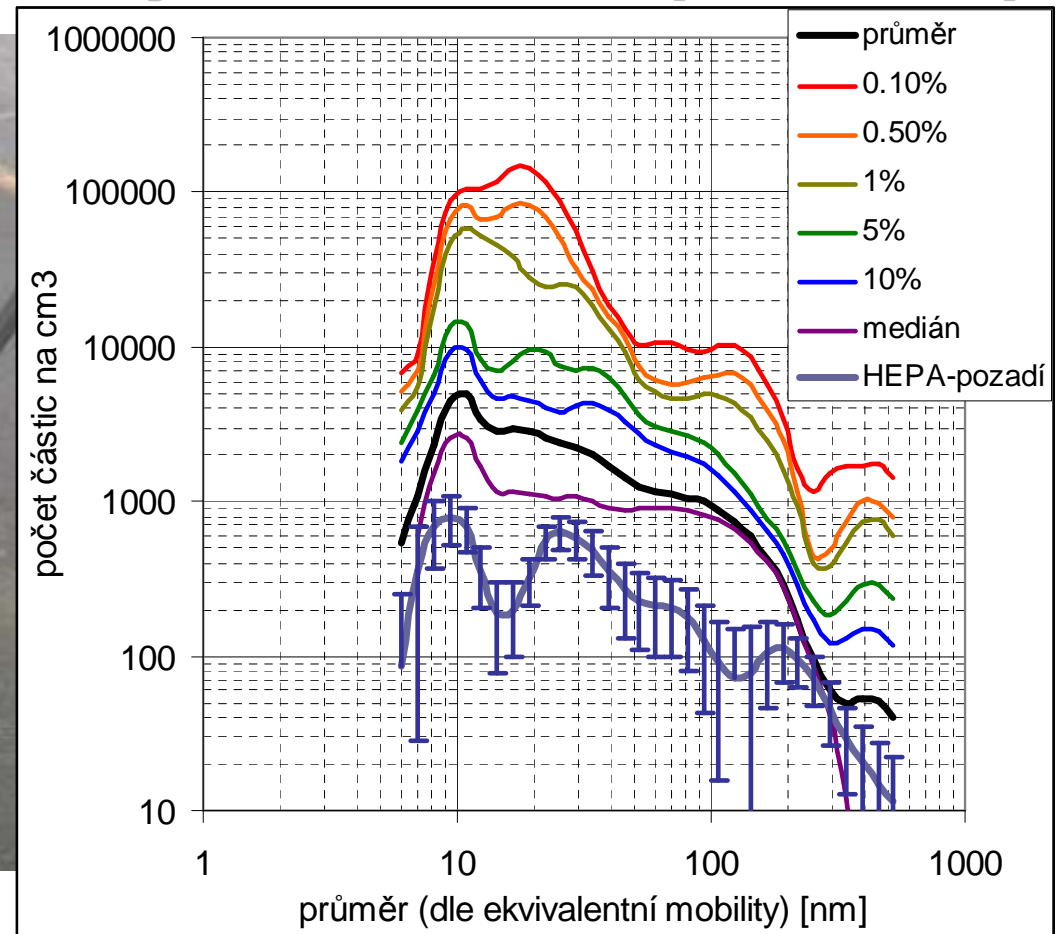
~  $10^5$  #/cm<sup>3</sup> podél Spořilovské

$10^5$ - $10^6$ + #/cm<sup>3</sup> exponované křižovatky

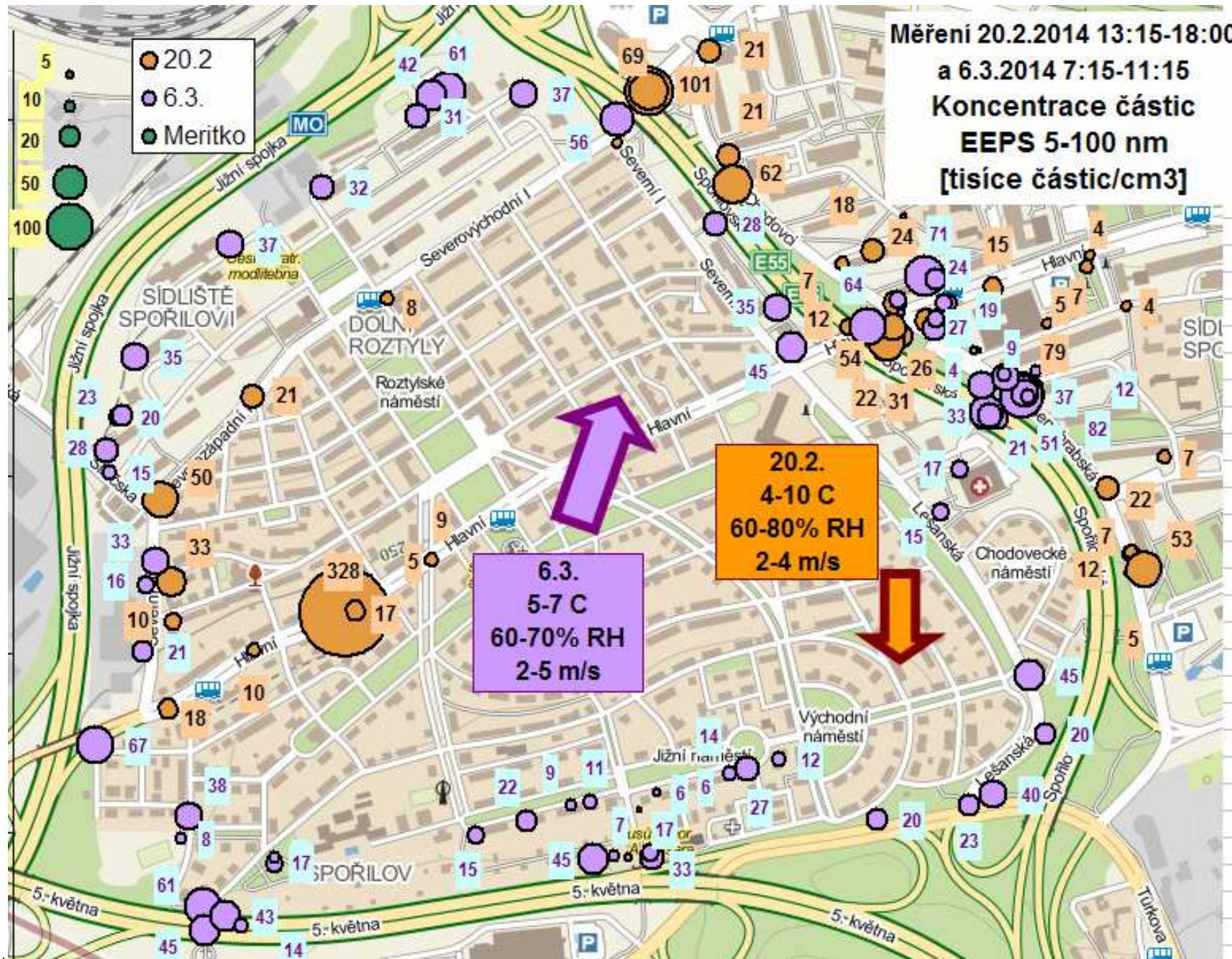
$10^4$ - $10^7$  #/cm<sup>3</sup> vně vozidla

(jízda Liberec-výjezd z Prahy po D1)

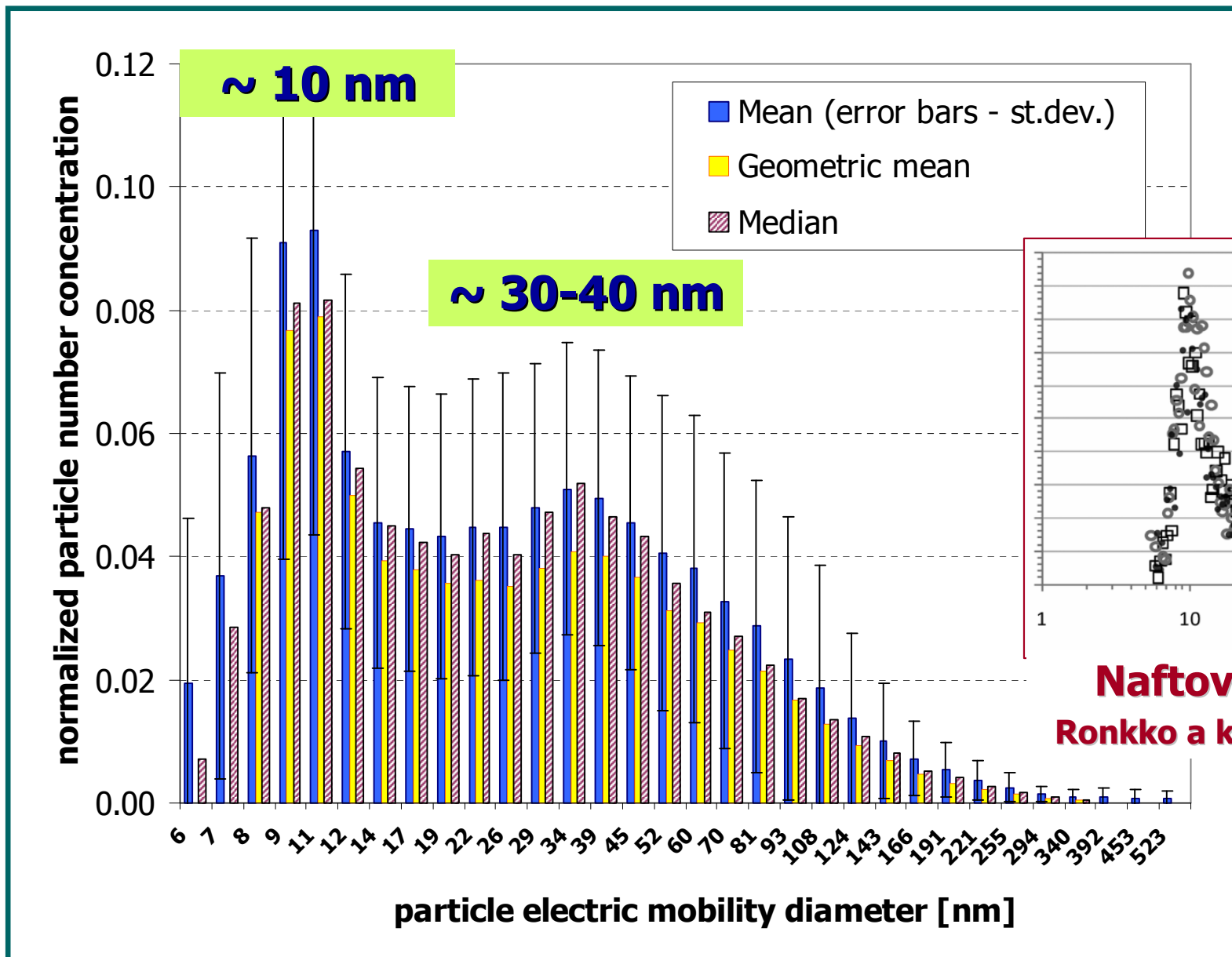
**90-95% jsou nanočástice (do 100 nm)**



# Spořilov – koncentrace nanočástic 20.2. a 6.3.



# Velikostní spektrum částic v ovzduší u silnice Spořilov, únor 2014, průměr 40 lokalit



Vojtíšek a kol., NanoCon 2014



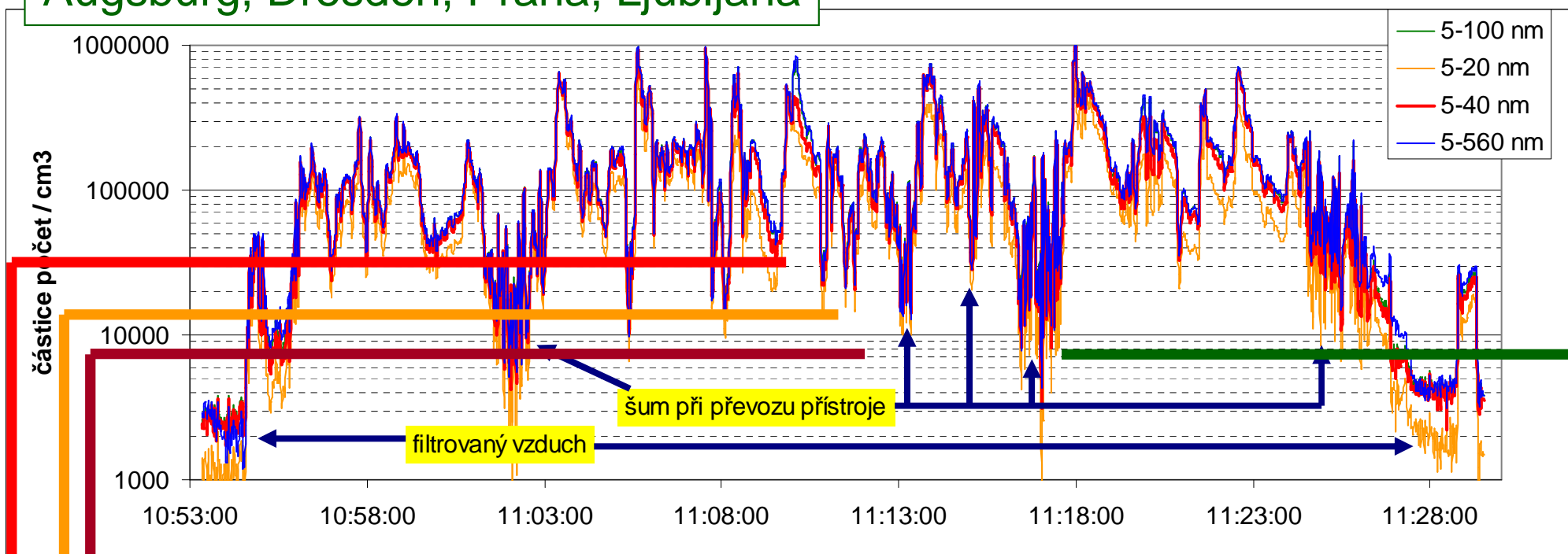
# Spořilov – koncentrace nanočástic 26.3.

jižní strana pěší lávky přes 5. května

vs. Celkový počet částic, Římnáčová a kol., Atmos. Environ. 2011

vs. UFIREG 2012 (7th Newsletter, zde rozdáváný)

6-7 tis. částic na  $\text{cm}^3$  – průměr 2012  
Augsburg, Dresden, Praha, Ljubljana



7 tis. částic na  $\text{cm}^3$  – průměr 2008-2009 Praha-Suchdol

14 tis. částic na  $\text{cm}^3$  – křižovatka Praha-Suchdol

20-40 tis. částic na  $\text{cm}^3$  – Jižní Spojka – těsná blízkost



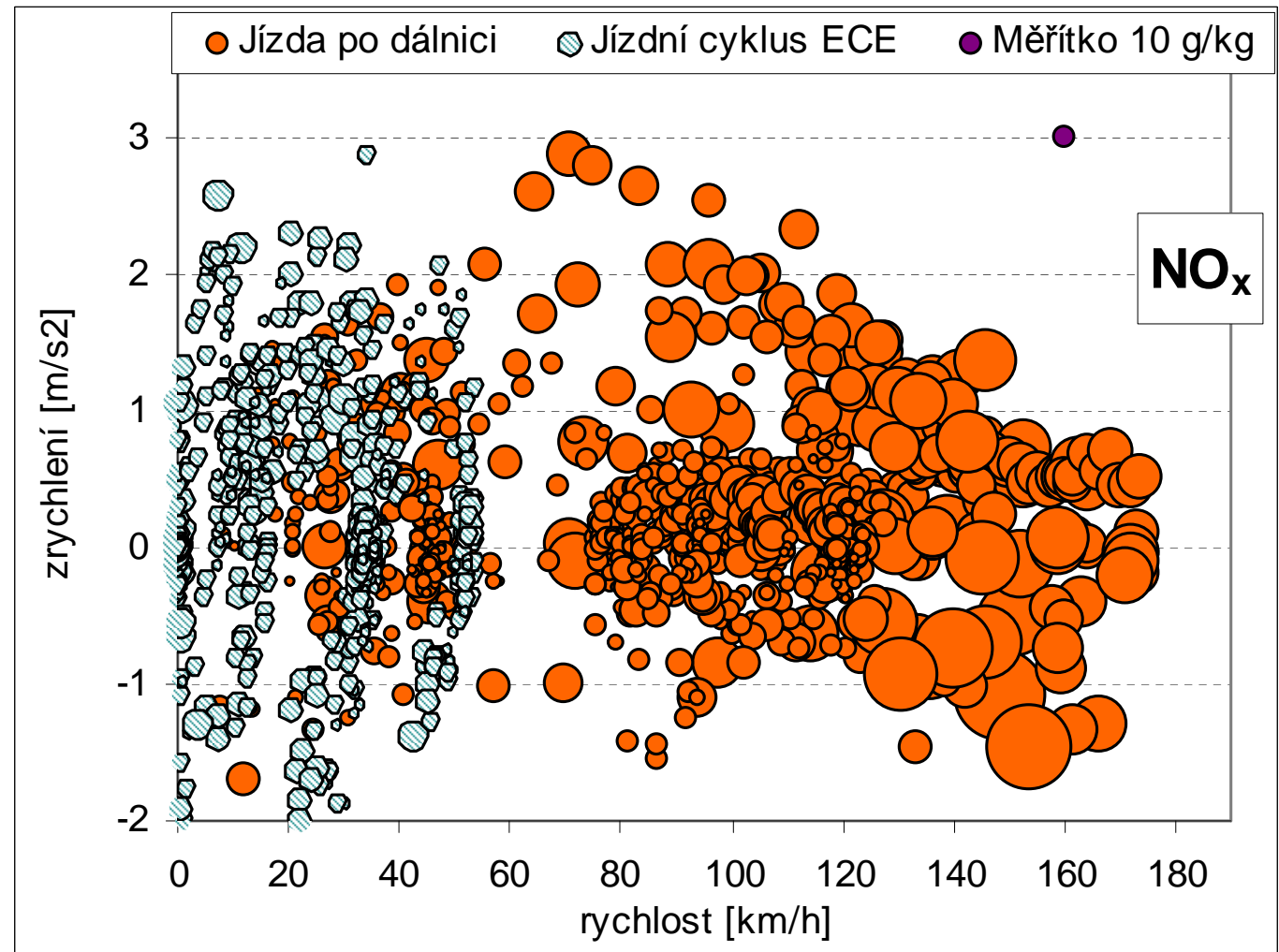
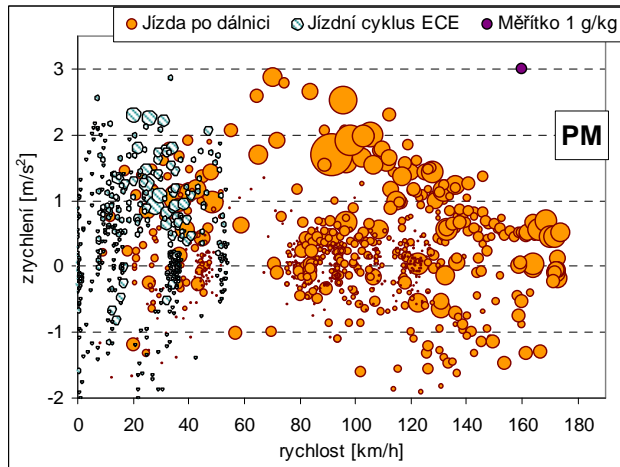
# Homologační zkouška vs. reálný provoz

- Technická omezení - teplota katalyzátoru, teplota, průtok, složení výfukových plynů
- Seřízení výrobcem
  - Level I: Víceemise v režimech nepokrytých cyklem
  - Level II: Víceemise i v režimech cyklu
- Seřízení a úpravy uživatelem
- Stárnutí a poruchy
  - Role technické kontroly vozidla
- Nežádoucí dopady paliv a technologií





# Širší disparita v NOx emisích: NOx jsou vyšší v jiných provozních režimech než v režimech schvalovacího cyklu

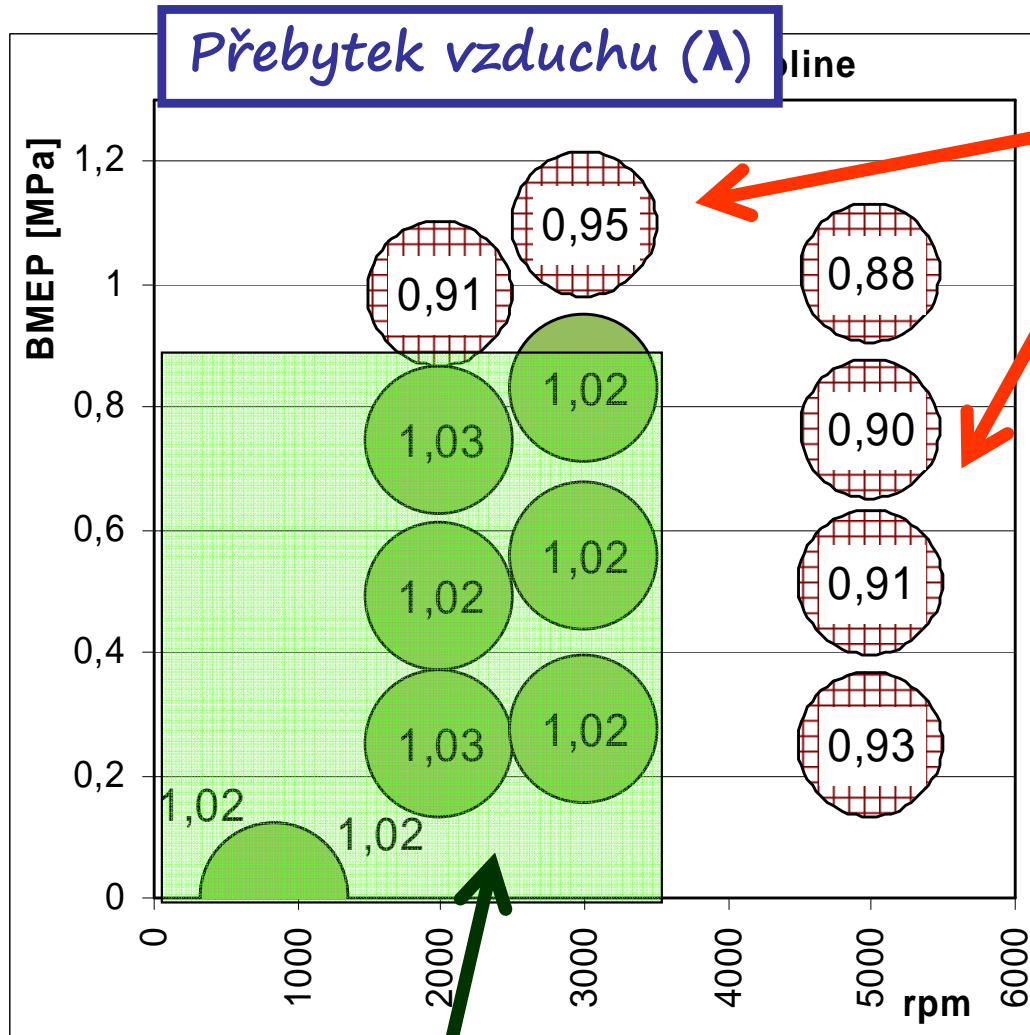


# Emisní problémy automobilových zážehových motorů v EU

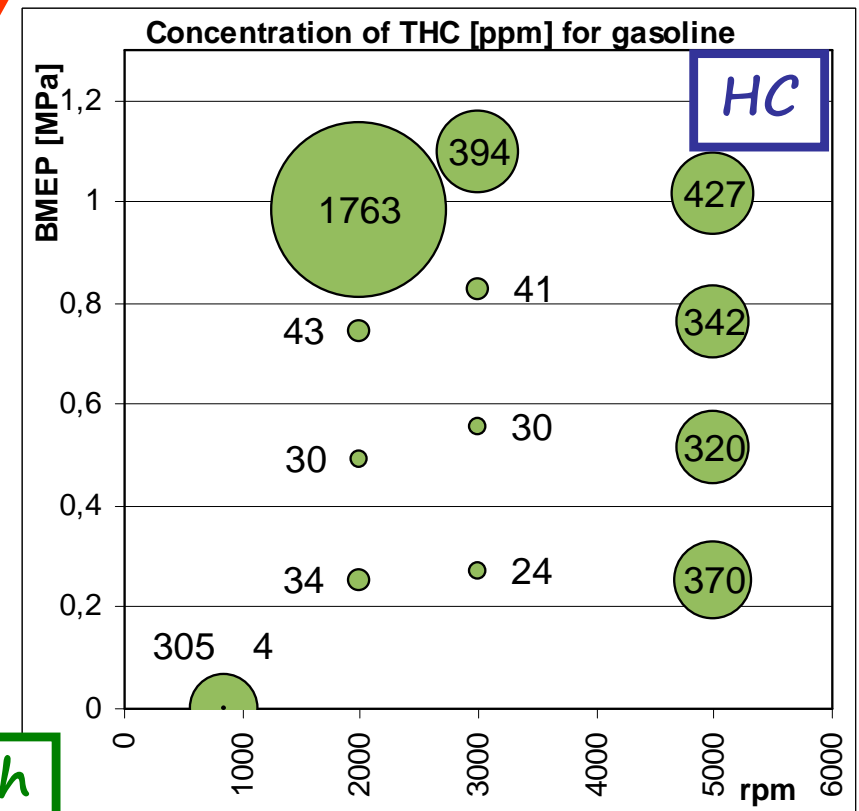
Euro 5 Škoda 1,2 HTP – motorová zkušebna

NEDC vs. vyšší výkonové hladiny

Vysoké zatížení –  
vyšší emise částic



Snížení teploty výfukových plynů (ochrana katalyzátoru) přechodem na bohatou směs při vysokých zatíženích



Stechiometrický poměr palivo-vzduch

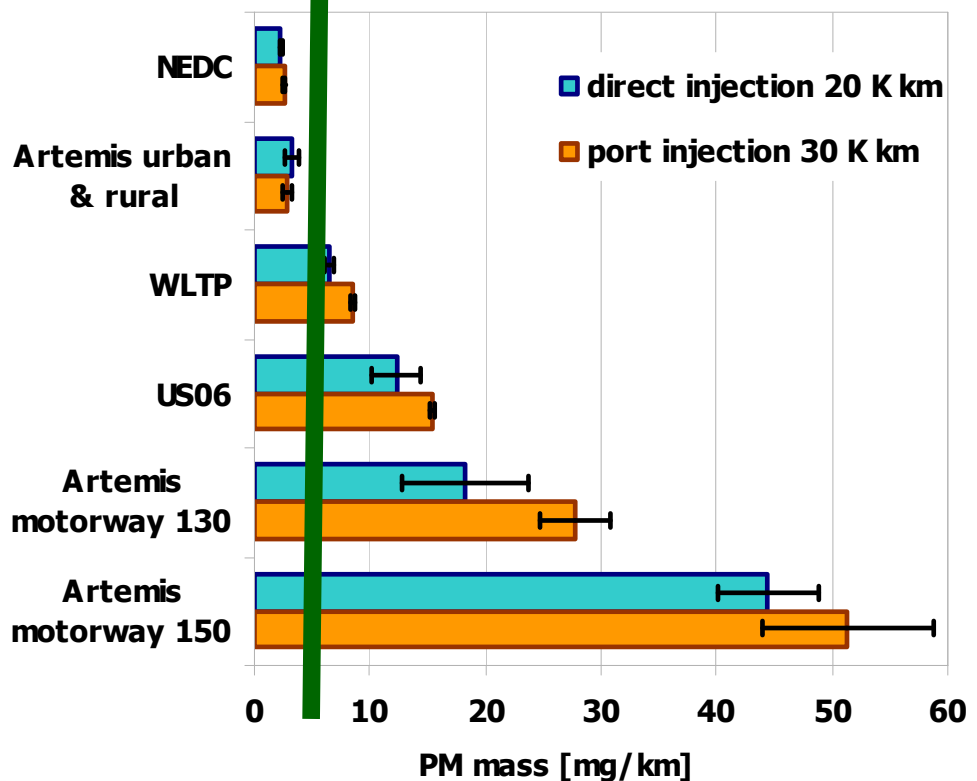


# Emise částic z benzinových motorů: Vliv jízdního cyklu

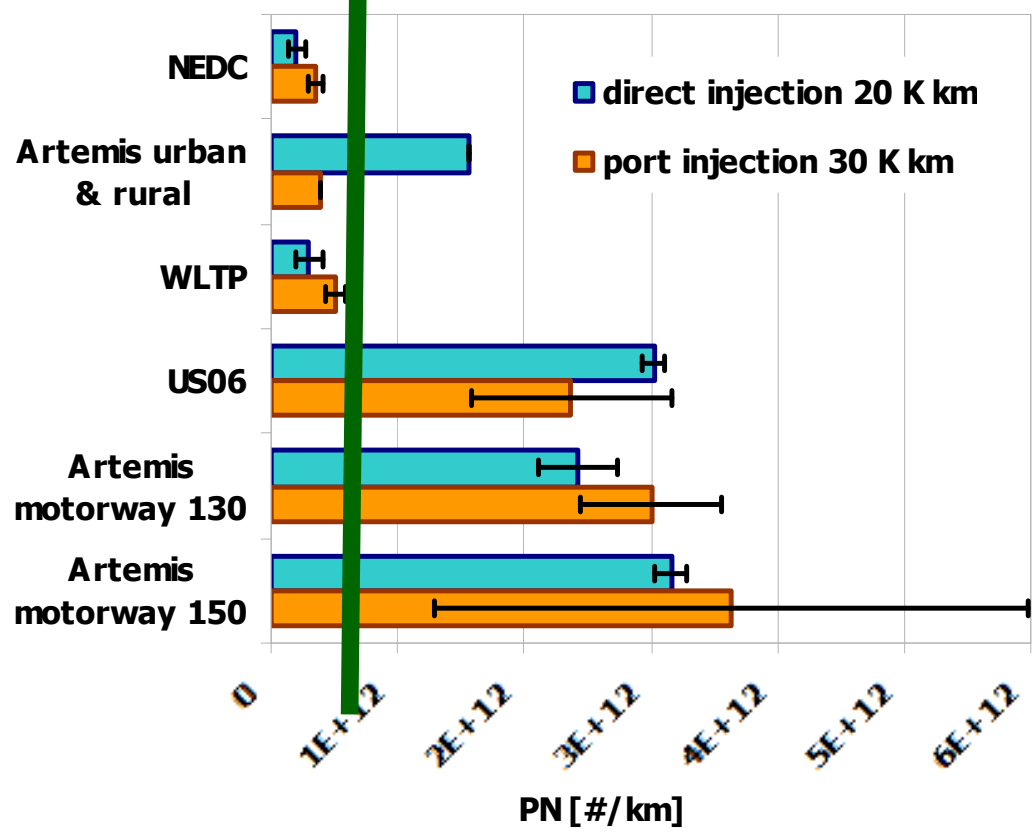
WLTP není tak "měkké" jako NEDC, ale nepokrývá obohacení palivem při vysokých zatíženích (praktika výslovně zakázaná US EPA)

Jsou US06 cyklus a dálniční část cyklu Artemis lepšími kandidáty na homologační cyklus?

EURO 5 PM mass limit



EURO 5 PN limit

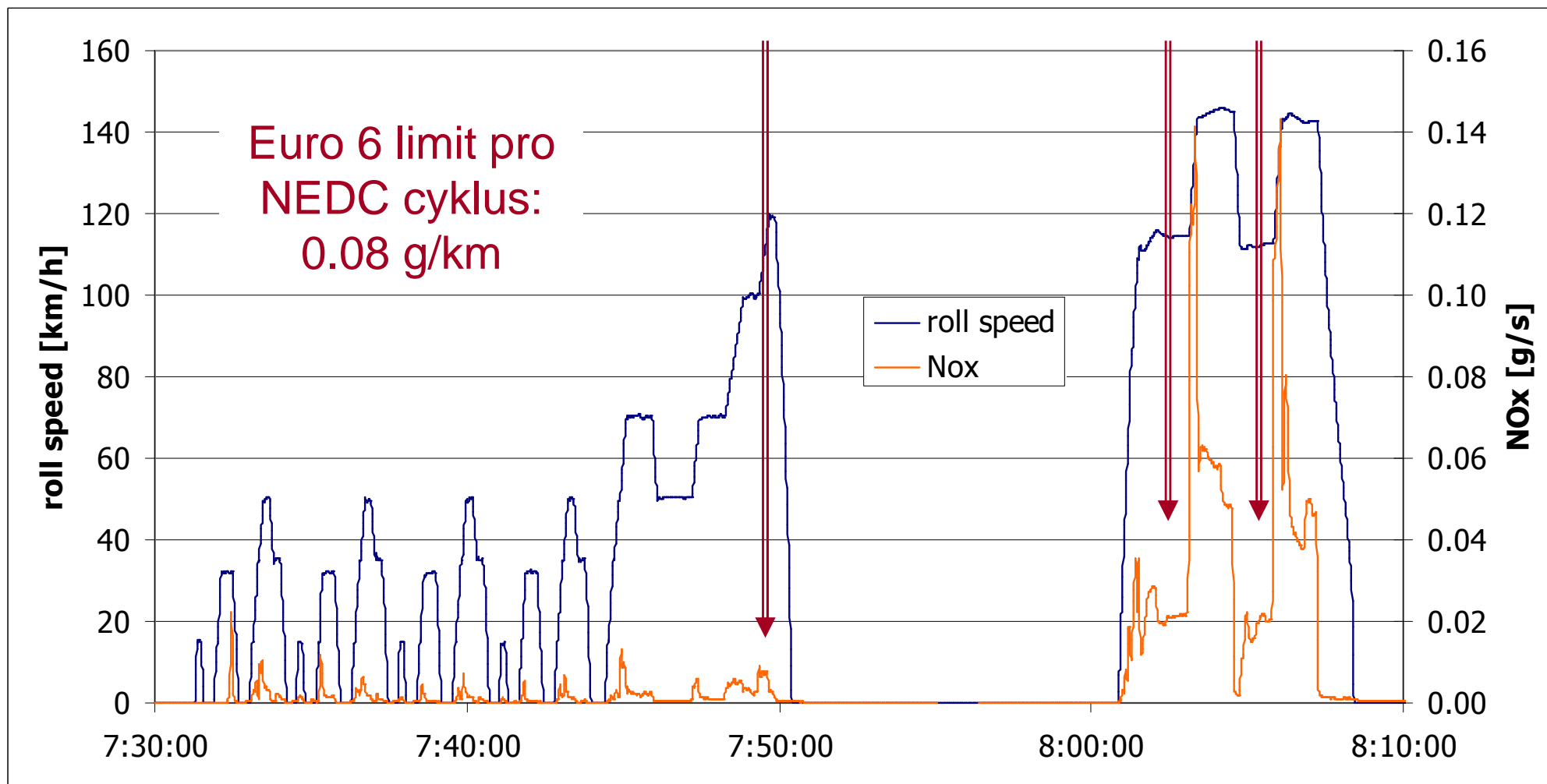


# Seřízení výrobcem

## Level 2: Vysoké emise i v režimech obsažených v NEDC cyklu

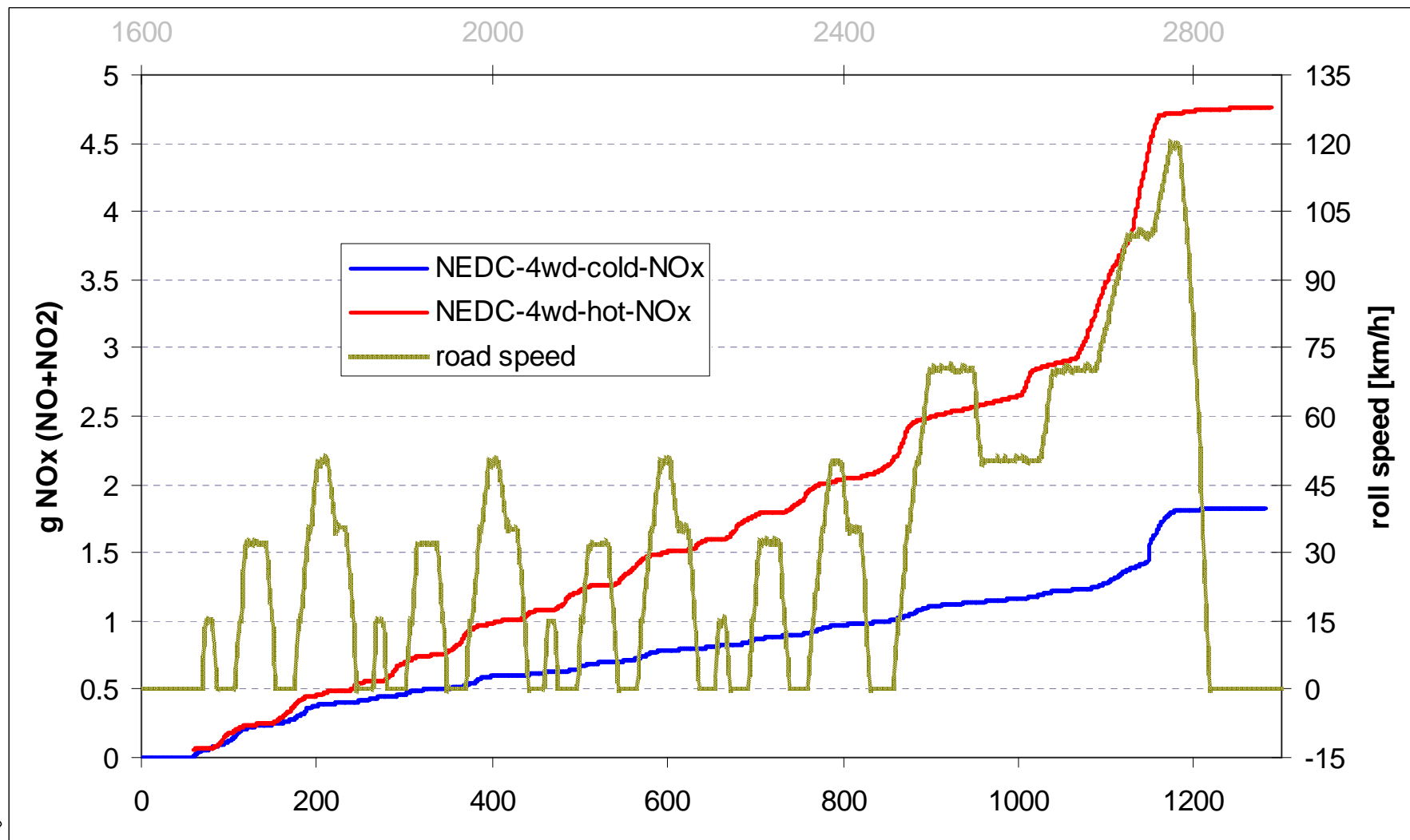
120 km/h

120 km/h



# Seřízení výrobcem

## Level 2: Vysoké emise i v režimech obsažených v NEDC cyklu



# Projekt MEDETOX (LIFE10 ENV/CZ/651)

## Aktivity:

1. Řízení projektu
2. Monitorování projektu
3. Optimalizace měření a vzorkování za provozu, stavba prototypu
4. Optimalizace toxikologických analýz
5. Validace (3) a (4)
6. Sledování dopadu reálných jízdních podmínek
7. Sledování dopadu biopaliv
8. Audit
9. Spolupráce (networking)
10. Rozsévání výsledků (disseminace)
11. After-LIFE plan (co dál)



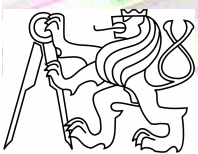
## Zkušenosti s LIFE

Vhodné pro „unikátní“ projekty nespádající do jiných programů

Očekáváno přímé zlepšení stavu životního prostředí

### Problematické otázky

- zařazení projektu do CEP
- režim DPH
- národní kofinancování (tak jako FP7 z MŠMT)
- administrativa a formální požadavky nejsou sjednoceny s dalšími EU programy
- podpora ze strany státní správy / legislativních orgánů



## Zpětná vazba - odezvy

**Velmi dobrá odezva & spolupráce s EK**

**Velmi dobrá odezva od občanů a odborníků**

**Malý zájem českých zákonodárců**

**Šli bychom do toho znova?**

**Ano, připravujeme návrhy (malé motory, lokální topeniště, nanočástice ve městech)**





## Poděkování:

EU LIFE+ program, projekt LIFE10 ENV/CZ/651 MEDETOX,  
"Inovativní metody monitorování toxicity výfukových plynů v  
podmínkách reálného městského provozu"

Grantová agentura ČR, projekt 13-01438S BIOTOX,  
"Mechanismy toxicity pevných částic z biopaliv"

MŠMT Národní program udržitelnosti - NPU I (LO), projekt #  
LO1311 „Rozvoj Centra vozidel udržitelné mobility“

Foto pro zamýšlení:  
Útlum automobilové  
dopravy a podpora pěší  
a cyklistické dopravy,  
Manhattan, New York



### Poděkování - doktorandi:

Mgr. Jitka Štolcpartová, PŘF UK

ing. Vít Beránek, FS ČVUT

ing. Luboš Dittrich, FS TU v Liberci

ing. Martin Pechout, FS TU v Liberci

Doc. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.

Centrum vozidel udržitelné mobility

Fakulta strojní, ČVUT v Praze

EU LIFE+ projekt MEDETOX,

Technická univerzita v Liberci

[michal.vojtisek@fs.cvut.cz](mailto:michal.vojtisek@fs.cvut.cz)

tel. (+420) 774 262 854

