

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Analýza produkce pevných částic spalovacích motorů

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Marin Kotek, Ph.D.

Autor: Bc. Jan Fleischmann

Praha 2017

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Fleischmann

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Analýza produkce pevných částic spalovacích motorů**

Název anglicky

**Particulate matter analysis of combustion engines**

---

### Cíle práce

Analyzovat a experimentálně ověřit možnosti měření emisí pevných částic spalovacích motorů. Vytvořit metodický postup měření s přístrojem EEPS.

### Metodika

1. provést literární rešerši v oblasti dané problematiky s vlastními komentáři a stanovisky
2. konzultovat práci s institucemi a výrobcí zabývající se danou problematikou
3. provést vlastní experimenty, stanovit závěry a uvést případná doporučení

## Doporučený rozsah práce

50-60 stran textu včetně tabulek a obrázků

## Klíčová slova

pevné částice, měření, EEPS, PM

---

## Doporučené zdroje informací

Burtscher, H: Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review, *Journal of Aerosol Science* 36, 2005, pp. 896–932

Grondin, D et al.: Development of a Particulate Matter Sensor for Diesel Engine, *Procedia Engineering*, vol. 100, 2015, pp. 1237–1240

HROMÁDKO, J.: Spalovací motory, Grada Publishing a.s., Praha, 2011, 296s, ISBN 978-80-247-3475-0

TAKATS, M.: Měření emisí spalovacích motorů. ČVUT, Praha, 1997, 111 s., ISBN 80-01-01632-3

Zimmerman, N. et al.: A source-independent empirical correction procedure for the fast mobility and engine exhaust particle sizers, *Atmospheric Environment* 100, 2015, pp. 178–184

---

## Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

## Vedoucí práce

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2016

**doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2016

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 14. 02. 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Analýza produkce pevných částic spalovacích motorů vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom/a, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom/a že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne: .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Martinu Kotkovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a materiály, které mi poskytnul v průběhu zpracování této diplomové práce. Zároveň bych rád poděkoval svému otci doc. Ing. Zdeňkovi Fleischmannovi, DrSc. a mé matce Jiřině Fleischmannové za podporu při studiu.

**Abstrakt:** Práce se zabývá tématem analýzy produkce pevných částic spalovacích motorů. Práce v první řadě poskytuje vhled do problematiky pevných částic. Dále práce rozebírá aktuální trendy v měření pevných částic ať už na legislativní úrovni, tak i na čistě experimentální úrovni. Kromě teoretické části práce obsahuje také praktickou část, v níž jsou analyzátorem EEPS měřeny osobní automobily značky Škoda. Výsledkem praktické části je tvorba metodického postupu měření analyzátorem EEPS a analýza výsledků z praktického měření.

**Klíčová slova:** pevné částice, vlivy pevných částic, měření pevných částic, EEPS, velikostní rozdělení pevných částic, koncentrace pevných částic

### **Analysis of particulate matter production**

**Summary:** This thesis deals with particulate matter production analysis in combustion engines. At first the thesis provides an in inside to problematics of particulate matter. Furthermore it analyses trends in the measurement of particulate matter at both the legislative and the experimental level. Beside the theory there is also a practical part of the thesis that focuses on the measurement of Skoda passenger cars with the usage of EEPS analyzer. The intended result of the practical part is to create a methodology for measuring with EEPS and analyze the results from the measurement.

**Key words:** particulate matter, influences of particulate matter, particulate matter measurement, size distribution, total concentration

## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Cíle práce .....	2
3	Metodika práce .....	2
4	Problematika pevných částic .....	3
4.1	Vznik a složení pevných částic .....	3
4.2	Procesy při tvorbě pevných částic .....	4
4.3	Rozdělení velikosti pevných částic .....	5
4.4	Vlivy pevných na člověka .....	5
4.5	Vliv pevných částic na prostředí .....	6
4.6	Regulace produkce pevných částic .....	6
5	Měření produkce pevných částic .....	8
5.1	Měření dle předpisu EHK R24 .....	8
5.1.1	Princip a měřicí zařízení .....	8
5.1.2	Metodika měření .....	9
5.1.3	Výpočet .....	10
5.2	Měření dle předpisu EHK R83 .....	11
5.2.1	Princip a měřicí zařízení .....	11
5.2.2	Jízdní cyklus .....	15
5.2.3	Výpočet .....	16
5.3	Měření dle předpisu EHK R49 .....	17
5.3.1	Princip a měřicí zařízení .....	17
5.3.2	Jízdní cyklus .....	17
5.3.3	Výpočet .....	19
5.4	Alternativní metody měření pevných částic .....	19
5.4.1	Hmotnost uhlíku .....	20
5.4.2	Rozdělení velikosti pevných částic .....	21
5.4.3	Chemické složení pevných částic .....	23

5.4.4	Povrch pevných částic .....	24
5.4.5	Efektivní hustota, morfologie a struktura pevných částic .....	26
6	Praktické měření produkce pevných částic .....	28
6.1	EEPS .....	28
6.1.1	Princip EEPS .....	28
6.1.2	Měřené veličiny .....	30
6.1.3	Výstup EEPS .....	30
6.2	Válcová zkušebna.....	31
6.3	Měřené automobily .....	33
6.4	Metodika měření přístrojem EEPS.....	34
6.5	Postup měření.....	36
6.6	Výsledky měření .....	38
6.6.1	Průběh produkce pevných částic a rychlosti v čase.....	39
6.6.2	Maximální produkce pevných částic .....	43
6.6.3	Celková produkce pevných částic .....	44
6.6.4	Průměrná produkce pevných částic .....	45
6.6.5	Rozdělení velikosti pevných částic .....	46
7	Závěr .....	51
	Použitá literatura.....	54
	Seznam obrázků .....	57
	Seznam tabulek.....	58
	Seznam grafů .....	58
8	Přílohy.....	59
8.1	Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Fabia .....	59
8.2	Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Octavia .....	60
8.3	Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Rapid .....	61
8.4	Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Roomster .....	62



## 1 Úvod

Problematika pevných částic či polévatého prachu je v dnešní době velmi diskutovaným tématem. Na evropské úrovni jsou pevné částice a ostatní emise regulovány normami EURO, jejichž přísnost se od roku 1993 stále rychleji prohlubuje. Aféra Diesel Gate z roku 2015 jen přilila olej do ohně, co se týče emisí, a poskytla Evropské Unii podnět k dalšímu zpřísnování emisních limitů. Rok 2017 je jen dalším mezníkem v měření pevných částic, kdy se některé automobilky rozhodly pro implementaci filtrů pevných částic i do zážehových motorů s přímým vstřikováním. V rámci homologačních cyklů došlo od září k nahrazení cyklu NEDC (New European Driving Cycle) cyklem WLTP (World Harmonised Light Vehicle Testing Procedure). Navíc ještě došlo k zavedení doplňujícího jízdního cyklu simulujícího reálné jízdní podmínky RDE (Real Driving Emissions), pro něž se v dnešní době vyvíjí analyzátor pevných částic z řady modelů přenosných měřících systémů emisí PEMS (Portable Emission Measuring Systems). Měření, na které jsme doposud zvyklí, se tedy v dnešní době zásadně mění a lze předpokládat, že se bude rozmanitost měření a regulace produkce pevných částic dále zvyšovat. V dnešní době je EURO limity regulována koncentrace a hmotnost částic u lehkých a těžších užitkových automobilů. Tyto parametry však slouží jen jako odrazový můstek pro jejich další analýzu. Tato práce se zabývá měřením i dalšího parametru pevných částic a to velikostním spektrem částic, jenž ukazuje, kolik částic různých velikostí bylo měřenými vozy vyprodukováno.

## 2 Cíle práce

Hlavními cílem práce je tedy analýza a experimentální provedení měření emisí pevných částic spalovacích motorů. V souvislosti s provedenými experimenty je cílem vytvořit metodický postup pro měření s přístrojem EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer).

## 3 Metodika práce

První částí práce je věnována rešerši vyhotovené na základě dostupných zdrojů a znalostí autora práce. Za prvé se rešerše soustřeďuje na problematiku pevných částic, přičemž popisuje, jak pevné částice vůbec vznikají, jak škodí a jak je regulujeme. Za druhé se rešerše věnuje měření pevných částic, přičemž jsou rozebrány metody měření částic, jež se v dnešní době používají pro homologaci, měření v rámci emisní kontroly a pro čistě experimentální měření.

Druhá část práce je věnována praktickému měření s přístrojem EEPS zkoumajícím právě koncentraci a velikostní spektrum částic a to u automobilů značky Škoda, které má Technická fakulta ČZU k dispozici. V závěru práce jsou prezentovány výsledky měření konzultované s pracovníkem společnosti TÜV SÜD Czech, závěry plynoucí z oněch výsledků a doporučení, jak měření pevných částic dále obohatit či vylepšit.

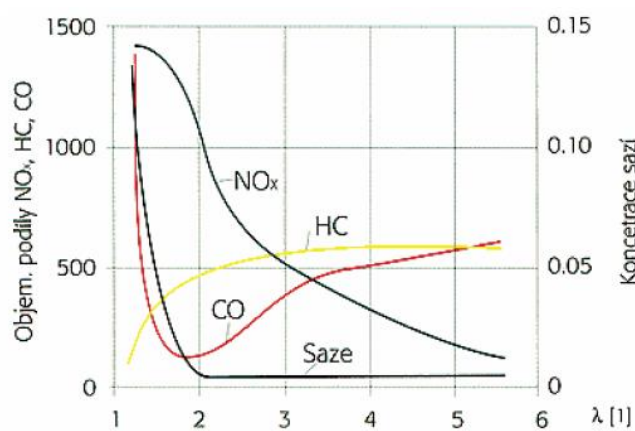
## 4 Problematika pevných částic

Následující kapitoly jsou věnovány rešerši, která má za cíl osvětlit mechanismy vzniku pevných částic, popsat jejich rozdělení, vysvětlit jejich účinky a možnosti regulace.

### 4.1 Vznik a složení pevných částic

Pevné částice vznikají spalováním anorganických i organických hmot či přírodními pochody. Ve vztahu k dopravě jsou pevné částice neboli saze produktem nedokonalého spalování ve spalovacích motorech. Při nedokonalém spalování vzniká oxid uhelnatý, který je doprovázen vznikem sazí. Pevné částice se tedy tvoří zejména při nízkých hodnotách součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  (viz. obr. 1). Ke tvorbě dochází při vysokém zatížení motoru. Právě nedostatečné množství kyslíku v kombinaci se spalováním neodpařených kapek paliva s přebytkem uhlíku způsobuje vznik nežádoucích sazí respektive uhlíku. Vznik pevných částic je tedy především dán tím, jak dobře je palivo při stříku do válce rozprašeno a množstvím vzduchu, které do spalovacího motoru dodáváme.

Obrázek 1: Vliv součinitele přebytku vzduchu na produkci pevných částic u dieselového motoru

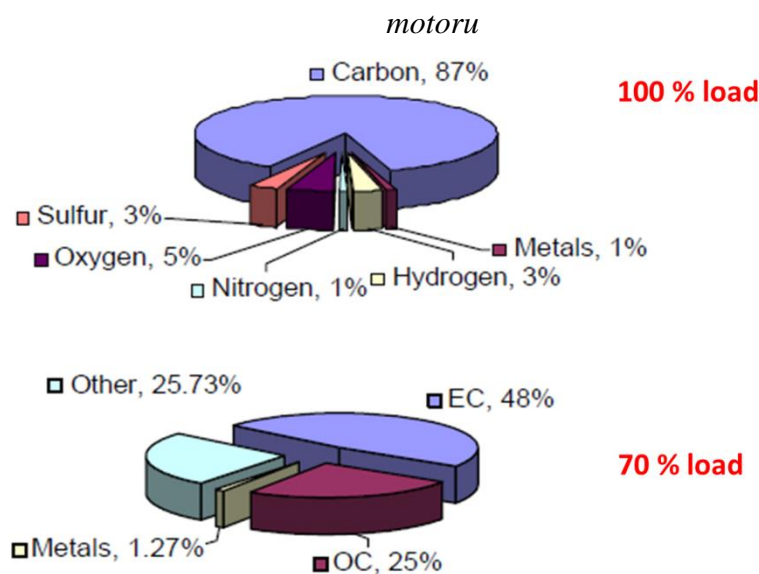


Zdroj: [1]

U osobních dieselových automobilů tvoří jádro částice obsahující uhlík s popelem přibližně 75% hmotnosti. Uhlík se nejprve tvoří z kapek paliva, které se při spalování za vysoké teploty a nedostatku vzduchu neodpařilo. Z neodpařeného paliva a oleje vznikají též rozpustné organické sloučeniny SOF (Soluble organic fraction), které jsou produktem pyrolýzy a jsou produkovány v plynné formě. Mezi hlavní patří zdraví nebezpečné polyaromatické uhlovodíky PAH. Společně se SOF můžeme na povrchu částic nacházet sulfáty, které vznikají ze síry obsažené v palivu a oleji, ve formě oxidu siřičitého. V neposlední řadě nacházíme na

povrchu částice různé kovy, které pocházejí z opotřebení některých motorových dílů. Je nutno zdůraznit, že pevné částice obsahují daleko více látek, než je zde vyjmenováno. Jejich počet a složení závisí hlavně na druhu motoru, jeho provozu a na zařízeních snižujících produkci emisí. Příkladem změny složení částic při různých zatíženích dieselového motoru je možné vidět na obr. 2. [1][2]

Obrázek 2: Možné složení pevné částice dieselového motoru při rozdílných zatíženích



Zdroj: [2]

## 4.2 Procesy při tvorbě pevných částic

V kapitole 1.1 byly stručně vysvětleny procesy vedoucí ke vzniku PM ve válci spalovacího motoru. Nicméně řada procesů mění charakteristiky částic ještě ve výfukovém potrubí a hlavně po jejich vypuštění do okolního vzduchu. Částice se liší ve velikosti, složení, rozpustnosti a také v jejich toxických vlastnostech, proto v závislosti na podmínkách (místo měření, teplota, vlhkost, naředění vzduchem atd.) mohou částice:

- zůstat v plynné formě,
- kolidovat díky tepelnému pohybu a tím vytvářet celky částic (koagulace),
- sorbovat či kondenzovat na povrchu pevných částic (adsorpce a kondenzace) a
- vytvářet zárodky nových částic (nukleace).

Proces koagulace nastává již ve spalovacím prostoru při vysokých teplotách spalování, přičemž proces probíhá i ve výfukovém potrubí. Zárodky pevných částic kolidují a splývají, čímž dochází k poklesu koncentrace částic a také k jejich zvětšení, nicméně celková hmotnost vzniklých částic není ovlivněna. Tento proces je velmi důležitý, jelikož pokud se zkoumá

rozložení velikosti částic a jejich koncentrace, výsledky jsou tímto procesem značně ovlivněny. Druhým procesem, ke kterému dochází při ochlazení okolním vzduchem, je adsorpce. Ve výfuku tedy mohou těkavé organické sloučeniny sorbovat na povrch pevných částic. Nejrizikovější sloučeninou v tomto ohledu jsou právě polyaromatické uhlovodíky (PAH), které jsou běžně v plynné formě, nicméně po jejich ochlazení dochází k jejich přesycení a následné adsorpci na povrchu částic. Při nedostatku adsorpčních míst (např. z důvodu produkce vyššího počtu menších částic) mohou sloučeniny kondenzovat. Tato situace může nastat v oxidačním katalyzátoru, kdy může být síra v palivu emitována ve formě oxidu siřičitého a dále oxidována až na kyselinu sírovou. Tyto dva procesy tedy rapidně ovlivňují velikost, celkovou hmotnost a jejich charakteristiku (např. morfologii) částic. Posledním procesem je nukleace, kterou je označována tvorba zárodků částic před koagulací. K nukleaci též dochází díky síře v palivu, která oxiduje až na oxid siřičitý. Při styku s vodou vytváří zárodky nanočástic kyseliny sírové. Vznik nových částic ve výfukovém potrubí zkresluje všechny sledované parametry pevných částic, jelikož znemožňuje určit, jaké částice vznikly skutečně ve spalovacím prostoru. [3]

### 4.3 Rozdělení velikosti pevných částic

Pevné částice označujeme mezinárodní zkratkou PM, která v anglickém jazyce zastupuje pojem Particulate Matter (PM). Tato zkratka bývá doplněna indexem označujícím rozměr dané skupiny částic ( $PM_x$ ). V literatuře se částice produkované spalovacími motory dělí do čtyř skupin dle jejich aerodynamického průměru. Aerodynamický průměr je definován jako: *průměr koule o hustotě  $1 \text{ g/cm}^3$  se stejnou ustálenou rychlostí způsobenou gravitační silou v klidném ovzduší, jako má částice za obvyklých podmínek týkajících se teploty, tlaku a relativní vlhkosti*. Skupiny jsou:

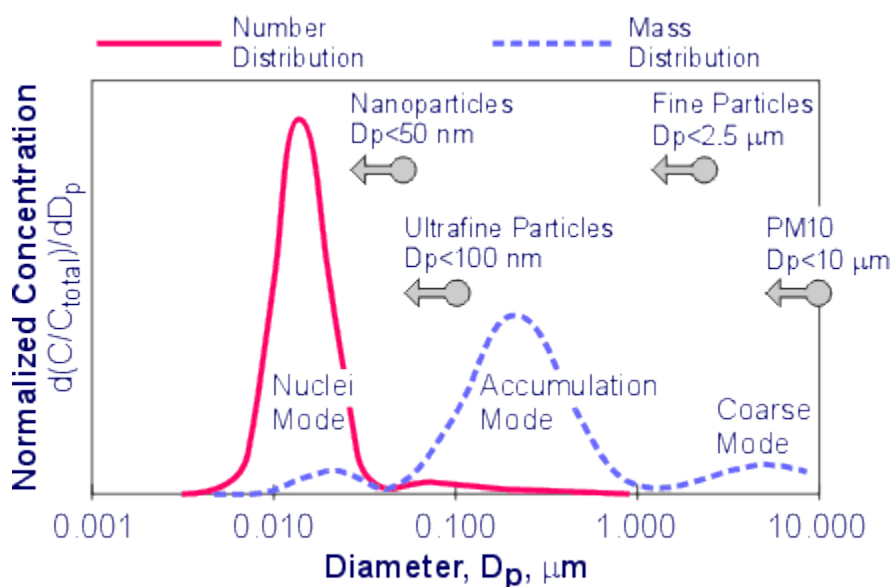
- Hrubé částice nebo  $PM_{10}$  – částice o průměru  $\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$
- Jemné částice nebo  $PM_{2,5}$  – částice o průměru  $\leq 2,5 \text{ }\mu\text{m}$
- Ultra-jemné částice  $PM_{0,1}$  – částice o průměru  $< 100 \text{ nm}$
- Nanočástice – částice o průměru  $< 50 \text{ nm}$

Dále se ještě částice dělí v závislosti na procesech uvedených v kapitole 2.2 na:

- Mód nukleace (formování nových částic) – částice o průměru menším než  $50 \text{ nm}$
- Mód akumulace (aglomerace nových částic) – částice o průměru mezi  $50$  a  $100 \text{ nm}$
- Mód hrubých částic (částice vzniklé nanášením a následným zachycením částicového materiálu ze stěn spalovací komory) – částice o průměru větším než  $1 \text{ }\mu\text{m}$

Typické velikostní a hmotnostní rozdělení částic u dieselového motoru je možné vidět na obr. 3. Pro aerodynamický průměr  $D_p$  na ose X je použito logaritmicko-normální rozdělení. Na ose Y je derivace koncentrace částic na jednotku objemu  $C/C_{total}$  podle průměru částic  $D_p$ . Obě rozdělení mají své vrcholy, nicméně každý z nich je umístěn někde jinde. V hmotnostním rozdělení se většina částic nachází v akumulacním módu, zatímco ve velikostním rozdělení se většina částic nachází již v nukleačním módu. Jinak řečeno, veškeré PM je tvořeno velkým množstvím ultra-jemných částic a nanočástic o nízké hmotnosti a malým množstvím jemných částic, které představují většinu hmotnosti PM. Jen nepatrné procento je v módu hrubých částic. [4]

Obrázek 3: Rozdělení velikosti a hmotnosti pevných částic u dieselového motoru



Zdroj: [4]

#### 4.4 Vlivy pevných částic na člověka

Nepříznivé účinky pevných částic na zdraví a jejich hojnost v blízkosti silnic, zejména pak v městských oblastech, budí velké obavy v posledních letech. Již mnoho toxikologických a epidemiologických studií potvrdilo negativní účinky pevných částic na správné fungování dýchacích cest a kardiovaskulárního systému, zejména pak částic  $PM_{2,5}$  a menších.

V nose, respektive v horních dýchacích cestách, jsou částice s průměrem převyšujícím  $10 \mu m$  zachyceny řasinkovým epitelem na sliznicích. Ze sliznic jsou vyloučeny buď prostým vykašláním či nosním hlenem. Nicméně částice dráždí sliznice a pronikají skrze řasinky k tkáni epitelu, kde mohou způsobovat záněty dýchacích cest. Částice  $PM_{10}$ , které nejsou nosními chloupky zachyceny, mohou dále pokračovat až do průdušek, mohou též způsobovat

zánětová onemocnění jako například bronchitidu. Větší problém představují částice  $PM_{2,5}$  a  $PM_{1,0}$ , které se dostanou přes obranný mechanismus horních cest dýchacích a pronikají přes průdušky a průdušinky až do koncových částí dýchacího ústrojí – plicních sklípků. Zde jsou odstraněny makrofágem; jedná se o tzv. samočisticí funkci plic. Nicméně při dlouhodobé expozici částicemi  $PM_{2,5}$  a  $PM_{1,0}$  dochází k zanesení plicních sklípků, které slouží k výměně odkysličené a okysličené krve. Důsledkem mohou být potíže spojené se sycením krve a tím i tedy i z nich vyplívající srdeční potíže. Nejvyšší ohrožení pro lidský organismus představují ultra-jemné částice  $PM_{0,1}$ . Právě tyto částice mohou vstoupit přes plicní sklípky až do krve, kde se dále šíří do kreví zásobovaných orgánů (srdce, mozek atd.). Vliv ultra-jemných částic je předmětem obsáhlého zkoumání, jelikož částice se kreví mohou přenášet a usazovat de facto po celém těle. [5]

#### 4.5 Vliv pevných částic na prostředí

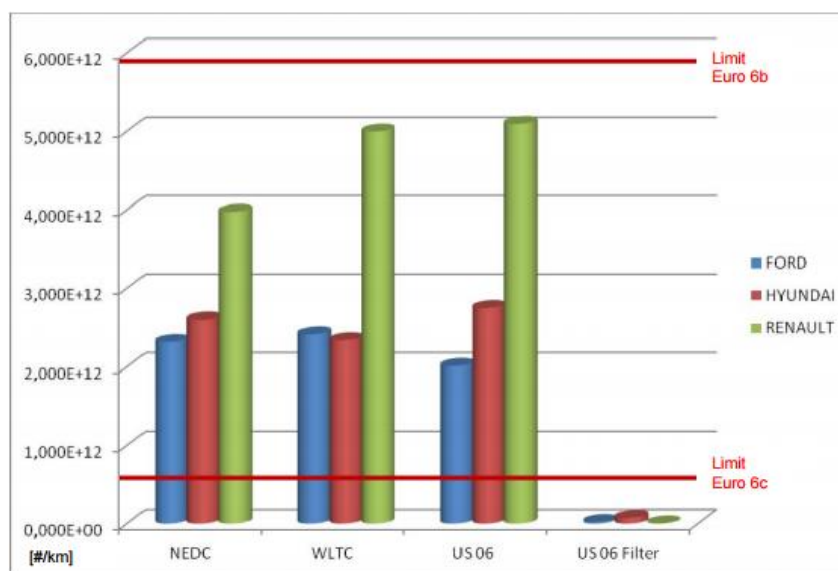
Pevné částice rozptýlené ve vzduchu se označují jako aerosoly. Platí, že čím je pevná částice menší, tím déle se vznáší ve vzduchu. Částice s průměrem okolo 10  $\mu m$  slehnou k zemi v rámci několika hodin, zatímco u ultra-jemných částic se uvádí, že dokáží setrvat v atmosféře po dobu týdnů. Větší částice působí negativně na rostlinstvo, jelikož pokrývají listy rostlin a tím zabraňují dopadu slunečního světla nutného pro proces fotosyntézy. Aerosol v atmosféře představuje markantnější problém, jelikož zvyšuje albedo (odrazivost) zeměkoule. Tzv. dochází k tomu, že se k povrchu Země dostane méně elektromagnetického záření. Důsledkem je opět nižší intenzita dopadajících paprsků a s tím spojené problémy viditelnosti a celkového ochlazení zemského povrchu. [5]

#### 4.6 Regulace produkce pevných částic

Co se týče prevence vzniku pevných částic, v dnešní době dosahují nejnižších hodnot produkce pevných částic přeplňované vznětové motory s přímým vstřikováním vybavené filtry pevných částic. Přeplňování zvyšuje objem přiváděného vzduchu do spalovacího prostoru a přímý vstřik do válce pod vysokým tlakem umožní kvalitní rozprášení a odpaření paliva, které ve válci ochlazuje vzduch a tím zlepšuje plnicí účinnost. Největšího soupeře pevných částic nicméně představují filtry pevných částic (DPF – diesel particulate filter), jež jsou od zavedení normy EURO 5 v roce 2009 povinné ve všech automobilech vybavených vznětovým motorem. Nejlepší filtry úspěšně vyfiltrují více než 95% pevných částic. Novinkou září roku 2017 se stala implementace filtrů pevných částic do automobilů vybavených benzínovým spalovacím motorem s přímým vstřikem. Při vyšších

otáčkách a zatížení pracuje motor v homogenním provozu, kdy buď dochází ke spalování stechiometrické směsi  $\lambda = 1$  či přímo bohaté směsi  $\lambda < 1$ . Dochází též k nedokonalému spalování, avšak směs je obohacena o větší množství kyslíku, proto dochází k nesrovnatelně nižší produkci pevných částic. V roce 2013 uskutečnila laboratoř TÜV Nord měření na třech automobilech světových značek a bylo zjištěno, že ani jeden z vozů by nesplnil limit pro počet částic emitovaných na jeden kilometr, který byl od září roku 2017 stanoven normou EURO 6c. Jak je vidět z obr. 4, po instalaci DPF došlo k rapidnímu poklesu počtu vyprodukovaných PM na 1 km, přičemž došlo ke splnění limitu. Nicméně použití DPF u zážehových motorů s sebou nese jisté nedostatky. Teplota spalin zážehového motoru se pohybuje v rozmezí 250-400 °C, přičemž ke spálení pevných částic dochází po dosažení teploty 550 °C. Problém by šel vyřešit instalací filtru s aktivní generací, které přidáním aditiva sníží teplotu potřebnou pro spálení částic. Druhou metodou může být zvýšení teploty spalin použitím vstřikování Common-Rail, kdy dojde k přidavnému vstříknutí paliva (tzv. dostřiku) v průběhu expanzního zdvihu a teplota hoření se zvýší o 200-250 °C. Instalace filtru by tedy zvýšila spotřebu paliva a společně i se samotnou cenou filtru by zajisté měla dopad na trh s vozidly vybavenými zážehovým motorem. [6]

Obrázek 4: Výsledky měření laboratoře TÜV Nord



Zdroj: [6]



## 5 Měření produkce pevných částic

Měření pevných částic je na vědeckém poli poměrně diskutovaným tématem, jelikož existuje mnoho metod vytvořených pro jejich měření, přičemž každá z nich je realizována v jiných podmínkách a poskytuje různorodé informace o povaze či množství produkovaných částic.

Dnešní měřicí metody zpravidla sledují následující parametry pevných částic:

- celkovou hmotnost
- koncentraci
- rozdělení velikosti
- hmotnost uhlíku
- hmotnost organických látek
- povrch částic
- efektivní hustotu, morfologii a strukturu

Abychom mohli sledovat kýžené parametry pevných částic s co možná nejvyšší přesností, je třeba nejprve spaliny zředit okolním vzduchem, čímž dojde k jejich ochlazení. Většina přístrojů pro měření pevných částic vyžaduje ochlazení výfukových plynů, jelikož zvládá měřit jen jistou koncentraci výfukových plynů o jisté teplotě (většinou okolního vzduchu). Zároveň je nezbytné spaliny ochladit a naředit, aby se alespoň do jisté míry předešlo již zmíněným chemickým procesům koagulace, kondenzace, adsorpce a nukleace. [7]

### 5.1 Měření dle předpisu EHK R24

V rámci kontroly vznětových motorů se v ČR na Stanicích měření emisí měří opacita, jež kvantitativně vyjadřuje kouřivost motoru. Opacimetry jsou o mnoho jednodušší než ostatní přístroje pro měření pevných částic a jsou proto také výrazně levnější. Opacimetrem se měří surové výfukové plyny, jelikož nevyžaduje ochlazení a naředění spalin; opacimetr totiž zvládá měřit vysoké koncentrace pevných částic za teploty, při které nedochází ke kondenzaci plynných složek. Nicméně přesnost měření je značně ovlivněna přítomností sulfátů, uhlovodíků HC, vodní párou, složením a stavem pevných částic atd. Proto je obtížné výsledky měření korelovat s běžně sledovanými parametry částic jmenovaných v kapitole 3. Výrobci však uvádějí pro své přístroje empirické tabulky pro převod hodnot naměřených opacimetry na množství pevných částic. [8]

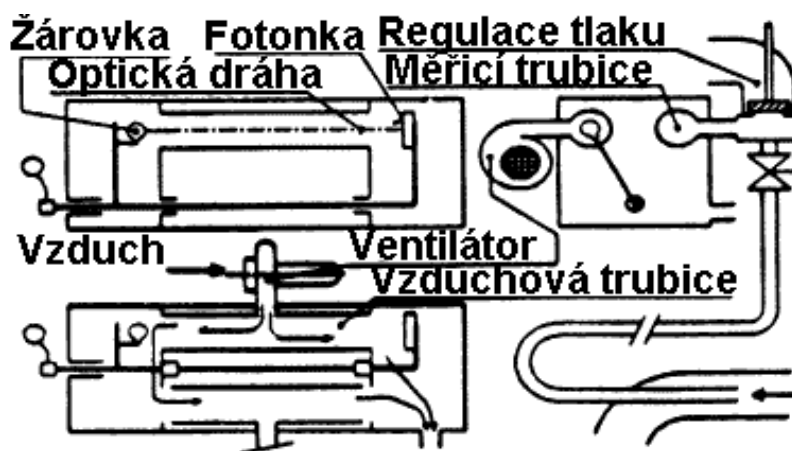
#### 5.1.1 Princip a měřicí zařízení

Samotné slovo opacita znamená schopnost pohlcovat světlo a je obvykle chápána jako neprůhlednost daného tělesa. Metoda je založena na měření množství světla, které projde

sloupcem výfukových plynů o předepsané optické dráze. Princip a schéma opacimetru lze ilustrovat na starším přístroji značky HARTRIGE. Tělo přístroje tvoří komora, která obsahuje dvě trubky (jednu vzduchovou a jednu měřící) odpovídající požadované optické vzdálenosti, kterou musí paprsek překonat. Na jedné straně měřící trubice je halogenová žárovka o definované teplotě a definovaném světelném výkonu emitující světlo. Na opačném konci se nachází fotočlánek vyhodnocující světelný tok emitovaného paprsku světla. Fotonka a žárovka jsou mechanicky spojeny a lze je posunout do osy každé z trubic; vzdálenost mezi fotonkou a žárovkou se označuje jako optická dráha.

Vlastní měření začíná mimo komoru, kde je umístěn ventilátor, který do ní vhání vzduch. Optická dráha je na začátku měření souosá se vzduchovou trubicí a do přístroje se zatím nepřivádí spaliny. Ve chvíli, kdy dojde k otevření ventilu měřící trubice, vznikne přetlak, který do ní vtáhne spaliny a vytlačí přítomný vzduch. Při uskutečnění vlastního měření se optická dráha přesune do osy měřící trubice. Po odečtu kýžené hodnoty se optická dráha přesune zpět do osy vzduchové trubice, kde dochází k procesu čištění zdroje a čidla od povlaku částic. Schéma opacimetru je možné vidět na obr. 5. [9]

Obrázek 5: Schéma opacimetru



Zdroj: [10]

### 5.1.2 Metodika měření

V České republice se v rámci emisních kontrol měří kouřivost vznětového motoru za pomoci opacimetru dle předpisu EHK 24. Provedení a rozsah kontroly je dáno vyhláškou Ministerstva dopravy č. 302/2001 Sb. o technických prohlídkách a měření emisí vozidel. Měříme tzv. opacitu, tedy optickou hustotu výfukových plynů. Opacita je vyjadřována buď pomocí součinitele absorpce v absolutních jednotkách  $m^{-1}$ , v procentech nebo v jednotkách HSU.

Zkouška se provádí metodou volné akcelerace motoru. Té předchází zkouška volnoběhu a otáčkového regulátoru. Celé měření probíhá, když je zařazený neutrální a když je motor zatížen pouze setrvačnými hmotami klikového mechanismu, spojky a převodovky. Během volné akcelerace opacimetr zapíše nejvyšší hodnotu kouřivosti ve formě absorpčního koeficientu (starší přístroje např. zapisují výsledky v procentech či jednotkách HSU).

Motor se nachází ve volnoběžných otáčkách. Akcelerační pedál se během 0,2 až 0,4 s přestaví do polohy, kdy dochází ke vstřikování plných dávek paliva. V momentu, kdy je dosaženo přeběhových otáček, zasáhne regulátor otáček vstřikovacího čerpadla. Po 3 s dojde k uvolnění akceleračního pedálu a k poklesu otáček zpět na volnoběžné. Po 15 s je možné celý cyklus volné akcelerace zopakovat. První cyklus slouží k pročištění válce a výfuku. Po prvním cyklu je třeba provést ještě čtyři měření, při kterých se nesmí výsledek absorpčního koeficientu lišit o více než  $0,25 \text{ m}^{-1}$ . [11]

### 5.1.3 Výpočet

Vzniklé napětí na fotoelektrickém článku je odečteno z displeje opacimetru a je vyjádřeno v jednotkách HSU (Hartrige Smoke Unit). Ze vztahu (1) se dopočítává absorpční koeficient  $k$  vyjádřený v absolutních jednotkách  $\text{m}^{-1}$ , kde  $L$  je délka optické dráhy v metrech a  $N$  je údaj z opacimetru (také opacita) v %. [9]

$$k = \frac{-1}{L} \cdot \ln \left( 1 - \frac{N}{100} \right) [\text{m}^{-1}] (1)$$

Výsledky všech měření se následovně zprůměrují pomocí aritmetického průměru dle vztahu (2):

$$k = \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{4} [\text{m}^{-1}] (2)$$

Jak již bylo zmíněno, někteří výzkumní pracovníci či přímo výrobci přišly s tabulkami převádějícími absorpční koeficient či opacitu na hmotnostní množství částic. Např. Holubecki a Dodd odvodily převod, jenž je možné vidět na výňatku z tabulky 1:

Tabulka 1: Převodní tabulka opacimetru

**CONVERSION CHART**

Conversion Chart for k, HSU, FSN and mg/m<sup>3</sup>  
(Extracted from MIRA Report No. 1965/10, Nuneaton 1965, AG Dodd and Z Holubeki.)

k Coefficient of Light Absorption m <sup>-1</sup>	Hartridge Smoke Units HSU	Filter Smoke Number FSN	mg/m <sup>3</sup> mg/m <sup>3</sup>	Cal %* Cal %*
0,25	10	1.10	33	6.1
0,27	11	1.20	38	6.5
0,30	12	1.30	42	7.2
0,32	13	1.40	47	7.7
0,35	14	1.48	52	8.4
0,38	15	1.57	57	9.1
0,41	16	1.67	62	9.7
0,43	17	1.75	66	10.2

Zdroj: [29]

## 5.2 Měření dle předpisu EHK R83

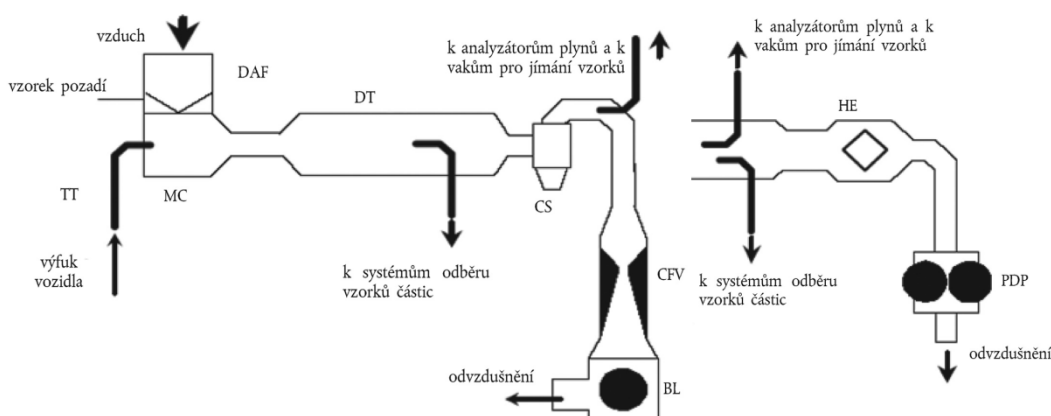
V současné době platí v Evropě pro schvalování lehkých užitkových automobilů předpis EHK R83. Předpis se vztahuje k vozidlům kategorií M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, N<sub>1</sub> a N<sub>2</sub> s referenční hmotností nepřesahující 2 610 kg (výrobce může zažádat o zvýšení povolené referenční hmotnosti na 2840 kg). Jednotlivé předepsané zkoušky se provádějí pro paliva: benzín (E5), motorová nafta (B5), etanol (E85), LPG, NG, biometan a jejich kombinace. Zkoušek je celkem šest, přičemž měření pevných částic je uskutečněno pro vozidla se zážehovým i vznětovým motorem při zkoušce I, kde se měří emise po studeném startu. Měření se realizuje dynamicky na válcovém dynamometru, který simuluje jízdní cyklus NEDC. Odběr vzorku částic je uskutečněn systémem ředění plného toku, na jehož ústí se nacházejí zařízení pro měření celkové hmotnosti pevných částic a jejich počtu. Při měření musí být striktně dodržena teplota okolního vzduchu, teplota nasávaného vzduchu do motoru, teplota ředícího a odběrného zařízení, atmosférický tlak a vlhkost vzduchu. [12]

### 5.2.1 Princip a měřící zařízení

Ochlazení a naředění výfukových plynů je realizováno v tunelech na obr. 6 vybavených speciálními dmychadly. Systém je zde založen na ředění plného toku tzv. CVS (Constant Volume Sampling). Pokud je průtok ředícího vzduchu vysoký, dochází při změně režimu motoru ke změně koncentrace škodlivin ve výfukových plynech, nicméně celkový průtok

nařaděných spalin je konstantní. Schéma tunelu je možné vidět na obr. 6. Hlavní částí aparatury je dmychadlo umístěné na výstupu, které nasává výfukové plyny společně s dostatečným objemem ředícího vzduchu. Jako dmychadlo se využívá zpravidla objemové dávkovací čerpadlo (PDP) počítající průtok z jeho výtlaku a otáček nebo lopatkové dmychadlo s Venturiho trubicí s kritickým průtokem (CFV). Na vstupu je u obou aparatur filtr ředícího vzduchu (DAF) skládající se z filtru HEPA, který odlučuje mikročástice z ředícího média, a filtru s aktivním uhlím, který snižuje koncentraci uhlovodíků v ředícím médiu. Ve směšovací komoře (MC) dojde k promísení ředícího vzduchu a spalin. Přenosovou trubicí (TT) jsou nařaděné spaliny vedeny do tunelu (DT), kde dojde k homogennímu promísení spalin se vzduchem. Aparatura využívající dávkovací čerpadlo disponuje navíc výměníkem tepla (HE) zajišťujícím stálou teplotu směsi před vstupem do samotného čerpadla. Stálá teplota spalin u aparatury s Venturiho trubicí s kritickým průtokem je dána rychlostí zvuku v plynu, jež je přímo úměrná druhé odmocnině teploty plynů. [12]

Obrázek 6: Schéma ředícího tunelu

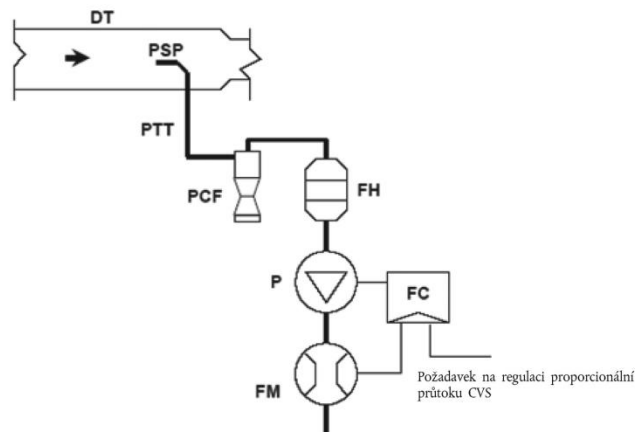


Zdroj: [12]

Pro odběr vzorku částic za účelem zjištění hmotnosti pevných částic může být využita následující aparatura na obr. 7. V jisté vzdálenosti od vstupu do ředícího tunelu (DT) je umístěna sonda částic (PSP). Vzorek je poté veden a odsáván trubkou částic (PTT) přes separátor částic (PCF), který odděluje pevné částice podle velikosti. Částice dále procházejí držáky filtrů (FH), které nesou samotné filtry potřebné k zachycení vzorku částic. Výfukové plyny jsou do následující aparatury nasávány čerpadlem (P) a měřeny průtokoměrem (FM). Čerpadlo je doplněno regulátorem průtoku (FC), jelikož bez regulace průtoku by při vstupu

do odběrné sondy docházelo k diskontinuitě rychlostí způsobující odlučování částic. Tento způsob odběru částic je nazýván isokinetický. [12]

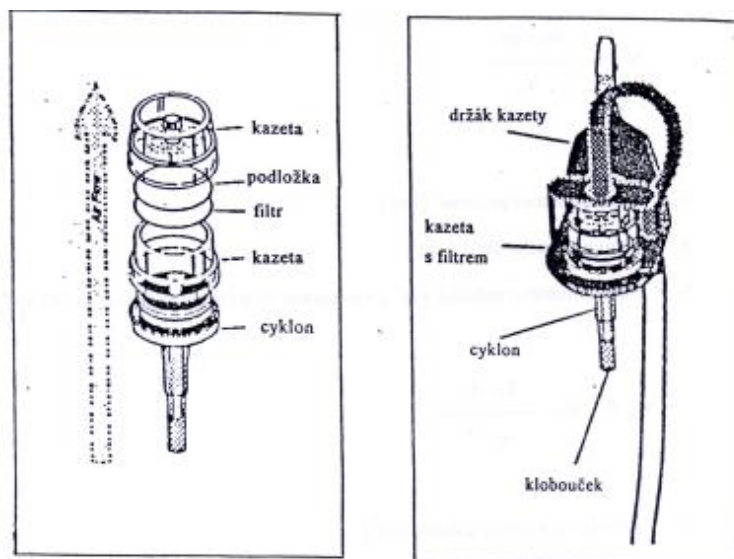
Obrázek 7: Schéma aparatury pro odběr vzorku pro hmotnostní měření pevných částic



Zdroj: [12]

Samotné měření hmotnostní koncentrace se provádí gravimetrickou metodou, jež měří hmotnost zachycených částic filtračním elementem. Filtr je v tomto případě vyroben ze skelných vláken, která jsou potažena tenkou vrstvou teflonu. Před měřením je filtr třeba nejdříve zvážit. Poté, co se filtr nainstaluje do držáku, je jím prohnán vzorek spalin. Následně je třeba filtr znovu vyjmout a zvážit. Detail filtru je možné vidět na obr. 8. [12]

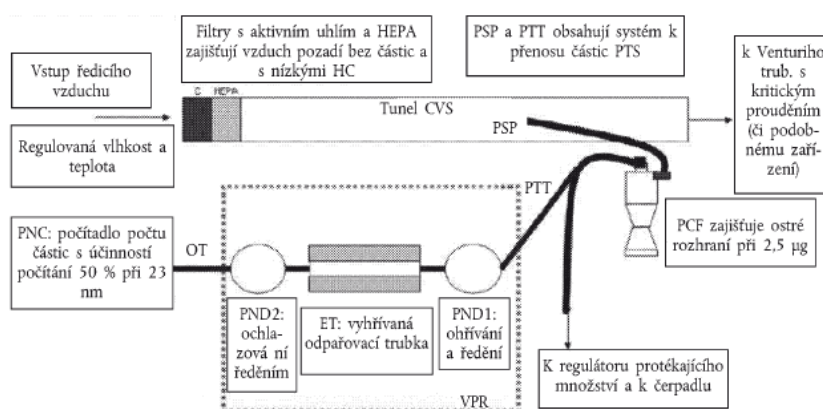
Obrázek 8: Konstrukce filtrů pro gravimetrické měření pevných částic



Zdroj: [12]

Pro odběr vzorku částic za účelem zjištění koncentrace pevných částic je využita aparatura na obr. 9. Ze sondy pro odběr částic (PSP) jsou výfukové plyny vedeny do separátoru částic (PCF); zde jsou eliminovány hrubé částice v rozmezí velikosti 2,5-10 nm v důsledku jejich nepravidelného tvaru. Poté přes trubku pro přenos částic (PTT) do separátoru těkavých částic (VPR). Separátor těkavých částic je tvořen zařízením pro ředění počtu částic (PND<sub>1</sub> a PND<sub>2</sub>) a zařízením k odpařování částic (ET). V prvním řediči (PND<sub>1</sub>) jsou spaliny naředěny a ochlazeny na teplotu 150°C, aby se snížily koncentrace částic a aby nedocházelo ke kondenzaci těkavých částic obsahujících SOF a sulfáty. V odpařovací trubce jsou spaliny ohřáty na teplotu 300-400 °C, přičemž těkavé frakce vytvořené v ředícím tunelu jsou zde převáděny do plynné fáze. V druhém řediči (PND<sub>2</sub>) jsou spaliny opět naředěny a ochlazeny na teplotu 35 °C, aby nedocházelo k další kondenzaci či adsorpci těkavých frakcí. [12] [14]

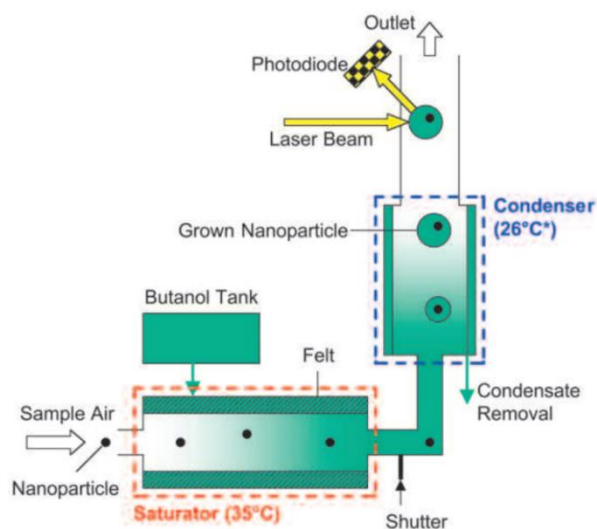
Obrázek 9: Schéma aparatury pro odběr vzorku pro měření koncentrace pevných částic



Zdroj: [12]

Vzorek je poté vpuštěn do počítadla částic (PNC), které je obvykle realizováno čítačem kondenzovaných částic (CNC). První částí zařízení je komora, ve které je vzorek saturován plynným butanolem. Částice společně s butanolvou parou proudí do chladicí kondenzační jednotky, kde plynný butanol kondenzuje na částicích, které v tu chvíli představují kondenzační jádra. Nanočástice ve vzorku zvětší svůj průměr, díky čemuž jsou nyní detekovatelné laserovým paprskem umístěným za kondenzační jednotkou. Každá zvětšená částice, jež projde laserovým paprskem, vytvoří rozptýlený paprsek světla, který je zachycen zrcátkem na fotodiodě a je převeden na elektrický puls. Pulsy se poté sečtou. Schéma CPC je na obr. 10. [15]

Obrázek 10: Schéma CPC

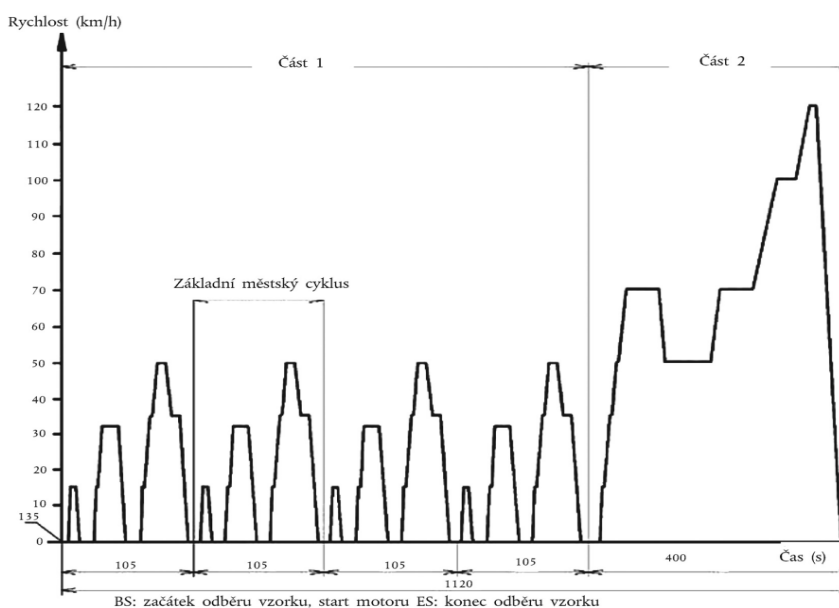


Zdroj: [15]

### 5.2.2 Jízdní cyklus

Jízdní cyklus NEDC obsahuje dvě části. První část je tvořena čtyřmi městskými cykly, přičemž každý cyklus se skládá z šesti fází: volnoběhu, zpomalení při vypnuté spojce, řazení rychlostních stupňů (prvního až třetího), zrychlení, periody konstantní rychlosti a zpomalování. Druhá část je tvořena jedním mimoměstským cyklem, který se opět skládá z šesti fází, nicméně doba trvání pro jednotlivé fáze je odlišná a cyklus je také doplněn o řazení čtvrtého a pátého rychlostního stupně. Obě fáze cyklu jsou vyobrazeny na obr. 11. [12]

Obrázek 11: Jízdní cyklus NEDC



Zdroj: [12]



### 5.2.3 Výpočet

Prvním výsledkem měření je hodnota udávající celkovou hmotnost částic vyprodukovanou za jeden kilometr. Jedinou dopočítávanou veličinou je zde objem zředěných spalin  $V_{\text{mix}}$ , který je v závislosti na použití objemového dávkovacího čerpadla či Venturiho trubice dopočítáván rozdílně. [12] Celý vztah pro výpočet je uveden v rovnici (4):

$$M_p = \frac{(V_{\text{mix}} + V_{\text{ep}}) \cdot P_e}{V_{\text{ep}} \cdot d} \left[ \frac{\text{g}}{\text{km}} \right] \quad (4)$$

kde:

$M_p$  = celková hmotnost částic na jeden kilometr [g/km]

$V_{\text{mix}}$  = objem zředěných spalin [l]

$V_{\text{ep}}$  = objem nenaředených spalin procházejících filtrem [l]

$P_e$  = hmotnost zachycených částic na filtru/filtrech [g]

$d$  = délka pracovního cyklu v kilometrech [km]

Druhým výsledkem měření je celkový počet částic vyprodukovaný za jeden kilometr neboli jejich koncentrace. Naměřená průměrná hodnota koncentrace částic  $C_s$  ve zředěných spalinách je zde korigována odděleným vícenásobným měřením jen v případě nedodržení předepsaného tlaku a teploty měření. [12] Výpočet se provede podle vztahu (5) :

$$N = \frac{V \cdot k \cdot \bar{C}_s \cdot \bar{f}_r \cdot 10^3}{d} \left[ \frac{\#}{\text{km}} \right] \quad (5)$$

kde:

$N$  = počet vyprodukovaných částic na jeden kilometr [# / km]

$V$  = objem zředěných spalin [l]

$k$  = korekce pro hodnoty naměřené počítadlem částic (pokud počítadlo částic pracuje s korekcí, je jeho hodnota 1)

$\bar{C}_s$  = korigovaná koncentrace částic v zředěných spalinách [# / cm<sup>3</sup>]

$\bar{f}_r$  = redukční faktor separátoru těkavých částic

$d$  = délka pracovního cyklu [km]

### 5.3 Měření dle předpisu EHK R49

Na těžší užitkové automobily se při homologacích vztahuje předpis EHK R49, jenž platí pro vozidla kategorie M<sub>2</sub> a M<sub>3</sub> a zároveň pro kategorie M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, N<sub>1</sub> a N<sub>2</sub> s referenční hmotností přesahující 2 610 kg. Zkouška se realizuje pro paliva: benzín, motorová nafta, etanol, LPG a CNG. Měření není v tomto případě realizováno dynamicky na válcovém dynamometru, ale na staticky na dynamometru s demontovaným motor. Jízdní cykly se zde mohou realizovat dva a to buď jízdní cyklus v ustáleném stavu WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) s teplým startem, nebo jízdní cyklus v neustáleném stavu WHTC (World Harmonized Transient Cycle) se studeným i teplým startem. Částice jsou odebírány systémem ředění plného toku, nebo systémem ředění části toku. Při výběru systému se vychází z celkového objemu produkovaných spalin – pro menší objemy spalin je vhodnější metoda CVS, zatímco pro větší objemy spalin je naopak vhodnější metoda PFS (Partial Flow Dilution System). [16]

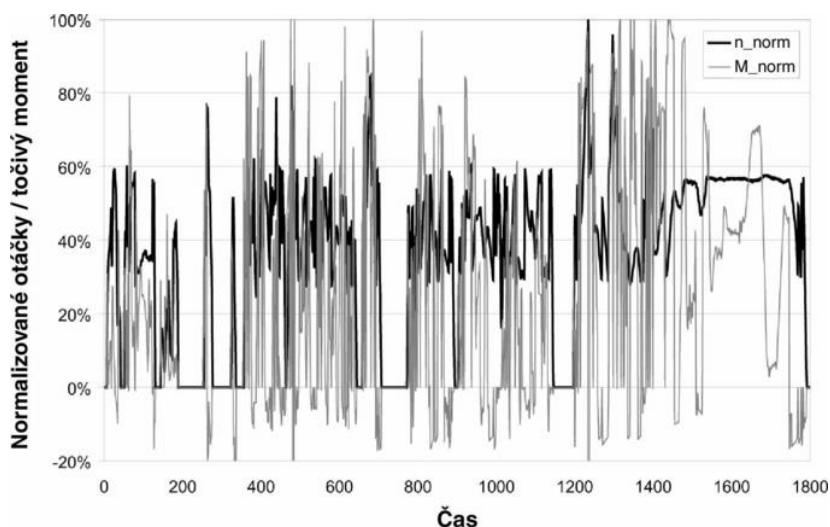
#### 5.3.1 Princip a měřící zařízení

Aparatura pro ředění a odběru vzorku částic je identická jako u měření podle předpisu EHK R83. Nicméně již bylo řečeno, že metodika EHK R49 toleruje i použití ředění části toku a to ve dvou variantách odběru vzorku částic – odběr celkového vzorku a odběr dílčího vzorku. Důvod užití ředění části toku vyplývá z celkového objemu přiváděných spalin. Motory s velkým zdvihovým objemem produkují větší objemy spalin, proto by se ředící tunely pro ředění plného toku musely dimenzovat na velké rozměry. Tento problém je užitím ředění části toku eliminován, jelikož průtok spalin je proporcionálně rozdělen ještě před vstupem do ředícího tunelu (odběrná sonda je již ve výfuku). Při ředění části toku tedy vzorkujeme celý průtok spalin, zatímco při ředění plného toku vzorkujeme jen část průtoku spalin. [16]

#### 5.3.2 Jízdní cyklus

Jízdní cyklus WHTC je série každou sekundu měnících se normalizovaných hodnot otáček a točivého momentu. Předepsané normalizované hodnoty otáček a momentu musí být nejprve denormalizovány s pomocí mapovací křivky. Při tomto procesu se normalizované hodnoty otáček a točivého momentu převedou pro daný motor na hodnoty referenční. Následně se provede zkušební cyklus, při kterém jsou porovnávány referenční hodnoty se skutečně naměřenými hodnotami otáček, točivého momentu a výkonu. Následně jsou naměřené hodnoty statisticky zpracovány metodou regresní analýzy, čímž dojde k ověření pravdivosti naměřených hodnot. Cyklus je ukázán na obr. 12. [16]

Obrázek 12: Jízdní cyklus WHTC



Zdroj: [16]

Jízdní cyklus WHSC je série každou sekundu měnících se režimů normalizovaných hodnot otáček a točivého momentu. Stejně jako v případě cyklu WHSC musí být normalizované hodnoty nejprve převedeny na referenční. Cyklus na obr. 13 se skládá celkem ze třinácti režimů, přičemž prvních  $20 \pm 1$  sekund není měřeno v důsledku přechodových jevů analyzátorů výfukových plynů. Po skončení cyklu se naměřené hodnoty opět vyhodnotí regresní analýzou. [16]

Obrázek 13: Jízdní cyklus WHSC

Režim	Normalizované otáčky (%)	Normalizovaný točivý moment (%)	Trvání režimu (s), včetně 20s lineárního přechodu
1	0	0	210
2	55	100	50
3	55	25	250
4	55	70	75
5	35	100	50
6	25	25	200
7	45	70	75
8	45	25	150
9	55	50	125
10	75	100	50
11	35	50	200
12	35	25	250
13	0	0	210
Součet			1 895

Zdroj: [16]

### 5.3.3 Výpočet

Stejně jako v případě měření podle předpisu EHK R83 se vyhodnocují částice z hlediska hmotnosti a koncentrace. Výpočet celkové hmotnosti částic se liší v závislosti na druhu použité aparatury, nicméně celkovou hmotnost zachycených částic lze pro každý ze dvou druhů zapojení ředění uvedených v kapitole 3.2.1 zjistit z ředícího poměru. [17] Jedinou lišící se veličinou je zde hmotnost zředěných výfukových plynů  $m_{ed(f)}$ , která se počítá rozdílně pro ředění celého toku a ředění části toku dle vztahu (6):

$$m_{PM} = \frac{m_p}{m_{sep}} \cdot \frac{m_{ed(f)}}{1000} \left[ \frac{g}{\text{zkouška}} \right] \quad (6)$$

kde:

$m_p$  = hmotnost částic za jednu zkoušku [g/zkoušku]

$m_p$  = je hmotnost částic na odběrných filtrech za jeden cyklus [mg]

$m_{sep}$  = hmotnost zředěných výfukových plynů prošlých odběrnými filtry [kg]

$m_{ed}$  = hmotnost zředěného výfukového plynu za jeden cyklus [kg]

$m_{ed(f)}$  = hmotnost rovnocenných zředěných výfukových plynů za jeden cyklus [kg]

Koncentrace částic  $N$  se vypočte obdobně jako při měření podle předpisu EHK R83 dle vztahu (7):

$$N = \frac{m_{de(f)}}{1.293} \cdot k \cdot \overline{C}_S \cdot f_r \cdot 10^6 \left[ \frac{\#}{\text{zkouška}} \right] \quad (7)$$

Výsledná koncentrace nakonec ještě přepočítává na práci vykonanou během cyklu, která musí být nejdříve vypočítána dle vztahu (8):

$$e = \frac{N}{W_{act}} \left[ \frac{\#}{\text{kWh}} \right] \quad (8)$$

kde:

$W_{act}$  = vykonaná práce v průběhu cyklu [kWh]

## 5.4 Alternativní metody měření pevných částic

Z kapitol 2.2-2.3 vyplývá, že při homologaci vozidel se zjišťuje pouze celková hmotnost částic či jejich koncentrace. Nicméně riziko pevných částic tkví především v jejich potenciálu vázat na sebe škodlivé látky. Tato vlastnost je dána podmínkami ve výfuku a hlavně rozměrovými vlastnostmi vzniklé částice, proto je kýžené zkoumat velikostní spektrum částic a jejich dimenzionální vlastnosti. Metody celkové hmotnosti částic a koncentrace byly probrány v kapitole 3.2. V následujících podkapitolách budou rozebrány metody pro

stanovení odlišných parametrů částic, které nepodléhají homologačním a testovacím měřením, nicméně jejich informační hodnota je neméně důležitá. Jedná se o metody měření:

- rozdělení velikost částic,
- hmotnosti uhlíku,
- hmotnost organických látek,
- povrchu částic,
- efektivní hustoty, morfologie a struktury částic.

#### 5.4.1 Hmotnost uhlíku

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2, na uhlíkové jádro mohou být navázány organické sloučeniny. V rámci měření pevných částic se zjišťuje obsah samotného uhlíku a organických sloučenin po jejich separaci. Rozlišují se celkem čtyři názvy označující stav uhlíku v částici:

- elementární uhlík (EC – elemental carbon),
- organický uhlík (OC – organic carbon),
- anorganický uhlík (IC – inorganic carbon) a
- celkový uhlík (TC – total carbon).

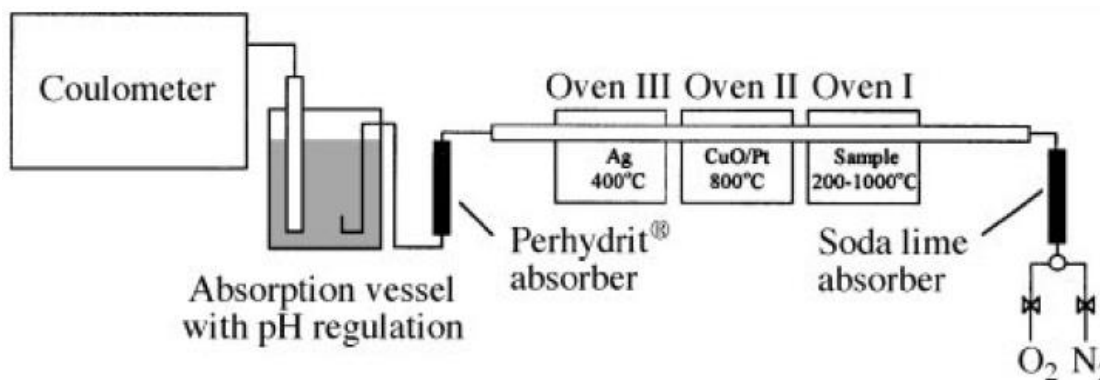
V případě gravimetrického měření se mluví též o termínu černý uhlík (BC – black carbon). Tyto částice zahrnují kromě uhlíku i neuhlíkaté sloučeniny a zbytky popela usazených na povrchu částice, jež nemohly být procesem ochlazení a naředění vzorků spalin odstraněny. Výsledek hmotnostní koncentrace částic z kapitoly 2.2.3 neudává tedy celkovou hmotnostní koncentraci částic, ale hmotností koncentraci černého uhlíku.

##### 5.4.1.1 Coulometrie

Coulometrie – na rozdíl od gravimetrie – neměří hmotnost černého uhlíku, ale zaměřuje se na zjištění hmotnosti elementárního uhlíku. Elementární uhlík je ten, který je čistě produktem spalování a obsahuje hlavně struktury grafitu nebo amorfního uhlíku. Je to však velmi časově náročný a nákladný postup. Jak je vidět na obr 14., vzorek filtru se zahřívá v průtoku kyslíku v první spalovací komoře na teplotu, při které se veškerý uhlík přemění na CO<sub>2</sub>. Následný CuO/PT katalyzátor zajistí úplnou přeměnu vzorku. Oxid siřičitý a chlorovodík jsou odstraněny v poslední spalovací komoře. Za komorami je ještě umístěn absorbér s peroxidem močoviny, který odstraní zbytky oxidu siřičitého, který by mohl ovlivnit pH výsledného CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> poté projde do nádoby, kde je absorbován do zásaditého roztoku Ba(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Coulometr obsah uhlíku ve vzorku stanoví z počtu coulombů potřebných k obnovení výchozí alkality absorpčního roztoku v průběhu elektrolýzy. Organický karbon je vyloučen desorpcí

adsorbovaných sloučenin za vysoké teploty použitím  $N_2$ . Formace  $CO_2$  je pojištěna ještě ohřevem vzorku v první spalovací komoře pod proudem  $O_2$ . [18]

Obrázek 14: Schéma coulometrie



Zdroj: [18]

#### 5.4.2 Rozdělení velikosti pevných částic

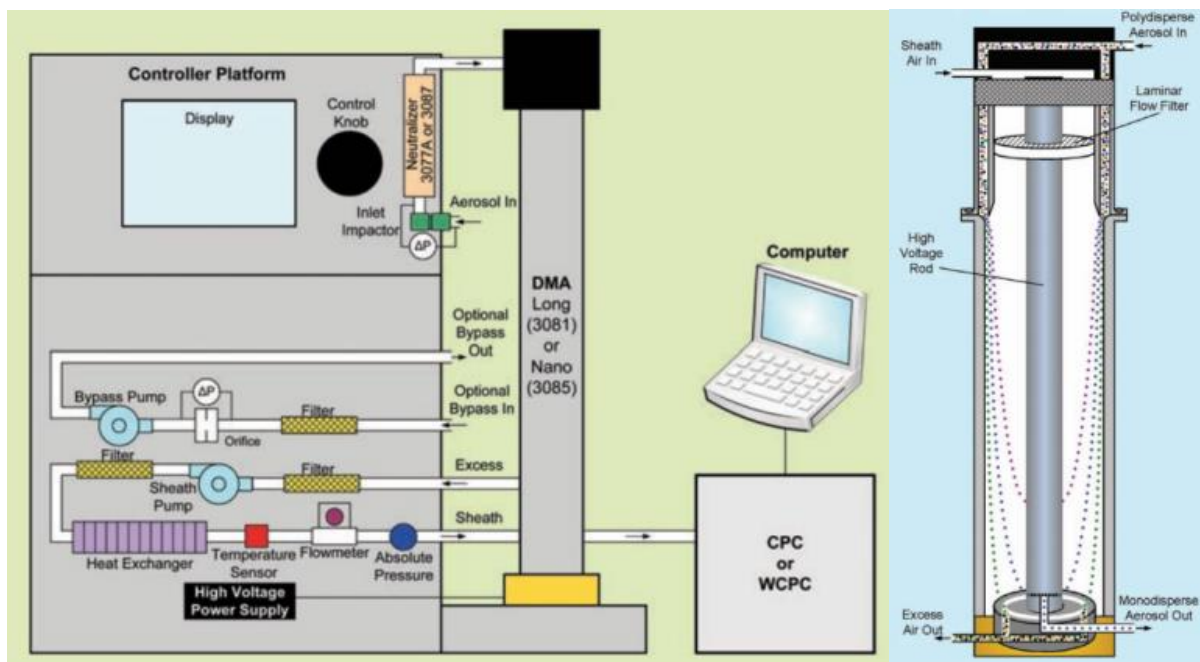
Rozdělení velikosti částic je po celkové hmotnosti částic a jejich koncentraci ve spalinách třetím nejvíce zkoumaným parametrem pevných částic. Jeho důležitost tví ve skutečnosti, že celková hmotnost a koncentrace neposkytují detailní informaci o skutečné zdravotní závadnosti částic. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4, z hlediska závadnosti jsou nejhorší nanočástice. Právě tyto částice můžeme měřit za pomoci přístrojů pro měření velikostního spektra.

##### 5.4.2.1 SMPS

Přístroj SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) měří velikostní spektrum pevných částic. Je založen na principu elektrické pohyblivosti respektive na pohybu volných nosičů náboje (v tomto případě částic) v elektrickém poli. Pumpa vsaje vzorek do impaktoru, kde se odstraní částice s aerodynamickým průměrem menším než 1  $\mu m$ . Poté proudí vzorek do aerosolového neutralizéru, kde je třeba dosáhnout rovnovážného stavu nabití částic. Toho je dosaženo vystavením vzorku v neutralizéru radioaktivním beta zářičům ( $^{85}Kr$ ,  $^{210}Po$ ,  $^{241}Am$ ). Poté vzorek putuje do analyzátoru DMA (Differential Mobility Analyser). Analyzátor na obr. 15 se skládá ze dvou elektrod – centrální tyče a vnější uzemněné trubice. Na centrální tyč je přivedeno vysoké napětí a je nabita záporným nábojem. Rozdíl mezi napětím centrální tyče a vnější trubice vytváří elektrické pole. Kladně nabitě částice jsou přitahovány k vnější trubici a záporně nabitě částice jsou přitahovány k vnitřní tyči. Elektrická pohyblivost spolu se silou elektrického pole ovlivní, v jaké části tyče se částice přitáhnou. V dolní části trubice je

šterbina, která propustí částice jen s jistou elektrickou pohyblivostí. Částice se slabší elektrickou pohyblivostí, které by se jinak přitáhly k tyči v místě šterbiny, analyzátor opustí. Změnou velikosti napětí se tedy klasifikují částice dle jejich pohyblivosti do úzkých intervalů. Intervaly částic jsou pak počítány CPC popsaným v kapitole 2.2.1. vyhodnoceny z hlediska velikosti. Velikost částic je vyjádřena jako průměr elektrické pohyblivosti. Ten je definován jako *průměr kulové částice jednotkové hustoty, která se v elektrickém poli pohybuje stejnou rychlostí jako příslušná částice.* [19] [20]

Obrázek 15: Schéma SMPS



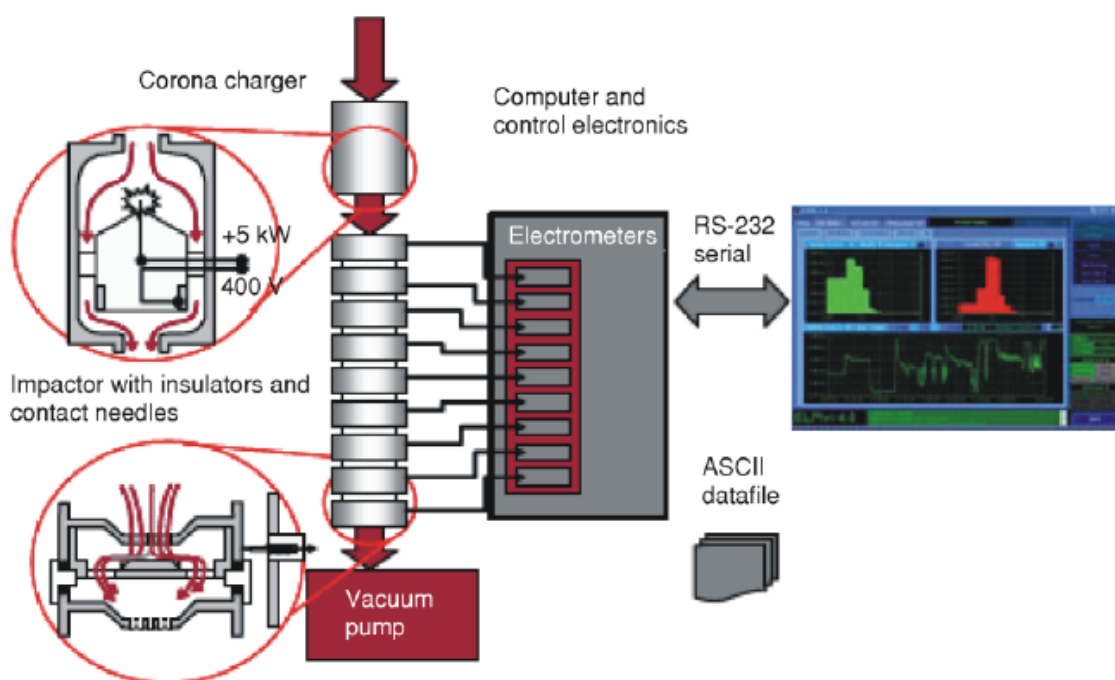
Zdroj: [21]

#### 5.4.2.2 ELPI

ELPI (The Electrical Low Pressure Impactor) na obr. 16 měří velikostní spektrum částic. S jeho pomocí je možno zjistit i hmotnost částic, popřípadě jejich morfologii a strukturu. Čerpadlo vsaje vzorek do trubice s drátem představující zápornou a kladnou elektrodu. Na drát je přiváděno vysoké napětí způsobující korónový výboj, který produkuje elektrostaticky nabitě částice. Vzniklé ionty a přístrojem nezměřitelné částice jsou odstraněny iontovou pastí. Nabitě částice poté putují do kaskádového impaktoru složeného ze série dvanácti elektricky izolovaných desek navržených na zachycení specifického velikostního spektra částic v závislosti na jejich setrvačnosti respektive aerodynamického průměru. Mezi každou deskou je tryska, jež usměrňuje proudnice vzorku na destičku. Ty jsou poté odkloněny o 90°. Částice s vysokou setrvačností nenásledují proudnice a utkví na záchytné desce. Částice s menší

setrvačností pokračují k další destičce. Impaktor pracuje s tlakem nižším než je atmosférický, aby se snížily setrvačné síly na částice; díky tomu se mohou měřit i menší částice. Každá deska je připojena k proudovému zesilovači a ten pak k elektrometru. Elektrometr měří výboje z jednotlivých desek a naměřený proud je úměrný počtu zachycených částic. Rozdělení velikosti částic je poté vypočteno na základě algoritmu beroucího v potaz vlastnost částic, nabíjecí element a fázi impaktoru. Velikost částic je vyjádřena jako aerodynamický průměr. Ten je definován jako *průměr koule o hustotě 1000 kg/m<sup>3</sup>, která má stejnou rychlost usazování jako příslušná částice.* [19] [3]

Obrázek 16: Schéma ELPI



Zdroj: [22]

### 5.4.3 Chemické složení pevných částic

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, používají se metody pro zkoumání černého a elementárního uhlíku. Nicméně z důvodu negativních účinků pevných částic je hlavní měřit organický uhlík. Organický uhlík představuje těkavé ve vodě rozpustné frakce sorbované na povrchu částic, zejména pak poly-aromatické uhlovodíky.

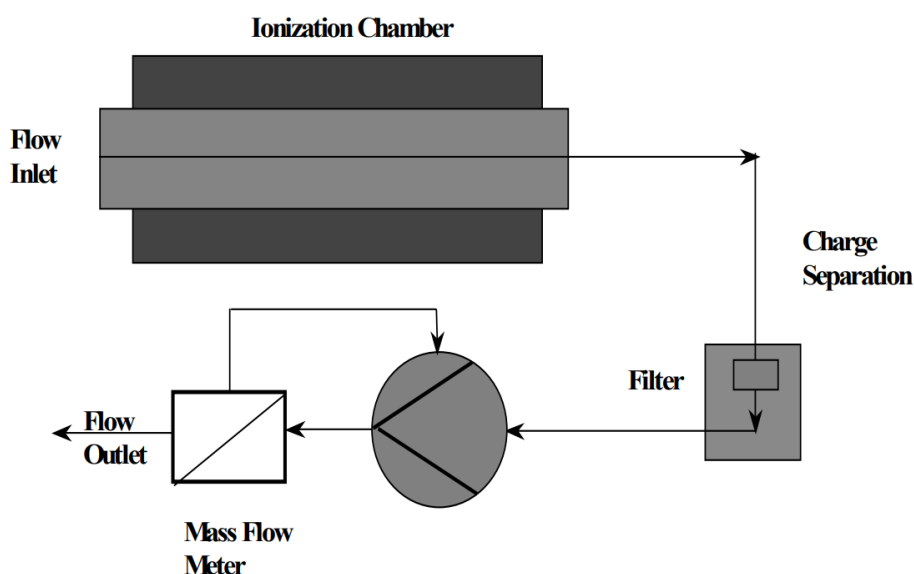
#### 5.4.3.1 PAS

Senzor typu PAS (Photoacoustic Aerosol Sensor) na obr. 17 je jednou z moderních metod pro stanovení organického uhlíku. Vzorek je nejprve ionizován pod excimerovou lampou z KrCl v ionizační komoře. Lampa je zvolena tak, aby její energie byla pod hranicí ionizace plyných



molekul, ale zároveň také nad prahem fotoelektrického jevu (aby mohlo docházet k uvolňování elektronů). Jen molekuly PAH jsou ionizovány, jelikož mají nízký ionizační potenciál. Po ionizaci PAH emitují fotoelektrony; ty připojí k molekulám kyslíku a vytvoří záporné ionty. Záporné ionty se poté vážou na částice větší velikosti. Menší částice zůstanou tedy kladně nabitě. Záporně nabitě částice se rozptýlí ke zdi ionizační komory nebo jsou odstraněny elektrickým polem. Kladně nabitě částice jsou zachyceny na filtru, kde elektrometr měří jejich náboj. Náboj je integrován podle času a udává fotoelektrický proud, který by měl být teoreticky úměrný hmotnosti PAH. [23] [24]

Obrázek 17: Schéma PAS



Zdroj: [24]

#### 5.4.4 Povrch pevných částic

Povrch částic může být též považován za relevantní vlastnost popisující zdravotní závadnost částic. A jelikož pevné částice nejsou přesně kulovitěho tvaru, je nejdříve nutno definovat, co vlastně povrch znamená. V literatuře se lze setkat s dvěma definicemi povrchu a to jsou:

- povrch BET (Brunauer, Emmett and Teller) a
- aktivní povrch.

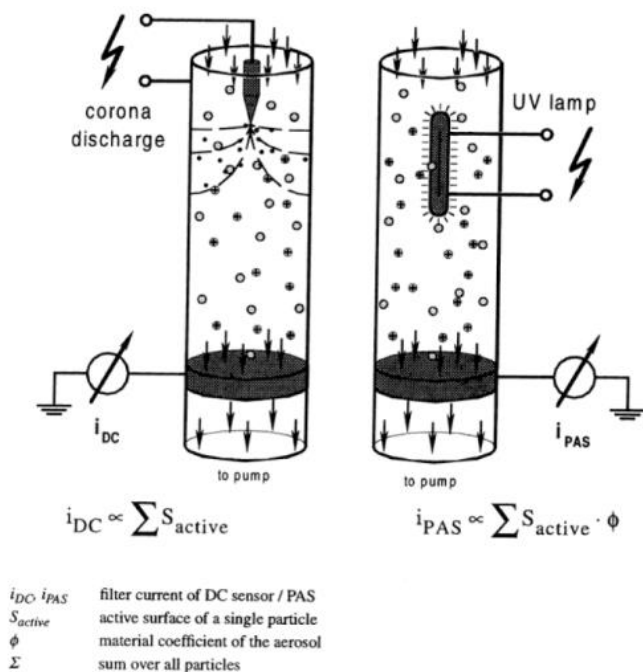
Povrch BET se týká počtu adsorbčních míst na částicích. Metoda BET měří množství plynu (typicky  $N_2$ ), jenž může být adsorbován na povrchu částice. Tento údaj slouží jako měřítko povrchu částice. Stejně tak jako coulometrie je tento postup časově náročný a nákladný. Aktivní povrch je část geometrického povrchu částice přístupného ionty, molekulami a atomy

v okolním plynu. Souvisí spíše s kinematikou adsorpcí než s dostupnými adsorpčními plochami. [7]

#### 5.4.4.1 DC

Senzor DC (Diffusion charging sensor) na obr. 18 je velmi podobný senzoru PAS z hlediska konstrukce i z hlediska principu, nicméně měří aktivní povrch částic. Sensor je založen na principu koróny. V ionizační komoře je tenký drát, na nějž je přivedeno napětí. Pokud je počáteční napětí překročeno, dochází k samovolnému tzv. doutnavému výboji a dochází k nárazové ionizaci. V průběhu nárazové ionizace dochází ke srážce částic, přičemž dochází k uvolnění elektronů. Důsledkem ionizace tedy vznikají kladné ionty a elektrony. Kladné ionty jsou odpuzovány drátem, který představuje kladný potenciál, a proudí do prostoru, kde dochází k difuzi kladných iontů na částice menších velikostí. Záporně nabité částice se rozptýlí ke zdi ionizační komory nebo jsou odstraněny elektrickým polem. Kladně nabité částice jsou zachyceny na filtru, kde elektrometr měří jejich náboj. Náboj je integrován podle času a udává fotoelektrický proud, který je úměrný ploše částic. V případě senzoru PAS musí být proud ještě podělen koeficientem materiálu. [25]

Obrázek 18: Schéma DC



Zdroj: [25]

#### 5.4.5 Efektivní hustota, morfologie a struktura pevných částic

Efektivní hustota částic je důležitým parametrem, jelikož určuje pohybové vlastnosti částic; může být zároveň využita pro převod velikostního rozložení do hmotnostního rozložení částic; a zároveň také poukazuje na vztah pohyblivosti a aerodynamického průměru částic. Za efektivní hustotu částic je označována taková hustota, která je produktem dvou měření aerosolů. Nejčastěji je produktem měření průměru elektrické pohyblivosti a hmotnostního měření (hustota je funkcí objemu a hmotnosti) nebo průměru elektrické pohyblivosti a aerodynamického průměru.

Morfologie a struktura částic má velký vliv právě na hustotu a na její vztah mezi průměrem a povrchem částic. Morfologie částic ovlivňuje jejich chování v atmosféře a má pravděpodobně vliv i na zdravotní riziko částic. Morfologie se nejčastěji zkoumá pod mikroskopy TEM (Transmission electron microscopes) a SEM (Scanning Electron Microscopy).

Nejvíce používanou metrikou pro kvantifikaci struktury je fraktální dimenze. Tento rozměr popisuje agregované částice, což je uskupení spojených částic o stejné velikosti. Fraktální dimenze je vztah mezi počtem primárních částic v agregátu a charakteristickým poloměrem (poloměrem gyrace), který se řídí mocninným zákonem. [7]

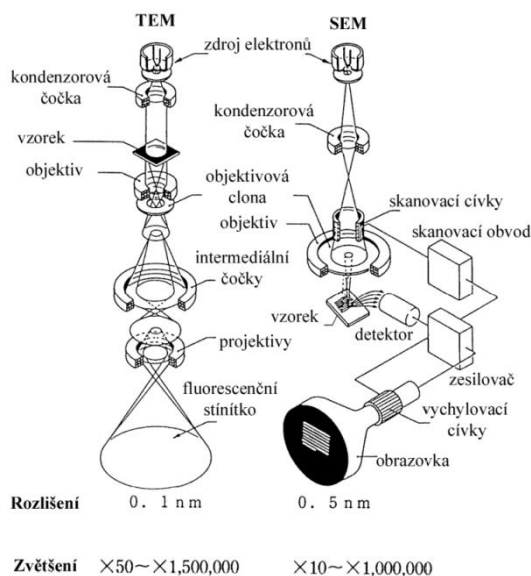
##### 5.4.5.1 SEM a TEM

Rastrovací elektronický mikroskop (SEM) na obr. 19 vytváří obraz na principu odražených elektronů. Zdrojem bývá elektronová tryska, kde je anodou Wehneltův válec a katodou Wolframové vlákno. Na katodu je přivedeno urychlovací napětí, díky kterému jsou elektrony urychlovány směrem ke vzorku. Mezi zdrojem a vzorkem je systém čoček. Kondenzorová čočka reguluje průměr vyzářeného paprsku a objektivová čočka ho zaostřuje na vzorek. Mezi nimi je umístěn pár skenovacích cívek, snímají povrch řádek po řádku v osách X a Y. Díky tomu vznikne obdélníkový rastr jak na vzorku, tak i na obrazovce. Elektrony, které dopadnou na vzorek, poté způsobí emisi sekundárních elektronů, odražených elektronů, RTG záření a dalších signálů. Pro každý signál existuje rozdílný detektor. Ze signálů se poté sestaví výsledný obraz. [26] [27]

Transmisní elektronový mikroskop (TEM) na obr. 19 vytváří obraz na základě průchodu elektronů vzorkem na rozdíl od rastrovacího mikroskopu. Zdrojem je opět elektronová tryska, přičemž jsou elektrony urychlovány potenciálem mezi anodou a katodou. Elektrony poté proudí do magnetického pole kondenzorové čočky, která reguluje intenzitu paprsku, který prochází vzorkem. Objektivová čočka ho poté zaostřuje. Intermediální a projektivová čočka zvětšují obraz a promítají ho na fluorescenčním stínítku. Stínítko je pokryto vrstvou ZnS,

který odráží dopadlé elektrony ve formě světla o vlnové délce viditelné oku. Součásti mikroskopu jsou uloženy ve vzduchotěsné válcové nádobě, aby nedocházelo ke vzniku oblouku a aby se snížila frekvence kolizí elektronů s atomy plynu. Srovnání konstrukce obou mikroskopů je možné vidět na obr. 19. [26] [27]

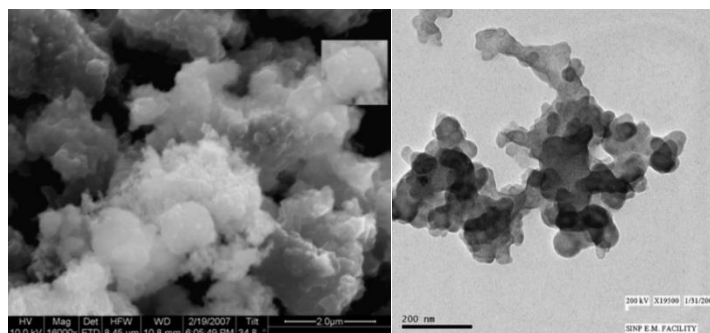
Obrázek 19: Schéma mikroskopů TEM a SEM



Zdroj: [26]

Oba mikroskopy jsou rozdílné z hlediska principu, ale také se liší v důležitých funkčních parametrech. TEM mikroskop poskytuje vyšší zvětšení a vyšší rozlišení obrazu, nicméně SEM poskytuje při nižším zvětšení jasnější obraz. SEM vytváří 3D obrazy na rozdíl od TEM. SEM je tedy vhodnější ke zkoumání povrchu a morfologie, zatímco TEM je vhodnější pro zkoumání vnitřního složení. Na obr. 20 je možné vidět výstupy z obou mikroskopů, přičemž byly zkoumány částice zachycené na filtrech při gravimetrickém měření. [26] [27]

Obrázek 20: Ukázka pevných částic pod mikroskopy SEM a TEM



Zdroj: [27]

## 6 Praktické měření produkce pevných částic

Cílem následujících kapitol je provést měření produkce pevných částic za pomoci přístroje EEPS. Zaprvé je třeba popsat měřicí techniku, která byla v měření použita. Nejprve budou objasněny charakteristiky přístroje EEPS jako např. popis zařízení, princip, veličiny a jeho výstupy. Následně je popsána zbylá měřicí a měřená technika ve zkušební laboratoři Technické fakulty ČZU. Po popisu použité techniky se práce soustřeďuje na praktickou ukázkou měření za pomoci přístroje EEPS a samozřejmě na interpretaci naměřených hodnot. Výsledky jsou diskutovány v závěru práce společně s možnými připomínkami a návrhy na zlepšení měření.

### 6.1 EEPS

Model 3090 přístroje EEPS je dalším možným zařízením pro měření pevných částic. Vychází z Whitbyho aerosolového analyzátoru z 60. let minulého století, jenž byl prvním přístrojem založeným na principu elektrické pohyblivosti. Stejně jako již popsany přístroj SMPS je založen na klasifikaci částic na základě jejich elektrické pohyblivosti. V porovnání se SMPS měří menší velikostní spektrum částic, nicméně je přesnější pro měření proměnlivých podmínek chodu motoru (akceleraci, deceleraci) a měří o mnoho rychleji v řádech desetin sekund. Přístroj je navrhnut na měření produkce pevných částic při měřicích cyklech. Užívá se při měření na motorových a válcových dynamometrech:

- pro měření dieselových i zážehových motorů s rozdílnými systémy pro přípravu směsi,
- pro zkoumání efektivity/ucpávání filtrů pevných částic a
- pro kalibraci motorů ve vztahu k emisím.

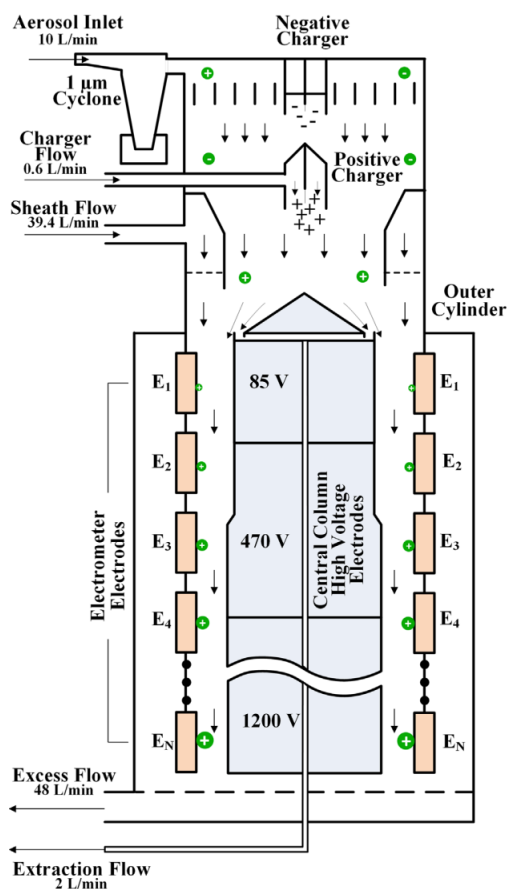
#### 6.1.1 Princip EEPS

EEPS na obr. 21 pracuje na principech unipolárního nabíjení, klasifikace dle elektrické pohyblivosti a detekci náboje za pomoci elektrometrů. Vzorek je nejprve s průtokem 10 l/min nasán přes cyklón, který separuje částice s aerodynamickým průměrem o velikosti 1  $\mu\text{m}$ , aby nedocházelo k případné interferenci měřeného spektra částic, popřípadě ke kontaminaci vnitřku přístroje. Částice jsou nabíjeny zápornou nabíječkou za pomoci korónového výboje, jenž vystaví částice iontům záporné polarity, čímž získají všechny částice stejný náboj. Poté jsou částice znovu vystaveny intenzivnějšímu korónovému výboji, jenž vystaví částice vyššímu počtu kladných iontů. Proud vzduchu o průtoku 0.6 l/min je přiveden ke kladné nabíječce, aby ji udržoval v čistotě. Částice blízko kladné nabíječky jsou vystaveny přebytku

iontů, proto jsou extrakčním průtokem 2 l/min proudícím blízko nabíječky odvedeny pryč. Tímto způsobem získají částice rovnoměrné rozložení náboje.

Částice poté vstoupí do klasifikační zóny přístroje mezi centrální elektrodou připojenou ke kladnému vysokému napětí a vnější válcový plášť (druhá elektroda). Po vstupu je proud spalin ještě nařazen přes filtr HEPA průtokem 39.4 l/min čistého vzduchu, který zamezuje průtoku aerosolu vstoupit do oblasti okolo centrální elektrody. Vnitřní elektroda je rozdělena do tří sekcí s rozdílným napětím, aby se dosáhlo logaritmického rozdělení velikosti částic. Vnější elektroda je složena z dvaceti čtyř elektricky izolovaných detektorových elektrod připojených na elektrometr. Proud částic je odpuzován elektrickým polem vzniklým mezi elektrodami a částice putují k detektorovým elektrodám. Částice s vyšší elektrickou mobilitou jsou zachyceny detektorovými elektrodami nahoře, zatímco ty s nižší jsou elektrickým polem odkloněny k detektorovým elektrodám dole. Proud na elektrodách je měřen elektroměrem. Z proudu jsou poté výpočetní technikou vyhodnocovány hledané veličiny.

Obrázek 21: Schéma EEPS



Zdroj: [28]

### 6.1.2 Měřené veličiny

Hlavními měřenými veličinami přístroje jsou koncentrace a velikostní spektrum částic. Přístroj měří částice v rozmezí 5,6 až 560 nm a rozřazuje je do třiceti dvou velikostních kanálů. Rozložení aerosolů se řídí lognormálním rozdělením, které dostáváme z EEPS na výstupu. Na ose X je tedy zpravidla lognormální rozložení velikosti částic  $D_p$  a na ose Y je normalizovaná koncentrace částic  $dN/d\log D_p$ .  $dN$  představuje počet částic ve velikostním kanálu a  $d\log D_p$  je rozdíl mezi horní a dolní naměřenou hranicí velikostního kanálu.  $D_p$  tedy představuje střední průměr velikostního kanálu. Normalizovaná koncentrace je v podstatě normální koncentrace vydělená 1/32 respektive vynásobená 32. Koncentrace je vyjádřena jako  $[\#/cm^3]$  respektive jako počet částic na jeden kubický centimetr naředěných spalin.

Kromě velikostního spektra a koncentrace částic přístroj vyhodnocuje také jejich povrch, objem a hmotnost. Při výpočtu těchto parametrů se uvažuje částice jako koule. V případě výpočtu hmotnosti je uvažována hustota částice  $\rho$  odpovídající tabulkové hodnotě hustoty částice pro konkrétní velikostní kategorii. Vztahy pro výpočet povrchu, objemu a hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Veličiny počítané přístrojem EEPS

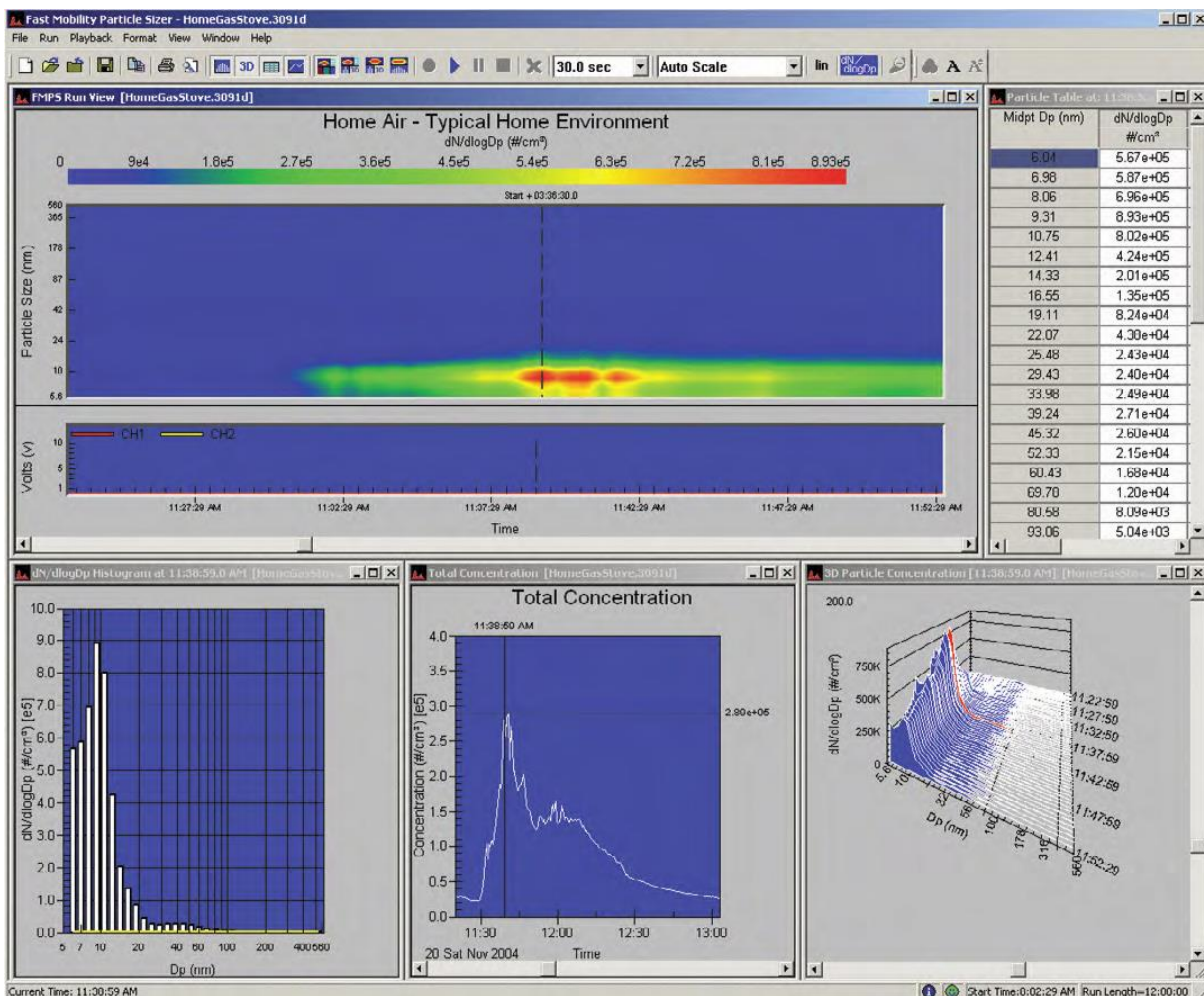
Parametr	Výpočet	Jednotka
povrch	$dS = dN \cdot \pi D_p^2$	$\#/cm^3$
objem	$dV = dN \cdot (\pi/6) D_p^3$	$nm^3/cm^3$
hmotnost	$dM = dN \cdot (\pi/6) D_p^3 \rho$	$\mu g/cm^3$

### 6.1.3 Výstup EEPS

Výstupy z přístroje (viz. obr. 22) zpracovává program |TSI| Engine Exhaust Particle Sizer. Data program vytvoří jak v tabulkové, tak i v grafické podobě. V tabulkové podobě je zobrazen záznam měření s popisem a údaji o času měření, koncentraci částic v daných velikostních kanálech, povrchu částic, objemu, hmotnosti, tlaku a teplotě při měření atd.. Data jsou programem též zpracovány buď v podobě:

- 3D grafu pro měření velikostního rozdělení částic,
- histogramu pro měření velikostního rozdělení částic či
- průběhu koncentrace částic v čase.

Obrázek 22: Výstupy z EEPS

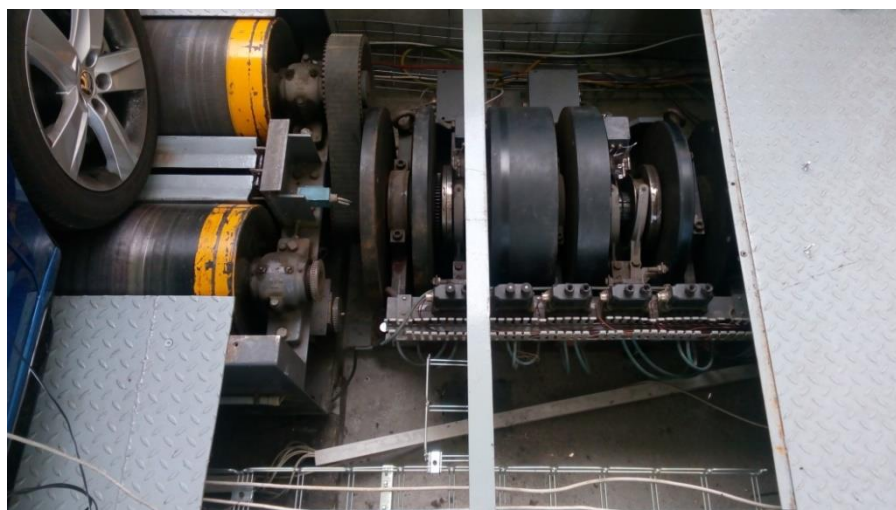


## 6.2 Válcová zkušebna

Měření bylo realizováno na válcové zkušebně katedry Vozidel a pozemní dopravy. Zkušebna je určena pro homologaci vozidel s hmotností do 3,5 tuny. Válcovou zkušebnu tvoří dva válce s protiskluzovým povrchem sloužící k přenosu energie mezi koly vozidla a zkušebnou, které jsou z obou stran spojeny řetězem. Z jedné strany je k válcům připojen stejnosměrný DC motorgenerátor a vířivý dynamometr. Stejnosměrný elektrický motor představuje odpor vzduchu a vířivá brzda je určena k měření výkonu vozidla. Z druhé strany je k válcům připojena sada setrvačníků doplněných přídatnými setrvačníky pro simulaci setrvačné hmotnosti vozidla. Na obr. 23 je možné vidět zapojení setrvačníků.

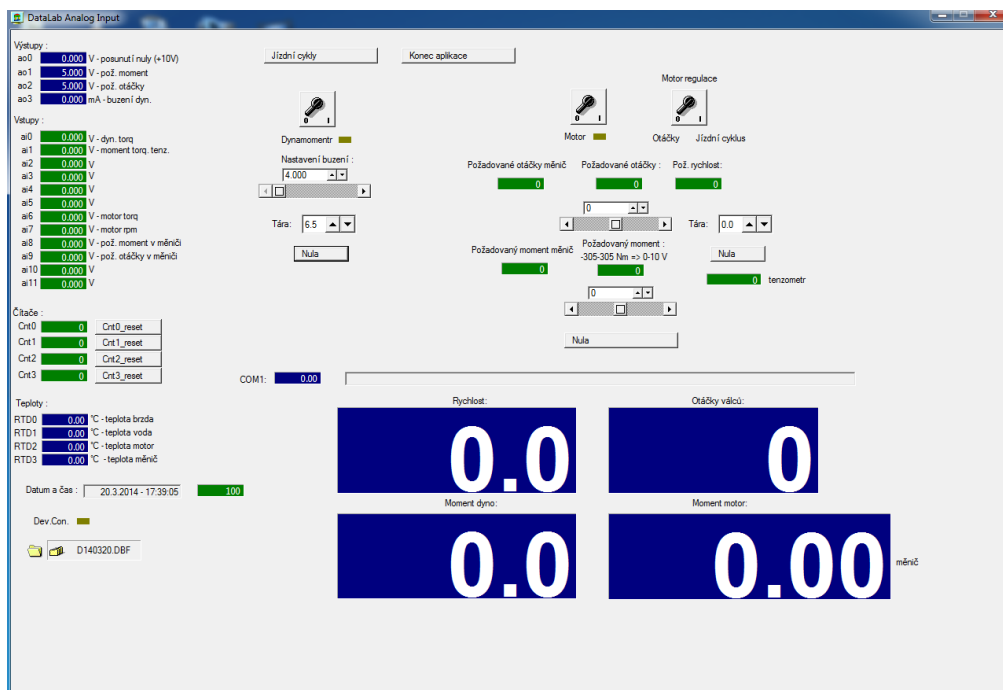


Obrázek 23: Válcová zkušebna



Válcová zkušebna byla řízena systémem Datalab. V prostředí ControlWeb na obr. 24 byl vytvořen řídicí program, s jehož pomocí je možné ovládat soustrojí zkušebny. Systém mimo jiné sbírá data z měření, s pomocí kterých můžeme doplnit informace získané analyzátozem částic.

Obrázek 24: Prostředí ControlWeb



V tabulce 3 je možné vidět parametry jednotlivých komponent válcové zkušebny:

Tabulka 3: Parametry válcové zkušebny

Součást	Parametr		
válce	Obvod	1145	mm
DC motorgenerátor	maximální brzdný výkon	56	kW
	maximální brzdný moment	305	N.m
	maximální otáčky	3000	min <sup>-1</sup>
vířivý dynamometr	maximální brzdný výkon	125	kW
	maximální brzdný moment	478	N.m
	maximální otáčky	8000	min <sup>-1</sup>
setrvačníky	základní hmotnost	680	
	přídavné hmotnosti	900; 450; 225;	kg
		120; 112,5	

### 6.3 Měření automobilů

Pro praktické měření na válcové zkušebně byly vybrány vozy značky Škoda. Jelikož se nejedná o komparativní diplomovou práci, byly zvoleny automobily, které se lišily vlastnostmi motoru, hmotností a jízdními vlastnostmi. Automobily byly také zvoleny s ohledem na fakt, že se jedná o vozidla určena právě k testování. Katedry Vozidel a pozemní dopravy. Přehled parametrů automobilů je uveden v tabulce 4 společně s jejich fotodokumentací na obr. 25.

Tabulka 4: Technické informace o automobilech

Model automobilu	Fabia 1.2 HTP	Octavia 2.0 FSI combi	Rapid 1.6 TDI Spaceback	Roomster 1.4 TDI
Motor	zážehový, atmosférický	zážehový, atmosférický	vznětový, přeplňovaný	vznětový, přeplňovaný
Systémy tvorby palivové směsi	vícebodové vstřikování	přímé vstřikování	common rail	sdužená vstřikovací jednotka
Počet válců a ventilů	řadový tříválec, 6 ventilů	řadový čtyřválec, 16 ventilů	řadový čtyřválec, 16 ventilů	řadový tříválec, 6 ventilů
Palivo	benzín	benzín	nafta	nafta
Zdvihový objem	1,198 cm <sup>3</sup>	1,984 cm <sup>3</sup>	1,598 cm <sup>3</sup>	1,422 cm <sup>3</sup>
Výkon	40 kW	110 kW	85 kW	59 kW
Točivý moment	106 N.m při 3000 min <sup>-1</sup>	200 N.m při 3500 min <sup>-1</sup>	250 N.m při 1500 min <sup>-1</sup>	195 N.m při 2200 min <sup>-1</sup>
EURO limit	EURO 4	EURO 4	EURO 6	EURO 4
Rok výroby	2003	2004	2016	2006
Počet kilometrů	136 000 km	105 000 km	12 500 km	102 000 km
Servisní hmotnost	1 055 kg	1 515 kg	1 260 kg	1 240 kg
Maximální rychlost	150 km.h <sup>-1</sup>	212 km.h <sup>-1</sup>	190 km.h <sup>-1</sup>	165 km.h <sup>-1</sup>
Akcelerace 0-100 km.h <sup>-1</sup>	18,5 s	9,4 s	10,3 s	14,7 s
Spotřeba paliva	7,8/4,8/5,9 l/100 km	8,87/5,18/6,5 l/100 km	5,0/3,4/4,1 l/100 km	5,1/3,76/4,26 l/100 km

Obrázek 25: Měřené automobily



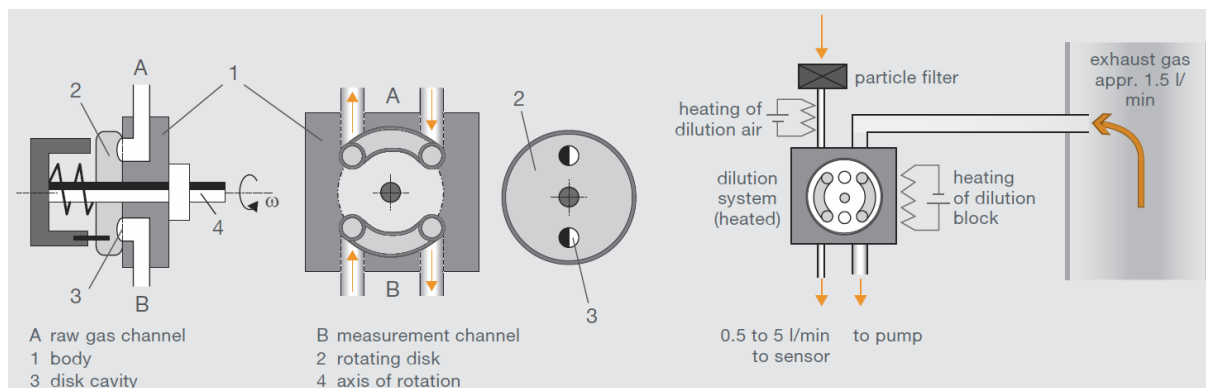
#### 6.4 Metodika měření přístrojem EEPS

Po zapnutí přístroje EEPS je nutno počkat 10 minut, při kterých dochází k náběhu řídicí elektroniky, stabilizaci tlaku a teploty v systému. Těchto 10 minut též slouží k tomu, aby se přístroj zbavil náboje na jednotlivých elektrometrech; k vyprchávání náboje dochází pouze v tomto časovém intervalu. Dalším krokem je kontrola napětí na vnitřní centrální elektrodě, která je složena ze tří segmentů o napětích 85, 470 a 1200 V. V případě poklesu napětí je třeba centrální elektrodu manuálně vyčistit. Příčinou poklesu napětí jsou totiž usazeniny z výfukového traktu, jež se časem ukládají na povrchu elektrody. Pokud se usazeniny na elektrodě ponechají, dochází k narušení elektrického pole mezi elektrodami a detekční elektrody tedy nemusí zachytit všechny částice. Čistění se provádí izopropylalkoholem, nicméně lze provádět téměř jakýmkoliv rozpouštědlem či ředidlem. Posledním krokem uvedení do provozu je filtrace šumu, který by se měl pohybovat v rozsahu 1-2000 #/cm<sup>3</sup>. Odchyly šumu jsou opět spojené s usazeninami uvnitř přístroje, nicméně v tomto případě se jedná o usazeniny na prstencích detektorových elektrod, které zachytávají částice pro elektrometry, které je poté přepočítávají na elektrický proud.

Po seřízení přístroje EEPS je ještě třeba nastavit ředící zařízení výfukových plynů. Před přístrojem EEPS se ještě nachází přístroj MD19-3E se systémem pro ředění s rotačním diskem (viz. obr. 26), který představuje sekundární ředění a slouží k udržení koncentrace a velikostního rozdělení částic na cestě do samotného přístroje a k zabránění procesu kondenzace a nukleace těkavých látek. Hlavní částí přístroje je rotační disk s dutinami

odebírající jistý objem surového plynu. Poměr ředění surového plynu je lineární funkcí objemu dutiny, počtu dutin na disku, frekvence otáčení a průtoku ředícího vzduchu. Výměnné disky jsou k zařízení dva, přičemž pro účely měření automobilů je lepší volit disk s deseti otvory než disk s osmi otvory.

Obrázek 26: Schéma ředícího zařízení MD19-E

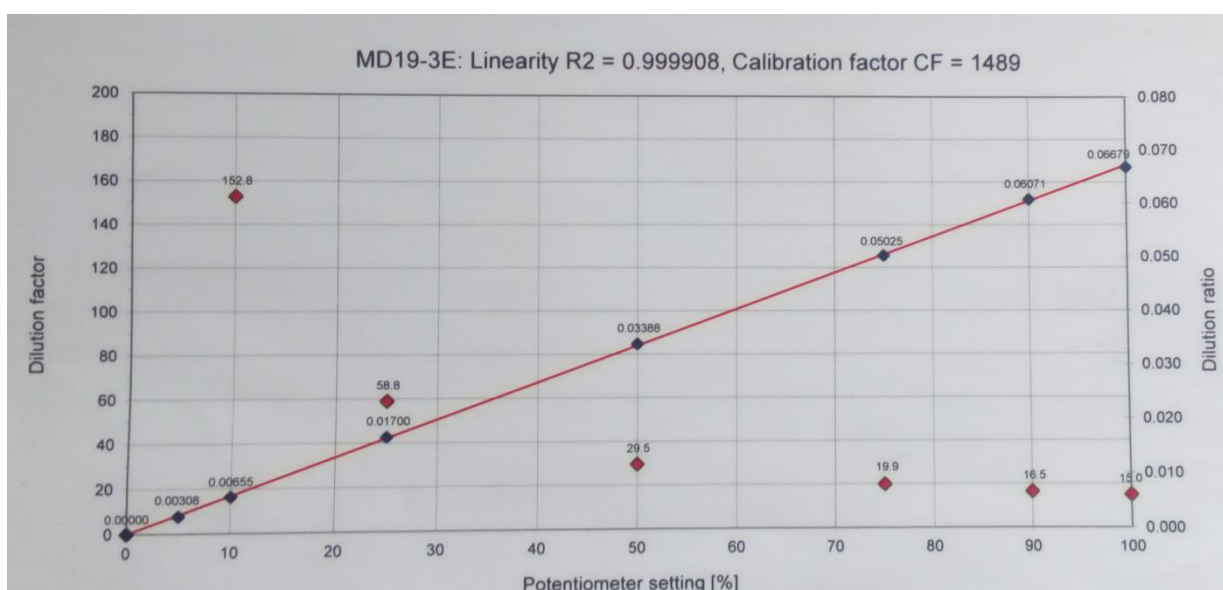


Zdroj: [30]

Ředící zařízení se nastavuje potenciometrem se škálou 0-10 V DC. Pokud chceme dosáhnout jistého ředícího poměru či faktoru, je třeba se podívat na kalibrační křivku přístroje. Tu je možné vidět na obr. 27, přičemž modré body značí ředící poměry a červené body značí ředící faktory. Nejnižší napětí, tedy napětí na potenciometru 0,5 V odpovídá ředícímu poměru 0.00308 a ředícímu faktoru 152,8. Pro účely tohoto měření bylo na potenciometru nastaveno napětí 1,5 V. Tato hodnota odpovídající ředícímu poměru 0,0106 a ředícímu faktoru 100,1 (hodnoty odečteny z kalibrační křivky na obr. 27). Výsledky koncentrace částic se tedy buď vynásobí ředícím poměrem 0,0106, nebo vydělí ředícím faktorem 100,1. Ředící poměry a faktory se volí v závislosti na druhu vozidla, motorizaci, způsobu zatěžování atd. Velikost ředění je velmi citlivá záležitost a bývá empirickou zjišťovanou hodnotou, která vychází z míry zanášení měřicího přístroje EEPS a též z kvality naměřených dat.

Po ukončení měření je nutné odebrat měřicí sondu, aby mohl přístroj nasávat čerstvý okolní vzduch. Tento úkon je nutné provést, jelikož po odpojení sondy ředícího zařízení se v přístroji EEPS stále vyskytují spaliny z měřeného vozu. Toto preventivní opatření chrání přístroj před usazováním zbytků spalin, a tedy snižuje čas strávený na údržbě přístroje.

Obrázek 27: Kalibrační křivka ředícího zařízení MD19-3E



## 6.5 Postup měření

Měření bylo provedeno na popsané válcové zkušebně ve dvou fázích. Měření bylo provedeno tak, aby bylo lehké opakovatelné a srovnatelné. Zajatý cyklus vycházel z homologačního cyklu NEDC, aby se docílilo co nejrealnějších podmínek, ve kterých jsou automobily provozovány. Cyklus byl zkrácen z časových důvodů a maximální rychlost se v celém experimentu pohybovala okolo 80 km/h. Průběh cyklu je možné vidět v kapitole 4.5.1, kde je zároveň okomentován i průběh měřené koncentrace částic.

Druhá fáze pokusu byla věnována zjištění maximální produkce pevných částic, čehož bylo dosaženo tak, že byly automobily vystaveny třem prudkým akceleracím (z volnoběhu až na maximální otáčky) na zařazený třetí převodový stupeň.

V první řadě bylo vždy vozidlo nastartováno a umístěno na válcový dynamometr přední nápravou. Poté bylo vozidlo zajištěno na dynamometru jisticími pásy připojenými z jednoho konce k vlečnému oku automobilu a z druhé konce k úchytům zkušebny, byl před něj v dostatečné vzdálenosti postaven mobilní ventilátor, jenž chladil motor v průběhu měření. Před přední ochranné sklo byla umístěna obrazovka upevněná na železné konstrukci, na které běželo prostředí ControlWeb systému Datlab zobrazující parametry měření (rychlost, moment, otáčky atd.). Poté byl připojen analyzátor s ředícím zařízením, jehož odběrná sonda byla vložena do výfukového potrubí (viz. obr. 28). Automobil na dynamometru je možné vidět na obr. 29. Před měřením bylo provedeno zahřátí motoru na provozní teplotu.

Obrázek 28: Obrázek 28: EEPS s ředicím zařízením



Obrázek 29: Automobil na válcovém dynamometru



## 6.6 Výsledky měření

Měření byla realizována ihned za sebou v pořadí Škoda Fabia, Octavia, Rapid a Škoda Roomster; v tomto pořadí budou v následujících kapitolách okomentovány. Výsledky byly poté exportovány systémem Matlab a programem analyzátoru EEPS do programu Microsoft Excel 2010, kde byly výsledky poté graficky zpracovány. Hlavními zkoumanými závislostmi popsány v následujících několika podkapitolách jsou:

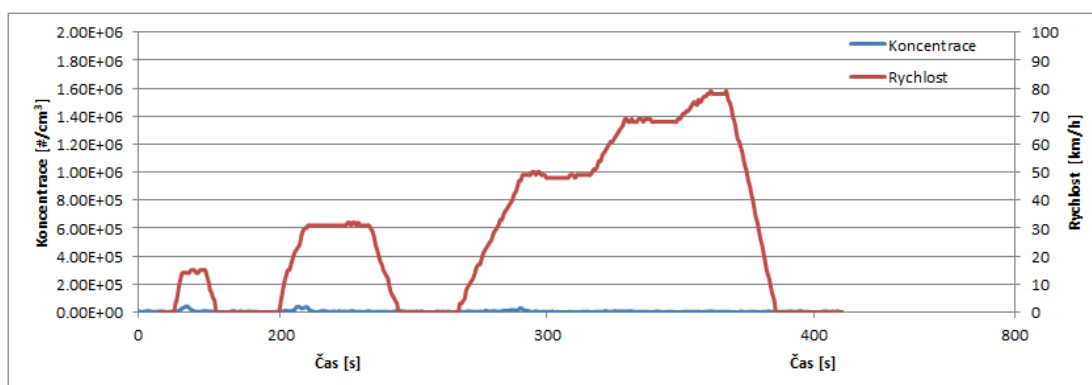
- průběh produkce částic a rychlosti v čase (době měření),
- maximální produkce částic,
- celková produkce částic,
- průměrná produkce částic a
- rozdělení velikosti částic.

Cílem následujících kapitol je tedy zjistit chování pevných částic v reálném čase, zhodnotit jejich produkci a rozdělení velikosti. Kromě výsledků jsou rozebrány i možné důvody a příčiny pro zjištěné výsledky.

### 6.6.1 Průběh produkce částic a rychlosti v čase

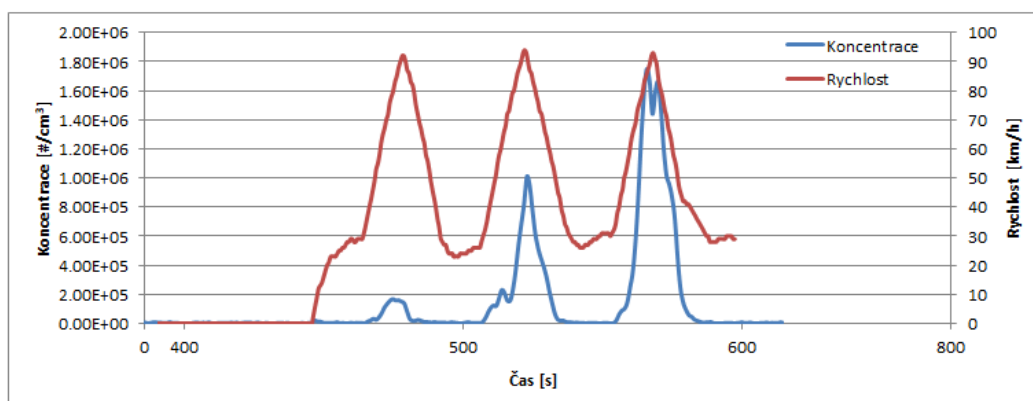
V případě automobilu Škoda Fabia nedošlo k téměř žádné produkci pevných částic v průběhu měřicího cyklu. Pro srovnání přímého a nepřímého vstřikování je nutné vzít v úvahu homogenitu připravované směsi. Systém nepřímého vícebodového vstřikování umožňuje delší dobu k promíslení paliva se vzduchem, což vede k větší homogenitě směsi a tudíž k dokonalejšímu spalování. Proto automobil neprodukoval téměř žádné částice (viz. graf 1).

Graf 1: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Fabia v měřicím cyklu



Z výsledků mnoha studií bylo zjištěno, že zážehové motory produkují částice hlavně při studených startech, prudkých akceleracích a vysokých provozních zatíženích. Tato skutečnost se projevila v akceleračním měření automobilu Škoda Fabia, kdy se produkce částic zvyšovala s každou další akcelerací (viz. graf 2). Motor v režimu bohaté směsi produkoval částice až v řádech  $10^6$ , což byla nejvyšší zaznamenaná hodnota produkce u všech automobilů. Příčina vysoké produkce částic při vyšších zatíženích je způsobena vypnutím lambda regulace, kdy motor pracuje se součinitelem přebytku vzduchu nižším než 1.

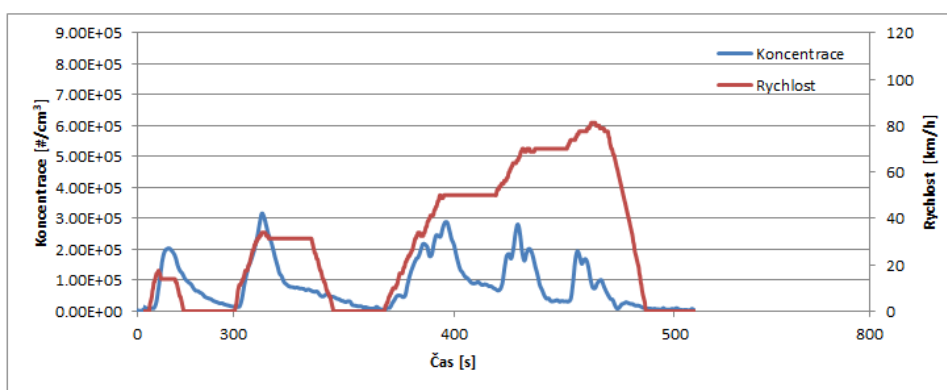
Graf 2: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Fabia při akceleračním měření





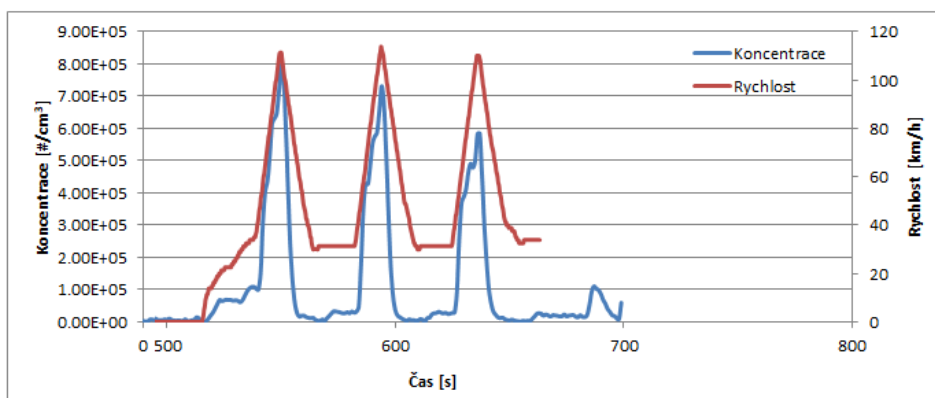
V případě automobilu Škoda Octavia docházelo k vysoké produkci částic při všech zrychleních (viz graf 3). Čím je křivka rychlosti strmější (vyšší zrychlení), tím větší je růst koncentrace. Ve srovnání s nepřímým vstřikováním má přímé vstřikování kratší čas na promísení paliva se vzduchem, což se projevuje vyšší produkcí částic. V případě motorů koncernu VW se navíc jedná o spalování vedené stěnami, jenž sice prodlužuje čas na přípravu směsi, nicméně může vést ke vzniku lokalit s heterogenní směsí a tedy vyšší produkci částic. V případě tohoto měření mohlo dojít k právě takovému spalování, hlavně v rozmezí 140-250 s či 210-270 s.

Graf 3: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Octavia v měřícím cyklu



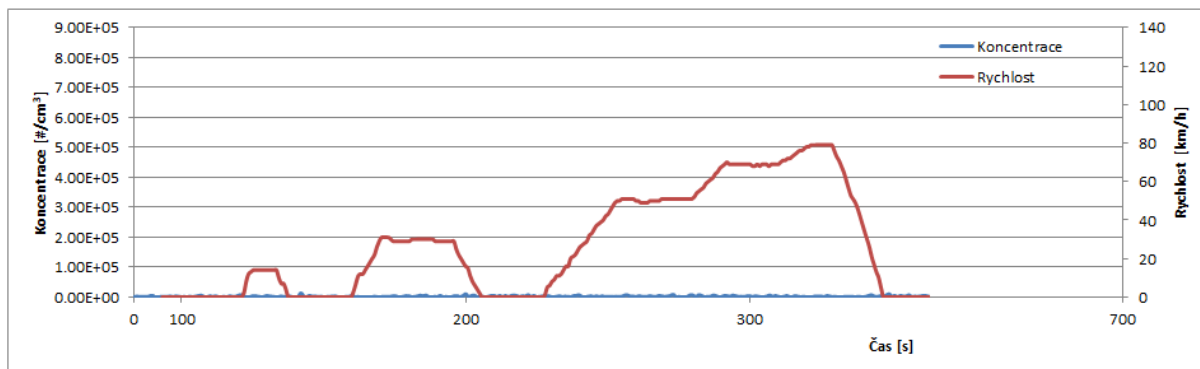
Při akceleračním měření docházelo též k vysoké produkci pevných částic při všech třech zrychleních (viz. graf 4). Vyšší produkce částic je dána systémem řízení přípravy směsi, kdy řídicí jednotka změnila chod motoru z režimu vrstvené směsi do režimu homogenní směsi, kdy se směs obohacuje a dochází k omezení přiváděného vzduchu. Ve srovnání s automobilem Škoda Fabia ale maximální produkce nevzrostla nad řád  $10^6$ , což vysvětluje snahu automobilek o kombinaci přímého a nepřímého vstřikování.

Graf 4: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Octavia při akceleračním měření



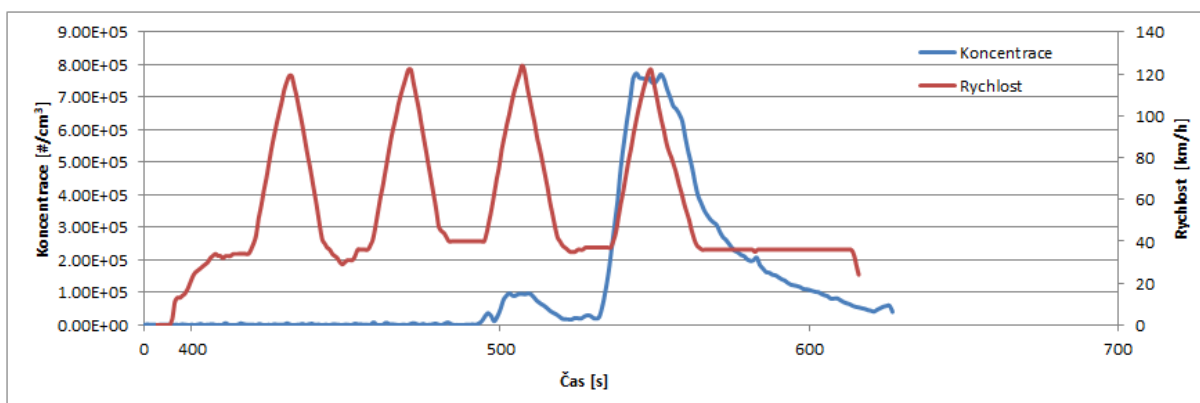
První měřený automobil Škoda Rapid podpořil předpoklad, že nebude produkovat téměř žádné částice v průběhu homologačního cyklu (viz. graf 5).

*Graf 5: Průběh koncentrace automobilu Škoda Rapid v měřícím cyklu*



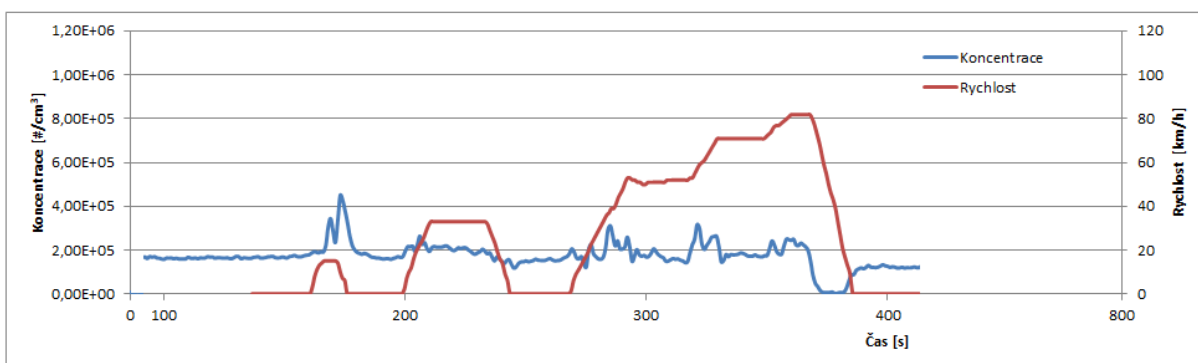
Při posledních dvou akceleracích mezi 500-600 s (viz. graf 6) byly překvapivě naměřeny pevné částice. Automobil Škoda Rapid je provozován pouze v rámci areálu univerzity, proto nemá možnost přirozeně realizovat regeneraci filtru, což může způsobit jeho zanesení. U vznětových motorů je při akceleraci pod zatížením ve výfuku velký průtok vzduchu, proto mohlo dojít též k uvolnění usazenin buď z filtru či výfukového traktu, které poté byly vyhodnoceny jako vyprodukované částice. Druhým možným důvodem naměřených částic může být pasivní regenerace filtru. Při vyšším zatížení motoru dochází ke vzrůstu teploty výfukových plynů, které poté způsobí vznícení částic usazených ve filtru. Regenerace se mohla spustit právě při třetí akceleraci a při poslední akceleraci už automobil plně regeneroval. Jaká z výše zmíněných hypotéz je v tomto případě pravděpodobnější, vyplývá z kapitoly 6.6.5, která se zabývá velikostním rozdělením částic.

*Graf 6: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Rapid při akceleračním měření*



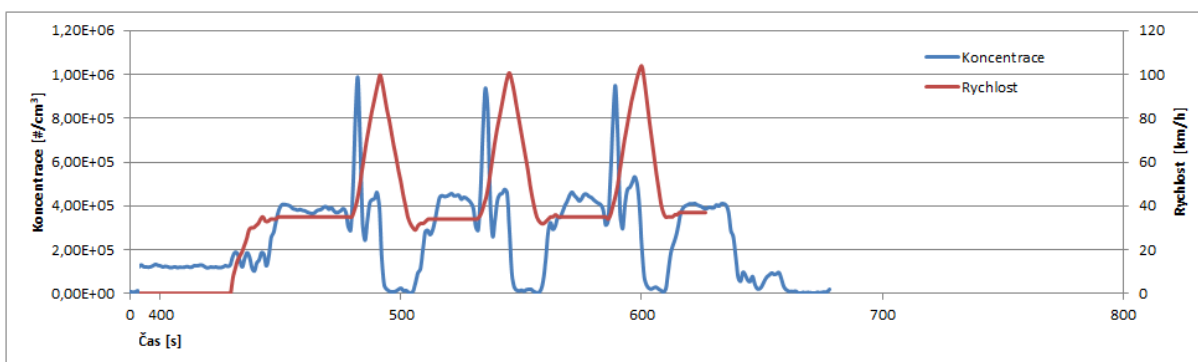
Automobil Škoda Roomster též naplnil očekávání, co se týče vysoké produkce částic. Jako jediný automobil produkoval částice i při volnoběhu (viz. graf 7). Koncentrace se v průběhu cyklu chovala jako u ostatních vozů; docházelo k nárůstům koncentrace částic při akceleracích. Koncentrace pouze oscilovala v průběhu celého cyklu kolem hodnoty  $2 \times 10^5$   $\#/cm^3$ .

Graf 7: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Roomster v měřícím cyklu



Automobily Škoda Roomster a Škoda Fabia byly jediné automobily dosahující koncentrace v řádech  $10^6$ , nicméně automobil Škoda Fabia měla tuto produkci jen při jedné akceleraci (viz. obr. 6), zatímco automobil Škoda Roomster ji produkovala při všech třech zrychleních. Koncentrační špičky před každou akcelerací mohou být způsobeny turbodmychadlem, kdy při náhlém zrychlení dochází k jeho prodlevě. Proto díky menšímu množství přiváděného vzduchu dochází k vyšším koncentracím částic.

Graf 8: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Roomster při akceleračním měření

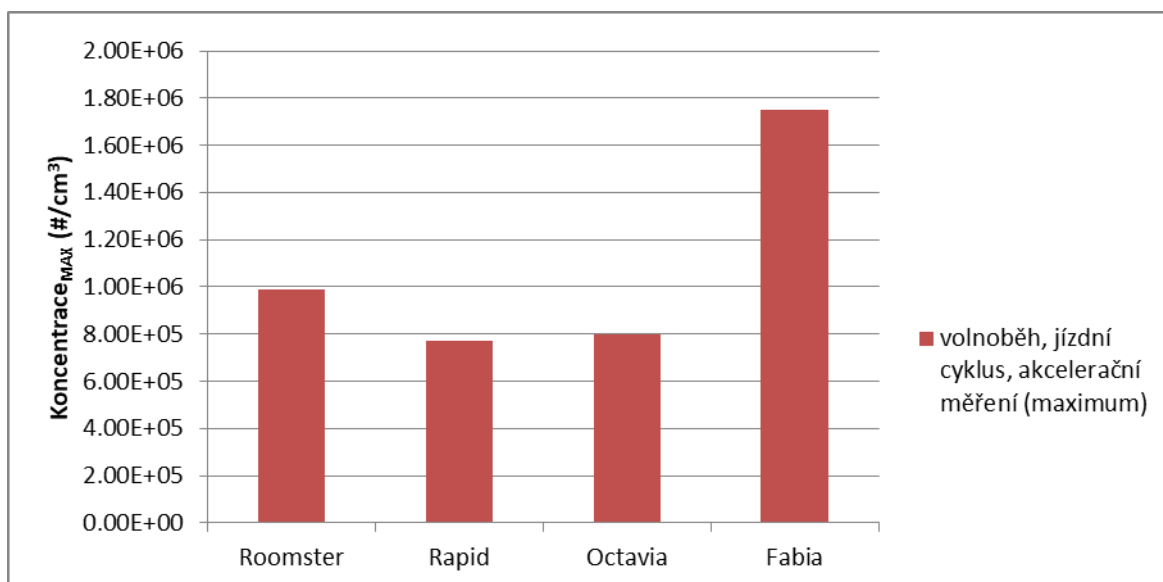


## 6.6.2 Maximální produkce částic

Zhodnocení maximální dosažené produkce bylo založeno na zjištění maximální hodnoty koncentrace za celé měření.

Nejvíce překvapivého výsledku – v negativním slova smyslu – dosáhl automobil Škoda Fabia, u něhož se při poslední akceleraci vyprodukovalo cca.  $1,75 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$  (viz. graf 9). U Škody Fabie byl výsledek velmi překvapivý, jelikož v průběhu měření neměla téměř žádnou produkci. Produkce automobilu Škoda Roomster téměř dosáhla řádu  $10^6$ , přesněji řečeno hodnoty  $9,87 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ . V porovnání se Škodou Fábíí se ale jedná o 56% nižší maximální produkci; tedy více než poloviční rozdíl produkce. Přibližně stejných výsledků dosáhly automobily Škoda Octavia a Škoda Rapid, jejichž produkce činily  $7,98 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  a  $7,93 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ . Výsledek automobilu Škoda Octavia je pozitivní ve vztahu ke kritice zážehových spalovacích motorů s přímým vstřikem kvůli jejich vysoké produkci při prudších akceleracích. Výsledek testu automobilu Škoda Rapid je však diskutabilní z důvodu, že neznáme původ naměřených částic při posledním měření. Může se jednat o částice velmi rozdílného složení, než bylo naměřeno u ostatních automobilů, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole. Vzniká tím tedy otázka, zdali dané hodnoty produkce částic u Rapidu vůbec kvantifikovat a zohlednit ve výsledku měření.

Graf 9: Maximální produkce pevných částic

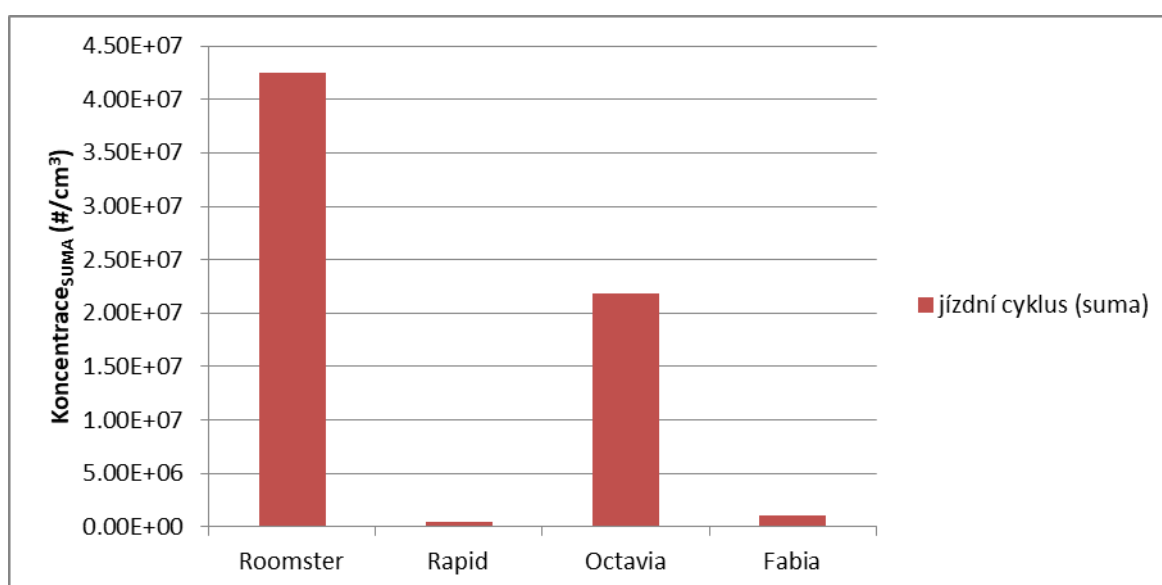


### 6.6.3 Celková produkce částic

Zhodnocená celkové produkce byla založena na sečtení koncentrací všech velikostních kanálů v jednotlivých časových úsecích jízdního cyklu.

Automobil Škoda Fabia zaznamenal nejvyšší maximální produkci částic, nicméně z grafu 10 je patrné, že v průběhu cyklu vyprodukoval jen zanedbatelné množství částic a to  $1,02 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ . Výsledek automobilu Škoda Octavia potvrdil, že při akceleracích produkují zážehové motory s přímým vstřikováním vysoké koncentrace částic. V předchozí kapitole se ukázalo, že jeho maximální produkce nebyla při prudké akceleraci tak vysoká, nicméně po sečtení produkce za měřicí cyklus vyprodukoval nejvíce částic hned po automobilu Škoda Roomster a to  $2,18 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ . Za zmínku stojí fakt, že se jedná o přibližně o poloviční produkci toho, co vyprodukuje dieselové vozidlo bez filtru pevných částic. Automobil Škoda Roomster, podle očekávání, vyprodukoval nejvíce částic v měřeném cyklu a to  $4,25 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ . Absence filtru pevných částic předurčuje automobil Škoda Roomster k produkci nadměrného množství částic. Poslední měřený automobil Škoda Rapid nepropustil díky filtru pevných částic téměř žádné částice, nicméně v grafu má malé zastoupení. Naměřená koncentrace  $4,55 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  je pravděpodobně způsobena produkcí částic nukleačního módu, které prošly filtrem díky svému malému průměru. Nicméně koncentrace těchto částic je tak nepatrná, že ji není možno srovnávat s ostatními automobily Škoda Roomster a Škoda Octavia.

Graf 10: Celková produkce pevných částic

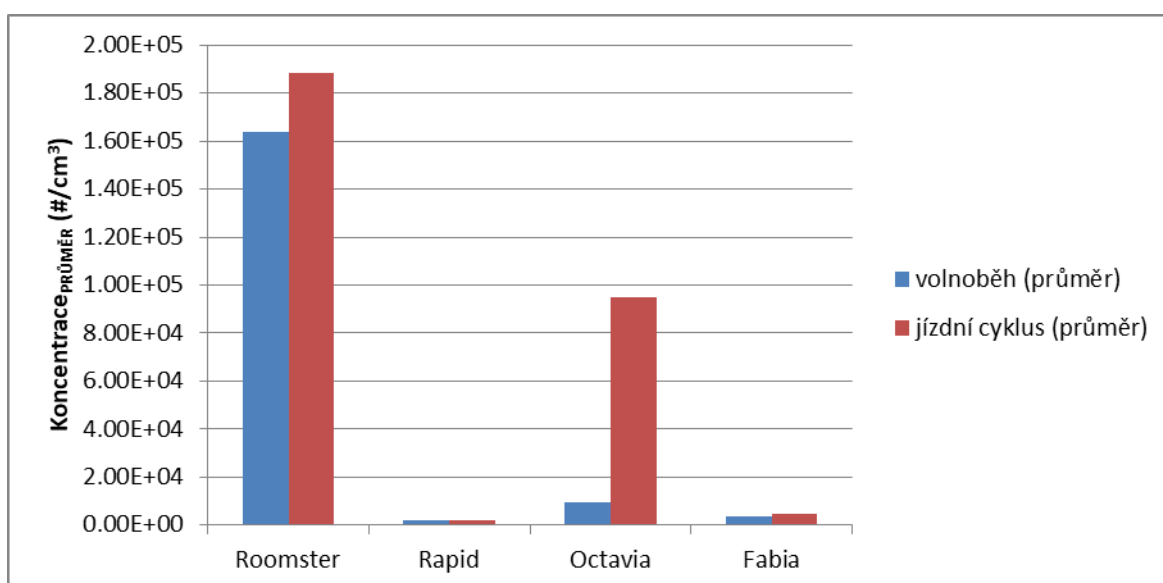


#### 6.6.4 Průměrná produkce částic

Zhodnocení celkové produkce částic bylo založeno na sečtení koncentrací všech velikostních kanálů v jednotlivých časových úsecích jízdního cyklu a volnoběhu a vypočtení jejich průměru.

Co se průměrné koncentrace částic vyprodukované za cyklus týče, odpovídá koncentrační spektrum výsledkům z předchozí kapitoly. Automobil Škoda Fabia průměrně produkoval za cyklus  $4,44 \times 10^3$  #/cm<sup>3</sup> a při volnoběhu  $3,84 \times 10^3$  #/cm<sup>3</sup> (viz. graf 11). Automobil Škoda Octavia průměrně produkoval za jízdní cyklus  $9,48 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>. Nicméně je zde velký propad mezi produkcí při jízdním cyklu a při volnoběhu, kdy při volnoběhu automobil průměrně produkoval o řád nižší koncentraci částic a to  $9,53 \times 10^3$  #/cm<sup>3</sup>. Je tedy zřejmé, že vůz produkuje částice hlavně při akceleracích. Automobil Škoda Rapid průměrně produkoval stejně jako Škoda Fabia zanedbatelné koncentrace částic a to  $2,00 \times 10^3$  #/cm<sup>3</sup> při jízdním cyklu a  $1,87 \times 10^3$  #/cm<sup>3</sup> při volnoběhu. Automobil Škoda Roomster průměrně produkoval v jízdním cyklu  $1,88 \times 10^5$  #/cm<sup>3</sup>. Pokud se podíváme na průměrnou produkci při volnoběhu činící  $1,64 \times 10^5$  #/cm<sup>3</sup>, je možné vidět, že celková produkce při volnoběhu a při akceleracích se liší jen velmi málo. Lze tedy říci, že v případě automobilu Škoda Roomster nezáleží tolik na jízdním režimu ve vztahu k průměrné produkci částic v případě měřicího cyklu. Podíváme-li se však zpět do kapitoly 6.6.2, automobil Škoda Roomster produkuje značné množství částic při prudké akceleraci, což svědčí o vysoké závislosti mezi jízdním režimem a okamžitou produkcí částic při vyšších zatíženích motoru.

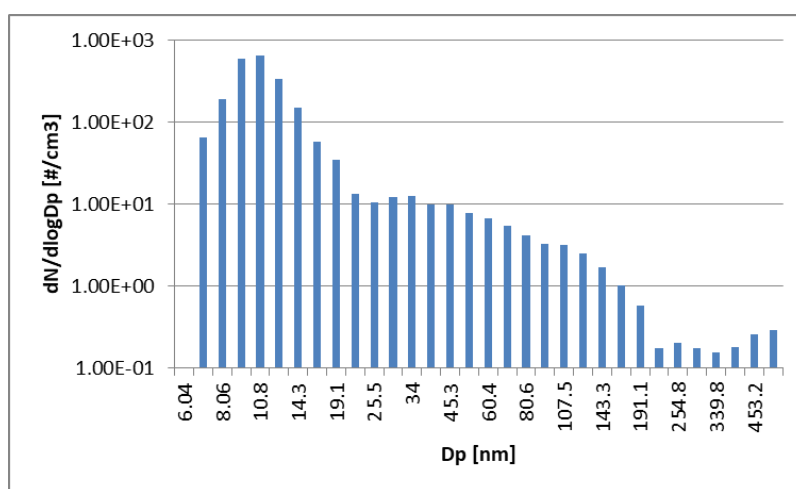
Graf 11: Průměrná produkce pevných částic



### 6.6.5 Rozdělení velikosti pevných částic

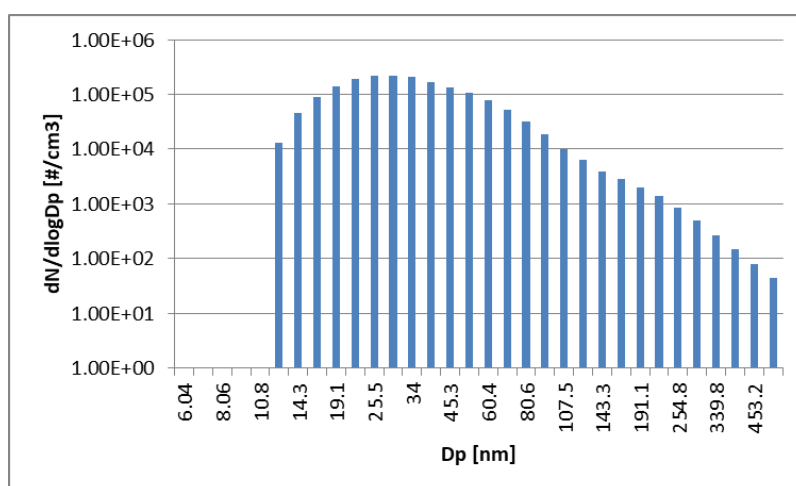
Po zhodnocení koncentrací je nutné též zhodnotit velikostní rozdělení částic. Následující grafy ukazují rozdělení částic v rámci obou fází měření buď jako průměrné rozdělení částic při volnoběhu nebo rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci částic u akceleračního měření. Zdrojová data těchto grafů je možné vidět v kapitolách 8.1-8.4. Automobil Škoda Fabia produkoval částice nukleačního módu, zejména pak částice okolo průměrů 9,31-10,8 nm (viz. graf 12) při maximální koncentraci  $6,46 \times 10^2 \text{ \#/cm}^3$ .

Graf 12: Průměrné rozdělení částic při volnoběhu automobilu Škoda Fabia



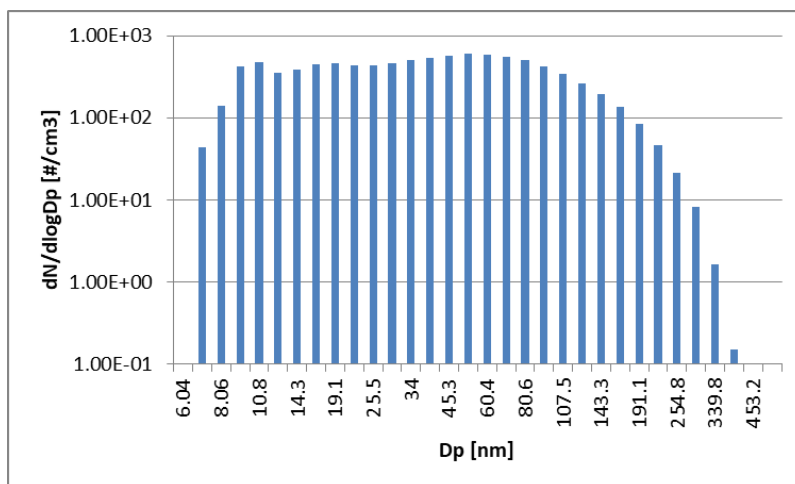
Při maximální akceleraci však automobil Škoda Fabia vytvořil více zdravotně závadných částic při koncentraci  $2,24 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ; jednalo o částice hlavně nukleačního módu okolo průměrů 25,5-34 nm (viz graf 13). Částice se též nacházely v módu akumulacním, nicméně jejich koncentrace nebyla zdaleka tak markantní jako v případě částic nukleačních.

Graf 13: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Fabia



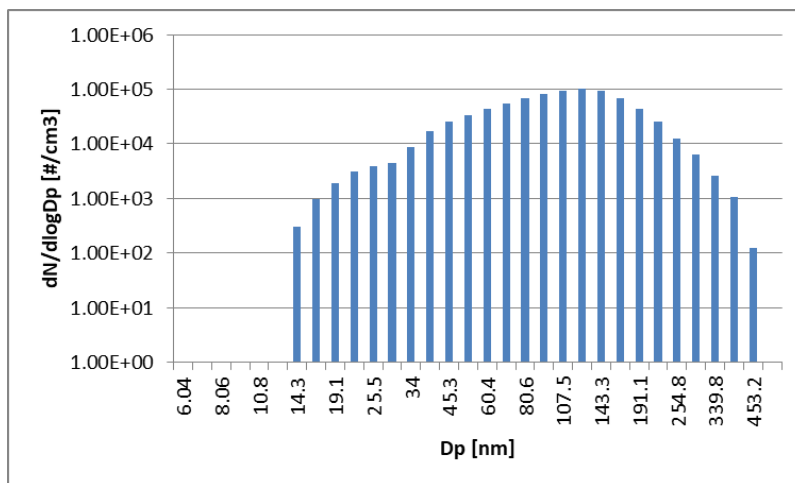
Při volnoběhu produkoval automobil Škoda Octavia částice obou módů ve velké míře, nicméně znovu převládaly částice nukleačního módu (viz. graf 14). Koncentrace dosáhla při volnoběhu maximálně hodnoty  $6,01 \times 10^2 \text{ \#/cm}^3$ , což je podobné jako u automobilu Škoda Fabia. Zvláštností v průběhu rozdělení částic při volnoběhu je koncentrace nukleačních částic okolo průměrů 9,31-10,8 nm, které z rozdělení vyčnívají.

Graf 14: Průměrné rozdělení při volnoběhu automobilu Škoda Octavia



V akcelerační části měření došlo při nejvyšší koncentraci částic  $1,05 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  znovu ke vzniku částic nukleačního i akumulčního módu, nicméně při akceleraci převažují částice akumulčního módu (viz graf 15). Jsou též značně eliminovány nukleační částice do průměru cca. 39,2 nm. Částic nukleačního módu je však u automobilu Škoda Octavia o 87% méně než u automobilu Škoda Fabia (viz. tabulka 5 na str. 50)

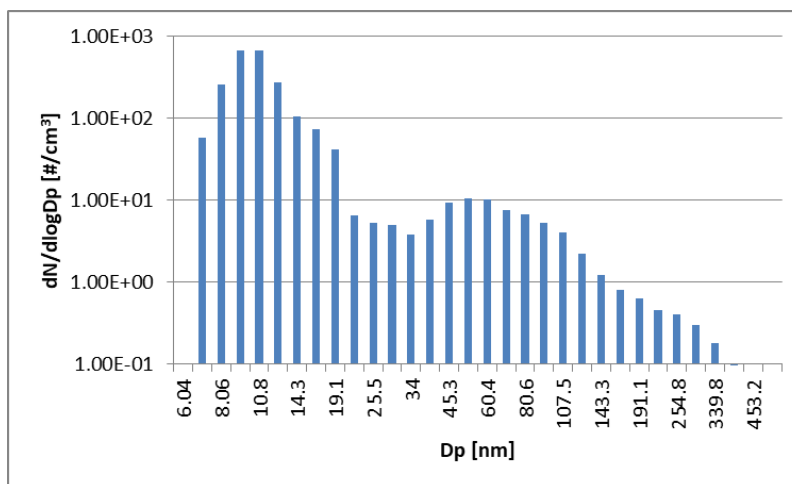
Graf 15: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Octavia





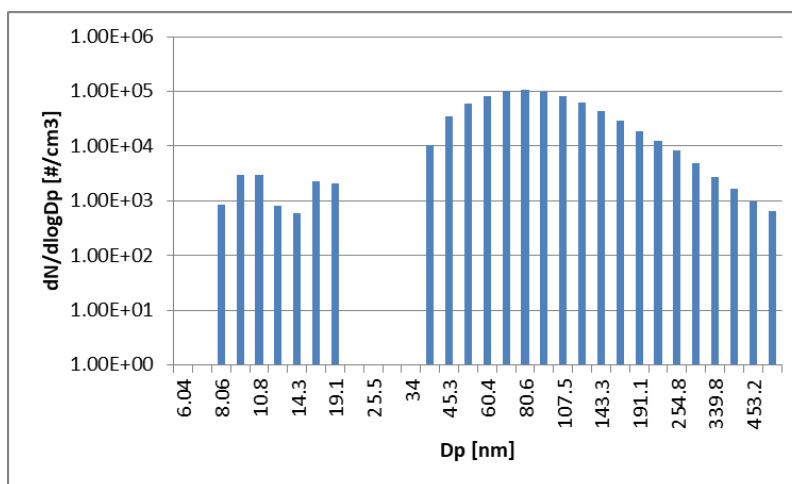
Rozdělení částic u automobilu Škoda Rapid je již od vidění velmi podobné tomu, které bylo naměřeno u automobilu Škoda Fábía. Filtr pevných částic propustil částice převážně nukleačního módu, přičemž nejvyšší koncentrace opět dosáhly částice okolo průměrů 9,31-10,8 nm při koncentraci  $6,72 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  (viz. graf 16). Dá se tedy říci, že oba automobily se chovají při volnoběhu téměř stejně.

Graf 16: Průměrné rozdělení částic při volnoběhu automobilu Škoda Rapid



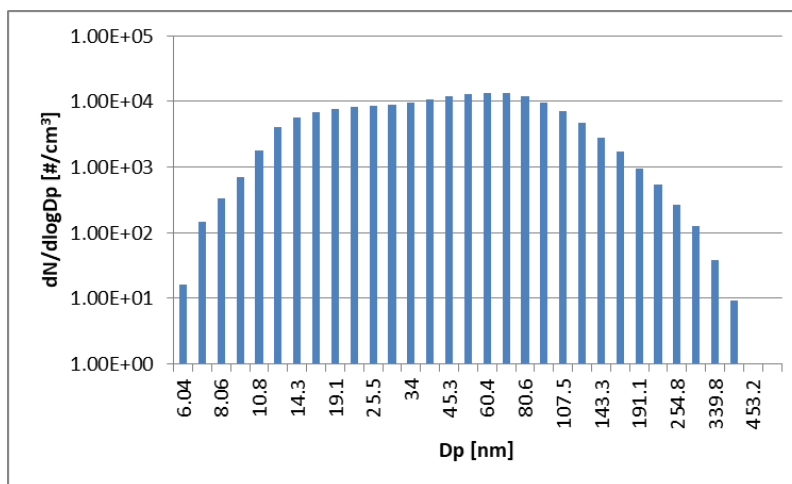
U filtru pevných částic bylo ověřeno, že zachytí velké procento částic v akumulacním módu. Nicméně na grafu 17 vidíme, že většina částic je právě v akumulacním módu. Tato skutečnost potvrzuje spíše teorii pasivní regenerace, jelikož při uvolnění usazenin z výfukového traktu by se ve velikostním spektru zajisté objevili i částice větších průměrů. Maximální koncentrace dosáhly částice v průměru cca. 80,6 nm a koncentrace se pohybovala okolo hodnoty cca.  $1 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ .

Graf 17: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Rapid



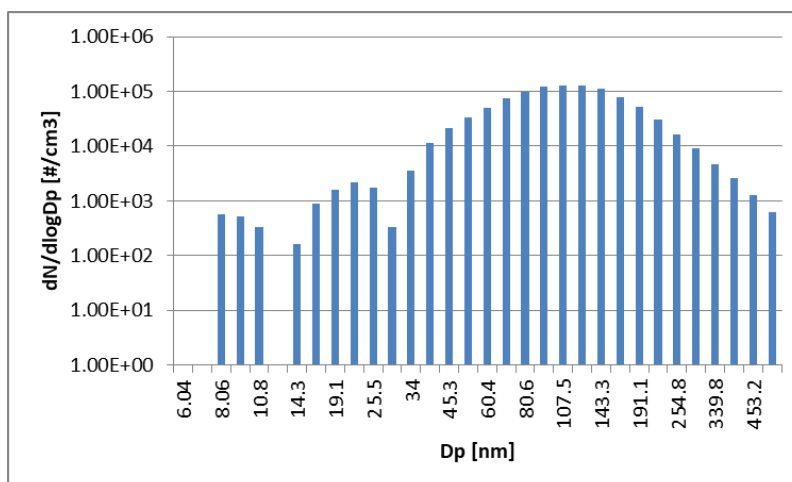
Automobil Škoda Roomster se na rozdíl od ostatních automobilů lišil hlavně v produkci částic při volnoběhu, kdy částice dosahují koncentrace až hodnoty  $1,34 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  při průměru cca. 60,4 nm (viz. graf 18). Automobil Škoda Roomster, podobně jako ostatní automobily, produkoval hlavně částice nukleačního módu. Velikostní rozdělení je velmi podobné jako u automobilu Škoda Octavia, nicméně koncentrace se řádově liší.

Graf 18: Průměrné rozdělení částic při volnoběhu automobilu Škoda Roomster



Rozdělení částic při akceleraci je opět podobné s automobilem Škoda Octavia, nicméně produkce se řádově liší (viz. graf 19). Poměr částic v nukleačním a akumulacním módu je rozdílný; většina částic se zde nachází v akumulacním módu. Při akceleračním měření mají automobily Škoda Octavia, Škoda Rapid a Škoda Roomster částice v akumulacním módu. Nejvyšší koncentrace dosáhly částice okolo průměru 107,5 nm při hodnotě koncentrace  $1,31 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ .

Graf 19: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Roomster



Pro komparaci výsledků z této kapitoly byla vytvořena tabulka, která shrnuje naměřené údaje. V tabulce 5 je možné vidět, jaké druhy částic byly vytvořeny v jakém provozním režimu a jak se jednotlivé druhy částic procentuálně podílely na výsledné produkci.

*Tabulka 5: Výsledky měření rozdělení částic*

		Volnoběh			Akcelerace		
		Částice nukleační ho módu	Částice akumulací ho módu	Ostatní částice	Částice nukleační ho módu	Částice akumulací ho módu	Ostatní částice
Škoda Fabia	Podíl na produkci [%]	98.3	1.3	0.5	63.5	35.2	1.3
	Produkce [# /cm <sup>3</sup> ]	2.15E+03			2.25E+06		
Škoda Octavia	Podíl na produkci [%]	60.2	28.2	11.6	8.2	35.2	56.6
	Produkce [# /cm <sup>3</sup> ]	9.45E+03			7.98E+05		
Škoda Rapid	Podíl na produkci [%]	97.7	1.8	0.5	7.5	58.0	34.5
	Produkce [# /cm <sup>3</sup> ]	2.21E+03			7.70E+05		
Škoda Roomster	Podíl na produkci [%]	51.8	37.1	11.1	4.5	37.9	57.6
	Produkce [# /cm <sup>3</sup> ]	1.65E+05			9.87E+05		

## 7 Závěr

Cílem práce bylo ověřit možnosti měření pevných částic, vytvořit metodický postup měření přístrojem EEPS a zhodnotit naměřené výsledky. Literární rešerše popisovala problematiku pevných částic a jejich měření, přičemž byly rozebrány aktuální trendy v měření pevných částic ať už na legislativní úrovni, tak i na čistě experimentální úrovni. V praktické části práce byla popsána metodika měření spolu s hodnotami, které se z měření automobilů značky Škoda podařilo získat a které byly interpretovány s ohledem na omezené informace o jejich příčinách. Výsledky práce poskytly informace o průběhu produkce částic v čase u jednotlivých automobilů, o jejich maximální produkci, o jejich celkové a průměrné produkci v různých jízdních režimech. Při měření se podařilo udržovat podmínky stabilní, nicméně z časových a finančních důvodů bylo měření provedeno u každého automobilu pouze jednou. Jelikož se jednalo o pouze experimentální ověření možností měření s přístrojem EEPS, nebyly výsledky statisticky zpracovány.

Z grafů průběhu produkce v čase bylo zjištěno, že při akceleracích, ač v netypických provozních podmínkách (tři po sobě jdoucí prudší akcelerace), produkuje automobil Škoda Fabia nejvyšší koncentraci pevných částic. U automobilu Škoda Octavia bylo zjištěno, že produkuje pevné částice zejména při prudkých akceleracích. V případě měření automobilu Škoda Rapid bylo zjištěno, že díky pravděpodobné pasivní regeneraci filtru pevných částic v průběhu akceleračního měření došlo k produkci částic. U automobilu Škoda Roomster bylo zjištěno, že automobil produkuje pevné částice jak při volnoběhu, tak i při akceleracích, a to v přibližně stejném měřítku.

Z hodnot maximální produkce bylo zjištěno, že automobil Škoda Fabia produkuje při opakované prudké akceleraci nejvyšší koncentrace pevných částic. Druhé nejvyšší koncentrace vyprodukovaných pevných částic dosáhl automobil Škoda Roomster, nicméně se jednalo o téměř poloviční koncentraci než v případě automobilu Škoda Fabia. Podobných výsledků maximální produkce pevných částic dosáhly automobily Škoda Octavia a Škoda Rapid.

Z výsledku celkové produkce za měřený cyklus bylo ověřeno, že absence filtru pevných částic způsobuje u Roomsteru nadměrnou produkci pevných částic. U automobilu Škoda Octavia bylo zjištěno, že celková produkce za jízdní cyklus byla zhruba poloviční oproti automobilu Škoda Roomster. Automobil Škoda Fabia vyprodukoval malé množství pevných částic a automobil Škoda Rapid vyprodukoval zanedbatelné množství částic.

Průměrná produkce částic ověřila, že u automobilu Škoda Roomsteru produkce pevných částic v jízdním cyklu zdaleka nezáleží na provozních podmínkách, jelikož hodnoty koncentrace se při volnoběhu a při zrychlení lišily jen velmi málo. Naopak u automobilu Škoda Octavia se potvrdilo, že při volnoběhu má velmi nízkou produkci pevných částic a až teprve při akceleracích má zvýšenou produkci pevných částic. U automobilů Škoda Fabia a Škoda Rapid se průměrné produkce pevných částic pohybovaly v nízkých až zanedbatelných hodnotách.

Z měření rozdělení velikosti pevných částic se zjistilo, že při volnoběhu jsou produkovány pevné částice hlavně v nukleačním módu; zejména pak u automobilů Škoda Rapid a Škoda Fabia. U měření velikostního rozdělení při nejvyšší akceleraci se zjistilo, že se spektrum nukleačního módu zmenšilo na úkor větších pevných částic akumulárního módu. Výjimku při akceleračním měření tvořil automobil Škoda Fabia, který nadále produkoval menší a zdravotně závadné pevné částice nukleačního módu.

Přestože se měřené automobily lišily v mnoha parametrech, lze z výsledků vyvodit jisté závěry. Měření koncentrace a velikostního rozdělení pevných částic u obou zážehových motorů nasvědčuje tomu, že kombinace přímého a nepřímého vstřikování by mohla pomoci ke snížení produkováných pevných částic. Automobil Škoda Fabia produkoval více nebezpečných pevných částic při volnoběhu, nicméně jich vypustil přibližně čtyřikrát méně než automobil Škoda Octavia při volnoběhu. Automobil Škoda Octavia naopak dosáhl téměř třikrát nižší produkce při prudších akceleracích. Metodu kombinace přímého a nepřímého vstřikování již v dnešní době používá u svých vozů značka Toyota, nicméně s cílem orientovaným spíše na zvýšení výkonu a točivého momentu.

Měření velikostního rozdělení pevných částic též potvrdilo předpoklad, že filtr pevných částic bude mít vliv na snížení produkce částic u zážehového motoru s přímým vstřikováním. Filtr pevných částic je schopný snížit produkci částic zejména akumulárního módu a částic větších průměru, které u automobilu Škoda Octavia při akceleračním měření tvořily až 93% všech částic.

Měření celkové produkce potvrdilo, že filtr pevných částic je skutečně nezbytnou součástí diesellových motorů. Otázkou však zůstává, kolik pevných částic a jaké velikosti vznikne při regeneraci filtru ať už při celé, nebo jízdou přerušené.

Obecně řečeno, produkce pevných částic je závislá na mnoha technických parametrech (součinitel přebytku vzduchu, časování ventilů, předstih zážehu, vstřikovací tlak, tvar

spalovacího prostoru, použité palivo, zařízení pro regulaci částic atd.), nicméně celé měření ukázalo vysokou závislost produkce pevných částic na provozních podmínkách. Evropské automobilky jsou v dnešní době značně tlačeny na hranice svých konstrukčních schopností, aby plnily stále se zpřísnující EURO limity pro emise (včetně pevných částic). Avšak méně regulace probíhá na straně řízení provozu vozidel na komunikacích. V mimoměstském provozu by se státy například mohly soustředit na výstavbu dálnic, na kterých nedochází k tak markantním akceleracím jako na silnicích ostatních tříd. V městském provozu by se mohlo jednat o optimalizaci řízení dopravy, aby nedocházelo k častému zastavování a následnému rozjezdu vozidel. Emise pevných částic by také šly omezit v mimoměstském i městském provozu plynulejším přechodem rychlostních limitů; například při přechodu z městského rychlostního limitu 50 km/h na mimoměstský rychlostní limit 90 km/h.

Na závěr je vhodné dodat, jak by mohlo být toto měření obohaceno či doplněno. Koncentrace a velikostní rozdělení pevných částic jsou velmi důležitými parametry. Rozdělení pevných částic, i přes svoji důležitost, zatím není homologovaným parametrem. Nicméně i po zjištění tohoto parametru je důležité vědět, jak jsou jednotlivé pevné částice zdravotně závadné. Přístroj EEPS umožňuje zjistit, jak velké pevné částice automobil vypustí a jaké pevné částice mají tedy potenciál ohrozit lidský organismus. Chemické složení pevných částic je druhým měřítkem pro zjištění jejich závadnosti, proto měření koncentrace a rozdělení velikosti pevných částic často bývají doplněny chemickou analýzou. V případě tohoto měření by bylo vhodné vzorek spalin podrobit i chemické kontrole (např. pomocí senzoru určujícího množství polycyklických aromatických uhlovodíků), aby se mohla blíže posoudit celková závadnost pevných částic, která jest hlavním důvodem, proč v dnešní době věda vkládá tak značné úsilí do vývoje měřících zařízení pro emise.

## Použitá literatura

- [1] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 8024734753.
- [2] NANI GUARIEIRO, Lílian Lefol a Aline Lefol NANI GUARIEIRO. *Impact of the Biofuels Burning on Particle Emissions from the Vehicular Exhaust* [online]. 30. září 2015, , 27 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.5772/60110. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/biofuels-status-and-perspective/impact-of-the-biofuels-burning-on-particle-emissions-from-the-vehicular-exhaust>
- [3] FIFTH FRAMEWORK PROGRAMME. *Characterisation of Exhaust Particulate Emissions from Road Vehicles* [online]. , 79 [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: [http://lat.eng.auth.gr/particulates/deliverables/Particulates\\_D2.pdf](http://lat.eng.auth.gr/particulates/deliverables/Particulates_D2.pdf)
- [4] Diesel Exhaust Particle Size. *DieselNet* [online]. 2002 [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: [https://www.dieselnets.com/tech/dpm\\_size.php](https://www.dieselnets.com/tech/dpm_size.php)
- [5] DRASTICHOVÁ, Vendula, Ing. *Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu bezpečnosti nanočástic* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/smokeman/katalog-obrazku/clanek-32/443-dra156-fbi-p3908-3908v009-2015.pdf>. Disertační práce. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc.
- [6] KÖHLER, Felix. *Testing of particulate emissions from positive ignition vehicles with direct fuel injection system* [online]. , 16 [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: [http://ecoscore.be/files/K%C3%B6hler2013\\_benzinesDI\\_PNroetfilter.pdf](http://ecoscore.be/files/K%C3%B6hler2013_benzinesDI_PNroetfilter.pdf)
- [7] BURTSCHER, H. *Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review* [online]. , 37 [cit. 2017-09-28]. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2004.12.001. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228829645\\_Physical\\_characterization\\_of\\_particulate\\_emissions\\_from\\_diesel\\_engines\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/228829645_Physical_characterization_of_particulate_emissions_from_diesel_engines_A_review)
- [8] MAJEWSKI, W. Addy a Hannu JÄÄSKELÄINEN. *Smoke Opacity*. *DieselNet* [online]. 2013 [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: [https://www.dieselnets.com/tech/measure\\_opacity.php](https://www.dieselnets.com/tech/measure_opacity.php)
- [9] TAKÁTS, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 8001016323.
- [10] ANALÝZA VÝFUKOVÝCH PLYNŮ. *ENERGETICKÝ ÚSTAV Odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. Brno, 2003 [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/KA04-13.htm>
- [11] Metodické postupy měření emisí silničního vozidla poháněného vznětovým motorem. *Epravo.cz* [online]. Praha, 1995 [cit. 2017-09-28]. Dostupné z: <https://www.epravo.cz/vyhledavani-aspi/?Id=43725&Section=1&IdPara=1&ParaC=2>

- [12] *Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN) č. 49*. In: . 2011. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A42012X0215%2801%29>
- [13] MĚŘENÍ IMISÍ POLÉTAVÉHO PRACHU GRAVIMETRICKOU METODOU. *Ústav ochrany životního prostředí, FT UTB* [online]. Zlín [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <http://uiozp.ft.utb.cz/studmat/201145163451/T8OOV2.pdf>
- [14] SHINOHARA, Masayoshi a Yoshinori OTSUKI. *Continuous Solid Particle Counting System, MEXA-2000SPCS series* [online]. 2011, , 8 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: [http://www.horiba.com/uploads/media/R15E\\_13\\_01.pdf](http://www.horiba.com/uploads/media/R15E_13_01.pdf)
- [15] GRIMM AEROSOL TECHNIK. *PMP - Automotive Condensation Particle Counter (CPC)* [online]. , 4 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: [http://www.exisab.com/Docs/Brochures/Grimm\\_CPC\\_5430.pdf](http://www.exisab.com/Docs/Brochures/Grimm_CPC_5430.pdf)
- [16] *Předpis č. 49 Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN)*. In: . 2010. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A42012X0215%2801%29>
- [17] *Předpis č. 49 Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN)*. In: . 2011. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A42012X0215%2801%29>
- [18] PERRET, Vincent. *Assessment of occupational exposure to diesel fumes—parameter optimization of the thermal coulometric measurement method for carbon* [online]. Švýcarsko, , 6 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850204004124>
- [19] Výkladový slovník aerosolových termínů. FRIDRICH, Miroslav. *Česká aerosolová společnost* [online]. 2007 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <http://cas.icpf.cas.cz/aerosolovnik.php>
- [20] FUNDAMENTALS OF CONDENSATION PARTICLE COUNTERS (CPC) AND SCANNING MOBILITY PARTICLE SIZER™ (SMPS™) SPECTROMETERS. *TSI Incorporated* [online]. 2014 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: [http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site\\_Root/Products/Literature/Application\\_Notes/Review\\_on\\_CPC\\_and\\_SMPS\\_CPC-003-US-web.pdf?id=32305](http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/Review_on_CPC_and_SMPS_CPC-003-US-web.pdf?id=32305)
- [21] Scanning Mobility Particle Sizer. *TSI Incorporated* [online]. 2011 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: [http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product\\_Information/Literature/Spec\\_Sheets/SMPS\\_3936-3034.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Spec_Sheets/SMPS_3936-3034.pdf)
- [22] PETROVIĆ, Velimir S. a kol.. *THE POSSIBILITIES FOR MEASUREMENT AND CHARACTERIZATION OF DIESEL ENGINE FINE PARTICLES - A REVIEW* [online]. 2011, , 22 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/274267712\\_The\\_possibilities\\_for\\_measurement\\_and\\_characterization\\_of\\_diesel\\_engine\\_fine\\_particles\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/274267712_The_possibilities_for_measurement_and_characterization_of_diesel_engine_fine_particles_A_review)
- [23] TANG, Shilda a kol.. *Monitoring of PM-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Diesel Vehicles by Photoelectric Aerosol Sensor (PAS)* [online]. New York, 2001, , 31 [cit. 2017-09-29]. DOI: 10.4271/2001-01-3578. Dostupné z: <ftp://ftp.dec.ny.gov/dar/library/papers/PAS.pdf>



- [24] ARNOTT, W. P. a kol.. *Evaluation of 1047-nm Photoacoustic Instruments and Photoelectric Aerosol Sensors in Source-Sampling of Black Carbon Aerosol and Particle-Bound PAHs from Gasoline and Diesel Powered Vehicles* [online]. 2005, , 9 [cit. 2017-09-29]. DOI: 10.1021/es049595e. Dostupné z: <http://www.patarnott.com/pdf/ArnottEST2005.pdf>
- [25] MORÁN-LÓPEZ, J.L. *Physics of Low Dimensional Systems* [online]. 2001 [cit. 2017-09-29]. ISBN 978-0-306-47111-7. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=U4jqBwAAQBAJ&pg=PA131&lpg=PA131&dq=diffusion+charging+sensor&source=bl&ots=rB-IEs8hUQ&sig=QPKNQ3gm5GFet3PamrKU24EFx0k&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwIq97iPm7fWAhURKVAKHWqlCQo4ChDoAQg2MAM#v=onepage&q&f=false>
- [26] *Elektronová mikroskopie pro biology* [online]. NEBESÁŘOVÁ, Jana. 2001 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/book/Podkap/7.1.html>
- [27] BHATTACHARJEE, A a kol.. A preliminary study on the nature of particulate matters in vehicle fuel wastes. *Environmental Monitoring and Assessment* [online]. 2011, , 10 [cit. 2017-09-29]. DOI: doi: 10.1007/s10661-010-1598-x. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20635201>
- [28] WANG, Xiaoliang. *Improvement of Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) Size Distribution Measurement - I. Algorithm and Applications to Compact Aerosols* [online]. , 15 [cit. 2017-10-03]. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2015.11.002. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/277720305\\_Improvement\\_of\\_Engine\\_Exhaust\\_Particle\\_Sizer\\_EEPS\\_Size\\_Distribution\\_Measurement\\_-\\_I\\_Algorithm\\_and\\_Applications\\_to\\_Compact\\_Aerosols](https://www.researchgate.net/publication/277720305_Improvement_of_Engine_Exhaust_Particle_Sizer_EEPS_Size_Distribution_Measurement_-_I_Algorithm_and_Applications_to_Compact_Aerosols)
- [29] DODD, A E a Z HOLUBECKI. *The measurement of diesel exhaust smoke: MIRA Research Report*. No. 1965/10. Nuneaton, Warwickshire: MIRA, 2007. ISBN 637770093.
- [30] *Raw gas sampling and conditioning for particle characterization.: Rotating disk diluter testo MD19-3E* [online]. In: . [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.co.nz/Uploads/file/Environmental-Industrial/Environmental-Monitoring-Safety/testo-ViPR.PDF>

## Seznam obrázků

- Obrázek 1: Vliv součinitele přebytku vzduchu na produkci pevných částic u dieselového spalovacího motoru
- Obrázek 2: Možné složení pevné částice dieselového motoru při rozdílných zatíženích motoru
- Obrázek 3: Rozdělení velikosti a hmotnosti pevných částic u dieselového motoru
- Obrázek 4: Výsledky měření laboratoře TÜV Nord
- Obrázek 5: Schéma opacimetru
- Obrázek 6: Schéma ředícího tunelu
- Obrázek 7: Schéma aparatury pro odběr vzorku pro hmotnostní měření pevných částic
- Obrázek 8: Konstrukce filtrů pro gravimetrické měření pevných částic
- Obrázek 9: Schéma aparatury pro odběr vzorku pro měření koncentrace pevných částic
- Obrázek 10: Schéma CPC
- Obrázek 11: Jízdní cyklus NEDC
- Obrázek 12: Jízdní cyklus WHSC
- Obrázek 13: Jízdní cyklus WHTC
- Obrázek 14: Schéma coulometrie
- Obrázek 15: Schéma SMPS
- Obrázek 16: Schéma ELPI
- Obrázek 17: Schéma PAS
- Obrázek 18: Schéma DC
- Obrázek 19: Schéma mikroskopů TEM a SEM
- Obrázek 20: Ukázka pevných částic pod mikroskopy SEM a TEM
- Obrázek 21: Schéma EEPS
- Obrázek 22: Výstupy z EEPS
- Obrázek 23: Válcová zkušebna
- Obrázek 24: Prostředí ControlWeb
- Obrázek 25: Měřené automobily
- Obrázek 26: Schéma ředícího zařízení MD19-3E
- Obrázek 27: Kalibrační křivka ředícího zařízení MD19-3E
- Obrázek 28: EEPS s ředícím zařízením
- Obrázek 29: Automobil na válcovém dynamometru

## Seznam tabulek

- Tabulka 1: Převodní tabulka opacimetru
- Tabulka 2: Veličiny počítané přístrojem EEPS
- Tabulka 3: Parametry válcové zkušebny
- Tabulka 4: Technické informace o automobilech
- Tabulka 5: Výsledky měření rozdělení částic

## Seznam grafů

- Graf 1: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Fabia v měřícím cyklu
- Graf 2: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Fabia při akceleračním měření
- Graf 3: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Octavia v měřícím cyklu
- Graf 4: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Octavia při akceleračním měření
- Graf 5: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Rapid v měřícím cyklu
- Graf 6: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Rapid při akceleračním měření
- Graf 7: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Roomster v měřícím cyklu
- Graf 8: Průběh koncentrace částic u automobilu Škoda Roomster při akceleračním měření
- Graf 9: Maximální produkce pevných částic
- Graf 10: Celková produkce pevných částic
- Graf 11: Průměrná produkce pevných částic
- Graf 12: Průměrné rozdělení částic při volnoběhu automobilu Škoda Fabia
- Graf 13: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Fabia
- Graf 14: Průměrné rozdělení částic při volnoběhu automobilu Škoda Octavia
- Graf 15: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Octavia
- Graf 16: Průměrné rozdělení částic při volnoběhu automobilu Škoda Rapid
- Graf 17: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Rapid
- Graf 18: Průměrné rozdělení částic při volnoběhu automobilu Škoda Roomster
- Graf 19: Rozdělení částic při nejvyšší naměřené koncentraci automobilu Škoda Roomster

## 8 Přílohy

### 8.1 Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Fabia

Vozidlo	Velikostní kanál	Průměrná produkce částic při volnoběhu	Maximální produkce částic při akceleraci
Škoda Fabia	6.04	0.00E+00	0.00E+00
	6.98	6.36E+01	0.00E+00
	8.06	1.88E+02	0.00E+00
	9.31	5.80E+02	0.00E+00
	10.80	6.46E+02	0.00E+00
	12.40	3.31E+02	1.32E+04
	14.30	1.46E+02	4.51E+04
	16.50	5.70E+01	8.86E+04
	19.10	3.40E+01	1.38E+05
	22.10	1.33E+01	1.92E+05
	25.50	1.03E+01	2.21E+05
	29.40	1.21E+01	2.24E+05
	34.00	1.23E+01	2.06E+05
	39.20	9.94E+00	1.68E+05
	45.30	9.68E+00	1.34E+05
	52.30	7.74E+00	1.06E+05
	60.40	6.70E+00	7.88E+04
	69.80	5.37E+00	5.25E+04
	80.60	4.18E+00	3.25E+04
	93.10	3.20E+00	1.88E+04
	107.50	3.20E+00	1.00E+04
	124.10	2.50E+00	6.23E+03
	143.30	1.69E+00	3.82E+03
	165.50	1.01E+00	2.81E+03
	191.10	5.82E-01	1.99E+03
	220.70	1.77E-01	1.36E+03
254.80	2.03E-01	8.65E+02	
294.30	1.74E-01	5.02E+02	
339.80	1.53E-01	2.64E+02	
392.40	1.77E-01	1.51E+02	
453.20	2.58E-01	7.75E+01	
523.30	2.89E-01	4.34E+01	

## 8.2 Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Octavia

Vozidlo	Velikostní kanál	Průměrná produkce částic při volnoběhu	Maximální produkce částic při akceleraci
Škoda Octavia	6.04	0.00E+00	0.00E+00
	6.98	4.33E+01	0.00E+00
	8.06	1.38E+02	0.00E+00
	9.31	4.17E+02	0.00E+00
	10.80	4.78E+02	0.00E+00
	12.40	3.55E+02	0.00E+00
	14.30	3.91E+02	3.03E+02
	16.50	4.46E+02	9.65E+02
	19.10	4.63E+02	1.88E+03
	22.10	4.35E+02	3.05E+03
	25.50	4.40E+02	3.90E+03
	29.40	4.64E+02	4.44E+03
	34.00	4.99E+02	8.77E+03
	39.20	5.43E+02	1.69E+04
	45.30	5.77E+02	2.51E+04
	52.30	6.01E+02	3.35E+04
	60.40	5.95E+02	4.31E+04
	69.80	5.57E+02	5.40E+04
	80.60	4.98E+02	6.74E+04
	93.10	4.17E+02	8.32E+04
	107.50	3.39E+02	9.52E+04
	124.10	2.65E+02	1.03E+05
	143.30	1.96E+02	9.40E+04
	165.50	1.34E+02	6.75E+04
	191.10	8.40E+01	4.45E+04
	220.70	4.61E+01	2.50E+04
	254.80	2.10E+01	1.23E+04
	294.30	8.25E+00	6.33E+03
	339.80	1.62E+00	2.59E+03
	392.40	1.49E-01	1.06E+03
453.20	0.00E+00	1.23E+02	
523.30	0.00E+00	0.00E+00	

### 8.3 Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Rapid

Vozidlo	Velikostní kanál	Průměrná produkce částic při volnoběhu	Maximální produkce částic při akceleraci
Škoda Rapid	6.04	0.00E+00	0.00E+00
	6.98	5.76E+01	0.00E+00
	8.06	2.55E+02	8.57E+02
	9.31	6.54E+02	3.04E+03
	10.80	6.70E+02	3.03E+03
	12.40	2.68E+02	8.28E+02
	14.30	1.03E+02	5.90E+02
	16.50	7.23E+01	2.32E+03
	19.10	4.06E+01	2.06E+03
	22.10	6.42E+00	0.00E+00
	25.50	5.28E+00	0.00E+00
	29.40	4.92E+00	0.00E+00
	34.00	3.81E+00	0.00E+00
	39.20	5.76E+00	1.03E+04
	45.30	9.31E+00	3.44E+04
	52.30	1.05E+01	6.08E+04
	60.40	1.02E+01	8.29E+04
	69.80	7.40E+00	1.01E+05
	80.60	6.56E+00	1.05E+05
	93.10	5.18E+00	9.70E+04
	107.50	3.96E+00	8.24E+04
	124.10	2.18E+00	6.16E+04
	143.30	1.21E+00	4.37E+04
	165.50	8.06E-01	2.86E+04
	191.10	6.36E-01	1.83E+04
	220.70	4.55E-01	1.26E+04
	254.80	3.97E-01	8.16E+03
	294.30	2.99E-01	4.84E+03
339.80	1.77E-01	2.67E+03	
392.40	4.81E-02	1.63E+03	
453.20	0.00E+00	9.57E+02	
523.30	0.00E+00	6.51E+02	

## 8.4 Rozdělení pevných částic u automobilu Škoda Roomster

Vozidlo	Velikostní kanál	Průměrná produkce částic při volnoběhu	Maximální produkce částic při akceleraci
Škoda Roomster	6.04	1.63E+01	0.00E+00
	6.98	1.44E+02	0.00E+00
	8.06	3.35E+02	5.76E+02
	9.31	7.09E+02	5.28E+02
	10.80	1.77E+03	3.27E+02
	12.40	4.03E+03	0.00E+00
	14.30	5.75E+03	1.65E+02
	16.50	6.89E+03	9.03E+02
	19.10	7.71E+03	1.57E+03
	22.10	8.20E+03	2.16E+03
	25.50	8.62E+03	1.75E+03
	29.40	8.95E+03	3.34E+02
	34.00	9.67E+03	3.54E+03
	39.20	1.08E+04	1.14E+04
	45.30	1.19E+04	2.13E+04
	52.30	1.30E+04	3.33E+04
	60.40	1.34E+04	5.07E+04
	69.80	1.32E+04	7.36E+04
	80.60	1.19E+04	9.67E+04
	93.10	9.56E+03	1.20E+05
	107.50	7.12E+03	1.31E+05
	124.10	4.64E+03	1.28E+05
	143.30	2.84E+03	1.11E+05
	165.50	1.73E+03	7.98E+04
	191.10	9.62E+02	5.32E+04
	220.70	5.48E+02	3.11E+04
	254.80	2.69E+02	1.65E+04
	294.30	1.25E+02	9.25E+03
	339.80	3.84E+01	4.63E+03
	392.40	9.36E+00	2.62E+03
453.20	0.00E+00	1.28E+03	
523.30	0.00E+00	6.23E+02	