

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Nestandardní měření prašného aerosolu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ilona GONOVÁ**  
Osobní číslo: **E09N0080P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Nestandardní měření prašného aerosolu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište aerosol (definice, velikostní třídění, druhy dle původu a výskytu).
2. Popište chování částic aerosolu při průtoku. Zaměřte se především na různé materiály částic (hustota, permitivita, aerodynamický průměr), různé rychlosti a různá zakřivení vedení.
3. Popište metody měření a analyzátor GRIMM 1.109.
4. Proveďte komparativní měření standardního a modifikovaného odběru simulujícího podmínky při měření aerosolu za pohybu odběrového zařízení.
5. Vyhodnoťte (statisticky) vlivy na naměřené hodnoty a tyto kvantifikujte. Proveďte praktické měření.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. et Bc. Václav Kubernát**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Cílem této diplomové práce je zhodnotit vliv modifikovaného odběru vzorkovaného vzduchu při nestandardním měření aerosolových částic. První část je věnovaná obecnému popisu aerosolových částic, způsobům jejich vzniku, zdravotním účinkům a imisním limitům. Druhá část této práce je zaměřena na měření prašného aerosolu. Postupně jsou popsány jednotlivé metody měření, analyzátor GRIMM 1.109, který byl použit v praktické části této práce, a samotné nestandardní měření. Ve třetí části je teoreticky popsáno chování aerosolových částic při průtoku odběrovou trasou a jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet vlivu odběrové trasy na měření. Čtvrtá část této práce se pak věnuje praktickému měření a kvantifikaci vlivu odběrové trasy a odběrové sondy.

## **Klíčová slova**

Aerosolové částice

Prašný aerosol

Prach

PM10

Měření prašnosti

GRIMM 1.109

Vliv odběrové trasy

Účinnost odběrové trasy

## **Nonstandard measurement of a dusty aerosol**

### **Abstract**

The aim of this thesis is to evaluate the effect of the modified discrete sampling air at a non-standard measurement of aerosol particles. The first part is devoted to a general description of the aerosol particles, their ways of creation, health effects and immission standard. The second part of this work is focused on the measurement of particulate matter. There are explanations of measurement methods, GRIMM 1.109 analyzer used in the practical part of this work, and very non-standard measurements. The third part theoretically describes the behavior of aerosol particles in the flow sampling line and there are given formulas for calculating the impact of sampling line on the measurement. The fourth part of this work is devoted to practical measuring and quantifying the effect of sampling line and probe.

### **Keywords**

Aerosol Particles

Particulate Matter

Dust

PM10

Dust Measurement

GRIMM 1.109

Effect of sampling line

Transport Efficiency

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr navazujícího magisterského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je součástí této práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11.5.2012

Ilona Gonová

.....

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Bc. Václavu Kubernátovi a konzultantovi Ing. Markovi Hladíkovi za cenné připomínky a metodické vedení práce a své rodině za podporu.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>1</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>3</b>
<b>1 PRAŠNÝ AEROSOL.....</b>	<b>4</b>
1.1 AEROSOLOVÉ ČÁSTICE, PARTICULATE MATTER, POLÉTAVÝ PRACH A JINÉ POJMY.....	4
1.2 VLIV PRAŠNÉHO AEROSOLU NA ZDRAVÍ ČLOVĚKA .....	5
1.3 DĚLENÍ PRAŠNÉHO AEROSOLU .....	6
1.3.1 Dělení aerosolových částic podle původu a vzniku .....	6
1.3.2 Dělení aerosolových částic podle velikosti.....	8
1.3.3 Dělení aerosolových částic podle tvaru .....	10
1.3.4 Dělení aerosolových částic podle zdravotních účinků .....	11
1.4 VLIV METEOROLOGICKÝCH PODMÍNEK NA KONCENTRACI AEROSOLU.....	12
1.5 LEGISLATIVA TÝKAJÍCÍ SE AEROSOLOVÝCH ČÁSTIC.....	12
<b>2 MĚŘENÍ PRAŠNÉHO AEROSOLU.....</b>	<b>14</b>
2.1 METODY MĚŘENÍ .....	14
2.1.1 Gravimetrie.....	14
2.1.2 Radiometrie .....	15
2.1.3 Nefelometrie.....	15
2.2 ANALYZÁTOR GRIMM 1.109.....	16
2.3 NESTANDARDNÍ MĚŘENÍ PRAŠNÉHO AEROSOLU.....	18
<b>3 CHOVÁNÍ AEROSOLU PŘI PRŮTOKU ODBĚROVOU TRASOU K ANALYZÁTORU .....</b>	<b>19</b>
3.1 CHARAKTERISTICKÉ EKVIVALENTNÍ ROZMĚRY AEROSOLOVÝCH ČÁSTIC .....	19
3.2 MĚRNÁ HMOTNOST A POVRCHOVÉ VLASTNOSTI ČÁSTIC.....	20
3.3 POHYBOVÉ VLASTNOSTI ČÁSTIC.....	21
3.3.1 Pohybová rovnice částice .....	21
3.3.2 Přímochárý rovnoměrný pohyb .....	23
3.3.3 Křivočárý pohyb částice.....	23
3.4 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI ČÁSTIC.....	24
3.4.1 Difúze částic.....	24



---

3.4.2	<i>Koagulace částic</i> .....	25
3.4.3	<i>Termoforéza</i> .....	25
3.5	VLIV TRANSPORTU ODEBÍRANÉHO VZORKU K ANALYZÁTORU.....	26
3.5.1	<i>Usazování částic v odběrové trase působením gravitace</i> .....	26
3.5.2	<i>Usazování částic v odběrové trase působením difúze</i> .....	27
3.5.3	<i>Usazování částic v odběrové trase působením setrvačné síly</i> .....	27
3.5.4	<i>Usazování částic v odběrové trase působením elektrostatické síly</i> .....	28
3.5.5	<i>Usazování částic v odběrové trase působením termoforézy</i> .....	28
<b>4</b>	<b>KOMPARATIVNÍ MĚŘENÍ STANDARDNÍHO A MODIFIKOVANÉHO ODBĚRU</b> .....	<b>29</b>
4.1	MĚŘICÍ APARATURA .....	29
4.2	POPIS MĚŘENÍ .....	32
4.3	METODIKA VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	34
4.4	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A KVANTIFIKACE VLIVU MODIFIKOVANÉHO ODBĚRU AEROSOLU .....	36
4.4.1	<i>Měření vlivu odběrové trasy</i> .....	36
4.4.2	<i>Měření vlivu odběrové sondy</i> .....	40
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>42</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>43</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>45</b>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>a</b>	Ekvivalentní velikost částice dle pádové rychlosti
<b>d</b>	Vnitřní průměr trubice
$\vec{g}$	Gravitační zrychlení
<b>hh:mm</b>	Časové označení – hodina:minuta
$l_m$	Střední volná dráha molekul plynu
<b>m</b>	Hmotnost částice
<b>p</b>	Tlak
$\vec{u}$	Rychlost částice
$u_{diff}$	Difúzní koeficient
$\vec{u}_p$	Sedimentační (pádová) rychlost
$\vec{v}$	Rychlost vzduchu
<b>x</b>	Vzdálenost vstupu sondy od vstupu do trubice
<b>B</b>	Pohyblivost
<b>C</b>	Cunninghamův korekční součinitel
$C_N$	Počtová koncentrace
<b>D</b>	Součinitel difúze
$\vec{F}_1$	Setrvačná síla
$\vec{F}_2$	Setrvačná síla přiřazené hmotnosti částice
$\vec{F}_e$	Vnější síla působící na částici
$\vec{F}_t$	Termoforetická síla
$\vec{F}_v$	Vztlaková síla
$\vec{F}_\tau$	Aerodynamický odpor
$G_m, M_\zeta$	Hmotnost částice
$\vec{j}$	Hustota toku částic
$K_N$	Konstanta koagulace
<b>L</b>	Délka trubice
<b>M</b>	Hmotnost částic v $m^3$ vzduchu
$M_p$	Přiřazená hmotnost částice
<b>N</b>	Počet částic na litr vzduchu

---

<b>Q</b>	Objemový průtok
<b>Re<sub>r</sub></b>	Reynoldsovo číslo
<b>S<sub>M</sub></b>	Hmotný měrný povrch
<b>S<sub>V</sub></b>	Objemový měrný povrch
<b>V<sub>č</sub></b>	Objem částice
<b>V<sub>m</sub></b>	Objem částic
<b>V<sub>p</sub></b>	Přiřazený objem částice
<b><math>\bar{X}_1</math></b>	Průměrná hodnota
<b>Z</b>	Gravitační usazovací parametr
<b><math>\alpha</math></b>	Úhel hlavičky sondy
<b><math>\mu</math></b>	Účinnost odběrové trasy
<b><math>\mu_{\check{c}}</math></b>	Dynamická viskozita
<b><math>\xi</math></b>	Součinitel odporu
<b><math>\rho</math></b>	Hustota vzduchu
<b><math>\rho_{\check{c}}</math></b>	Hustota částice
<b><math>\rho_m</math></b>	Měrná hmotnost
<b><math>\tau_{\check{c}}</math></b>	Doba relaxace částice
<b><math>\Phi_0</math></b>	Průměr vstupního otvoru sondy
<b>ČHMÚ</b>	Český hydrometeorologický ústav
<b>PM<sub>x</sub></b>	ParticulateMatter
<b>PTFE</b>	Polytertrafluorethylen
<b>REZZO</b>	Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší
<b>UV (záření)</b>	Ultrafialové (záření)

## Úvod

Prašný aerosol je jednou ze škodlivin v ovzduší. V České republice jde vzhledem ke kvalitě ovzduší o nejzávažnější problém s každoročním překračováním imisních limitů a tedy ohrožením zdraví obyvatel. Proto je na imisní monitoring prašného aerosolu kladen velký důraz.

Měření probíhají nejen standardně prostřednictvím sítě měřících stanic, ale i s využitím letadla nebo automobilu. Měření je díky tomu možné provádět prakticky kdekoliv a s velkým územním rozsahem v krátké časové době. Měření na mobilních prostředcích ale přináší i možná negativa. Z technických důvodů totiž nelze odebírat analyzovaný vzorek vzduchu přímo do analyzátoru, jako je tomu u stacionárního měření, ale měřený vzduch musí být odebírán v určité vzdálenosti od analyzátoru – odběr je pod křídlem letadla nebo na střeše automobilu, zatímco analyzátor je umístěn uvnitř letadla nebo automobilu. Do měření je tak vnášen vliv odběrové trasy. V praxi (při měřeních ČHMÚ analyzátozem GRIMM 1.109) se jako odběrová trasa využívá ocelová trubice o průměru 3 mm o různé délce a ohybech podle potřeby, opatřená odběrovou sondou.

Cílem této diplomové práce je tedy zhodnotit vliv modifikovaného odběru vzorkovaného vzduchu při nestandardním měření aerosolových částic. První část této práce je věnovaná definici aerosolových částic, jejich obecnému popisu a vlastnostem, způsobům jejich vzniku, zdravotním účinkům a imisním limitům. Druhá část je zaměřena na měření prašného aerosolu. Postupně jsou popsány jednotlivé metody měření, analyzátor GRIMM 1.109, který byl použit v praktické části této práce, a samotné nestandardní měření. Ve třetí části je teoreticky popsáno chování aerosolových částic při průtoku odběrovou trasou a jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet vlivu odběrové trasy na měření. Čtvrtá část této práce se pak věnuje praktickému měření a kvantifikaci vlivu odběrové trasy a odběrové sondy.

# 1 Prašný aerosol

## 1.1 Aerosolové částice, ParticulateMatter, polétavý prach a jiné pojmy

Výkladový slovník aerosolových termínů definuje **aerosol** jako „směs kapalných a tuhých částic suspendovaných v plynném prostředí tak dlouho, aby bylo možné jejich pozorování a měření. Velikost aerosolových částic se obecně pohybuje v rozmezí 0,001 až 100  $\mu\text{m}$ “<sup>[2]</sup>

Jedná se z hlediska složení o velmi různorodé látky. Proto se k popisu aerosolových částic používá **aerodynamický (ekvivalentní) průměr**. Tedy průměr koule s hustotou 1000  $\text{kg}/\text{m}^3$  se stejnou rychlostí usazování, jakou má příslušná částice.<sup>[2]</sup>

Pojem **aerosolové částice** je využíván podle normy ČSN EN 12341 jako překlad pojmu **ParticulateMatter (PM<sub>x</sub>)** pro hodnocení kvality ovzduší (ať už vnějšího, vnitřního nebo přímo pracovního). Pomocí PM<sub>x</sub> (jinak také **hmotnostní koncentrace**<sup>[2]</sup>) se aerosolové částice dělí dle aerodynamického průměru, kdy X je označením horní meze velikosti částic v  $\mu\text{m}$  (nejčastěji PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>, PM<sub>0,1</sub>).

PM<sub>10</sub> je označení thorakálních částic.<sup>[13]</sup> **Thorakální částice** jsou ty částice, které vdechováním pronikají za hrtan.<sup>[14]</sup> Částice o větším aerodynamickém průměru nebývají sledovány, protože se v dýchacím ústrojí člověka nezachycují.

Je namístě poznamenat, že v českém překladu pojmu ParticulateMatter dochází k jisté nejednoznačnosti. Zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší tyto částice označuje jako **tuhé znečišťující látky**, norma ČSN EN 13241 je označuje jako prach. Přičemž v obou případech jde o sledování částic v odpadních plynech. Proto zde z principu nemá smysl částice rozdělovat na thorakální frakci.<sup>[10]</sup>

V minulosti byly tyto aerosolové částice označovány také jako **polétavý prach** (např. v hygienických předpisech)<sup>[10]</sup> – tento pojem se stále používá například v médiích.

Pro jednotlivé druhy aerosolu se používají i jiné pojmy:

**Mlha** je pojmenování kapalného aerosolu, který vznikl kondenzací přesycených vodních par.

**Opar** je v principu totéž co mlha, ale ovlivňuje viditelnost v atmosféře.

**Dým** je označení aerosolu složeného z pevných částic o aerodynamickém průměru menším než 0,05  $\mu\text{m}$ .

**Kouř** se skládá z pevných nebo kapalných částic, které vznikly kondenzací plynných produktů nedokonalého spalování a kondenzací přesycených par.

**Prach** jako pojmenování pro hrubé pevné částice větší než 0,5  $\mu\text{m}$ , které vznikly mechanickým rozrušováním (např. erozí).

**Sprej (tříšť)** vzniká z kapaliny.

**Smog** je aerosol tvořený pevnými a kapalnými částicemi, který vzniká především fotochemickými reakcemi UV záření, uhlovodíků a oxidů síry.

**Oblak** je pojmenování aerosolu s viditelným rozhraním a s hustotou alespoň o 1% větší než je hustota okolního vzduchu.

**Popílek** je označení pro částice popela, které jsou unášeny kouřovými plyny.

**Saze** je pojmenování aglomerátu (shluku) částic, které vznikly nedokonalým spálením uhlíkatého materiálu.

[2, 23]

## 1.2 Vliv prašného aerosolu na zdraví člověka

Vliv částic na lidské zdraví závisí na jejich velikosti a složení. Podle schopnosti částic vstupovat do dýchacích cest a usazovat se zde rozeznáváme tři velikostní frakce – částice vdechovatelné, thorakální a respirabilní.

### Vdechovatelné částice

Jde o částice s průměrem 10 až 100  $\mu\text{m}$ . Pro člověka jsou neškodné, protože se zachytávají nejdále v nosohltanu a dál do dýchacího traktu se nedostanou. Pohybem řasinkového epitelu v nosní dutině jsou spolu s hlenem transportovány do nosohltanu a pak spolknuty nebo vykašlány či vykýchány. [5, 7,

9, 23, 25]

### **Thorakální částice**

Tedy částice s průměrem 4 až 10  $\mu\text{m}$ . Dostávají se až do průdušek, kde dochází k jejich usazování a tím ke zdravotním problémům. Krátkodobé působení zvyšuje celkovou nemocnost a úmrtnost, převážně onemocnění kardiovaskulárního a dýchacího systému. Dlouhodobě zvýšené koncentrace snižují funkci plic, zvyšují nemocnost dýchacího systému, zkracují délku života. Tyto účinky jsou uváděny i při průměrné roční koncentraci menší než  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Rizikem jsou i adsorbované látky s karcinogenními a mutagenními účinky. <sup>[12, 13, 17, 23]</sup>

### **Respirabilní částice**

Respirabilní částice jsou ty s aerodynamickým průměrem menším než 4  $\mu\text{m}$ . Mohou vstupovat až do plicních sklípků a jsou tím tedy nejnebezpečnější. V poslední době se tedy pozornost začíná věnovat frakci  $\text{PM}_{2,5}$  příp.  $\text{PM}_1$ , protože svým pronikáním hlouběji do plicního systému způsobují nejzávažnější zdravotní problémy. Při dlouhodobém působení průměrných ročních koncentrací nad  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se začíná snižovat délka dožití. <sup>[5, 7, 9, 23, 25]</sup>

## **1.3 Dělení prašného aerosolu**

Prašný aerosol je soubor velice různorodých částic. Pro zjednodušení jejich popisu je možné tyto částice dělit podle jejich původu a vzniku, podle jejich velikosti, tvaru nebo zdravotních účinků.

### **1.3.1 Dělení aerosolových částic podle původu a vzniku**

Částice lze dělit podle původu na primární nebo sekundární a dále na antropogenní nebo přirozeného původu.

#### **Primární částice**

Primární částice se do ovzduší dostávají jako emise ze zdrojů znečišťujících ovzduší nebo re-emisí již usazených částic. Jak bylo řečeno výše, může jít o znečištění antropogenní nebo přirozeného

původu.

### **Antropogenní částice**

Mezi antropogenní zdroje emisí řadíme zdroje bodové (komíny a výduchy), liniové (silnice) i plošné (průmyslové a zemědělské plochy, sídelní aglomerace). Podle Registru emisí a zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO) jsou zdroje látek znečišťujících ovzduší rozděleny na stacionární a mobilní.

- REZZO 1 – velké stacionární zdroje znečišťování. Jde o bodové zdroje – stacionární zařízení ke spalování paliv s tepelným výkonem nad 5 MW a zařízení zvláště závažných technologických procesů.
- REZZO 2 – střední stacionární zdroje znečišťování. Jde o bodové zdroje – stacionární zařízení ke spalování paliv s tepelným výkonem 0,2 až 5 MW, zařízení závažných technologických procesů a plošné zdroje typu uhelné lomy a plochy s rizikem úletu znečišťujících látek, hoření nebo zapaření.
- REZZO 3 – malé stacionární zdroje znečišťování. Jde o bodové zdroje - stacionární zařízení ke spalování paliv s tepelným výkonem 0,2 MW, zařízení technologických procesů, která neodpovídají kategorii REZZO 1 a REZZO 2, a plošné zdroje typu skládky paliv, surovin, odpadů a jiné.
- REZZO 4 – mobilní zdroje znečišťování.

[20]

Nejčastěji tedy antropogenní částice vznikají spalovacími procesy v elektrárnách a motorech automobilů nebo průmyslovou činností při velmi vysokých teplotách (svařování, tavení kovů a rud). Mezi lidskou činností vzniklé částice se řadí i ty, které vznikají odnosem větru kvůli odstranění vegetačního pokryvu nebo ze stavebních a těžebních ploch, zemědělsky upravovaných ploch, nezpevněných cest apod. <sup>[10, 16, 20, 23]</sup>

### **Částice přirozeného původu**

Částice přirozeného původu vznikají sopečnou činností, lesními požáry, ale jde i o prach unášený větrem nebo drobné kapky mořské vody nebo bioaerosol – tedy částice biologického původu (živé nebo mrtvé buňky, houby, viry, bakterie, zbytky organismů a jejich produkty jako pyl a spory). <sup>[2, 23]</sup>



## Sekundární částice

Sekundární částice vznikají přímo v ovzduší. Jde především o sírany, dusičnany a sekundární organický aerosol. Oxidací oxidu siřičitého vzniká oxid sírový, z něj kondenzací kyselina sírová a z té neutralizací plynným amoniakem krystalizační jádra síranu amonného. Podobně vznikají i dusičnanové částice z oxidu dusičitého. Sekundární organický aerosol obsahuje oxidované organické sloučeniny, které vznikají reakcemi s těkavými organickými sloučeninami. [9, 16, 20]

### 1.3.2 Dělení aerosolových částic podle velikosti

Nejjednodušší dělení aerosolových částic je na hrubé, jemné a ultrajemné.

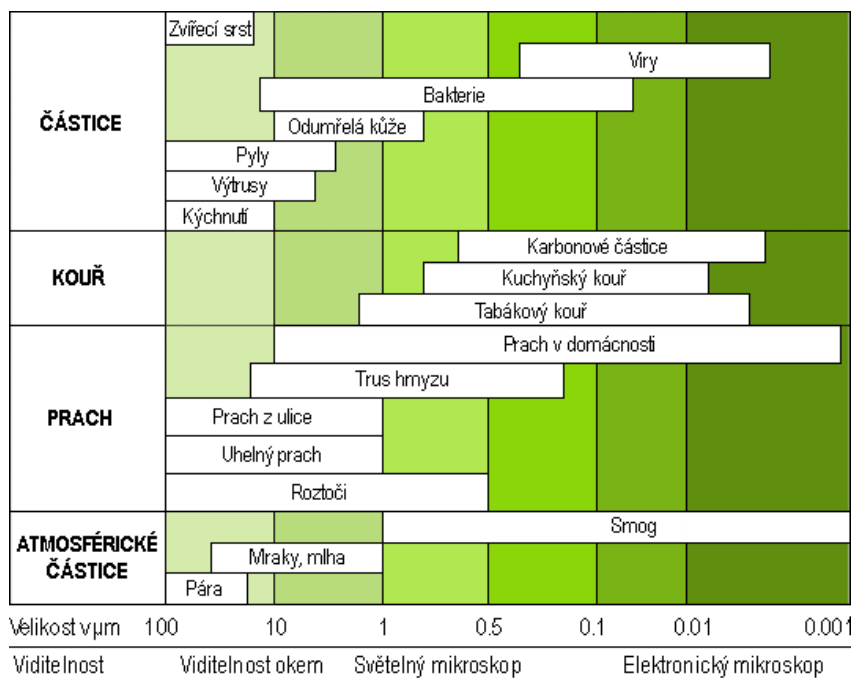
#### Hrubá frakce

Hrubé částice jsou částice o aerodynamickém průměru 2,5 až 10  $\mu\text{m}$ , klesají na zemský povrch v řádu hodin, maximálně dnů, přenášeny jsou proto jen na krátké vzdálenosti od zdroje. Tyto částice jsou většinou tvořeny prvky zemské půdy – křemíkem, vápníkem, hliníkem, železem a hořčíkem a částicemi organického původu – bioaerosol. Ve starší literatuře jsou jako hrubá frakce označovány částice větší než 10  $\mu\text{m}$ . [8, 23, 25]

#### Jemná a ultrajemná frakce

Částice o aerodynamickém průměru 0,1 až 2,5  $\mu\text{m}$  jsou označovány jako jemné částice, ultrajemné částice mají velikost menší než 0,1  $\mu\text{m}$ . V atmosféře zůstávají i týdny, takže mohou být přenášeny na vzdálenost až tisíců km od zdroje a jsou tvořeny převážně uhlíkem, sírany, amoniakem, sekundárními organickými sloučeninami a některými kovy. [8, 23, 25]

Další způsob dělení zohledňuje schopnosti částic vstupovat do dýchacích cest a usazovat se zde. Částice se pak dělí na **vdechovatelné**, **thorakální** a **respirabilní** (viz. 1.2 Vliv prašného aerosolu na zdraví člověka).

Obr. 1.1: Velikost aerosolových částic <sup>[18]</sup>

### Velikostní distribuce prašného aerosolu<sup>1</sup>

Velikostní distribuce prašného aerosolu je obvykle trimodální. Nukleační a akumulační módy jsou v oblasti jemných částic, jeden mód se nachází v oblasti hrubých částic.

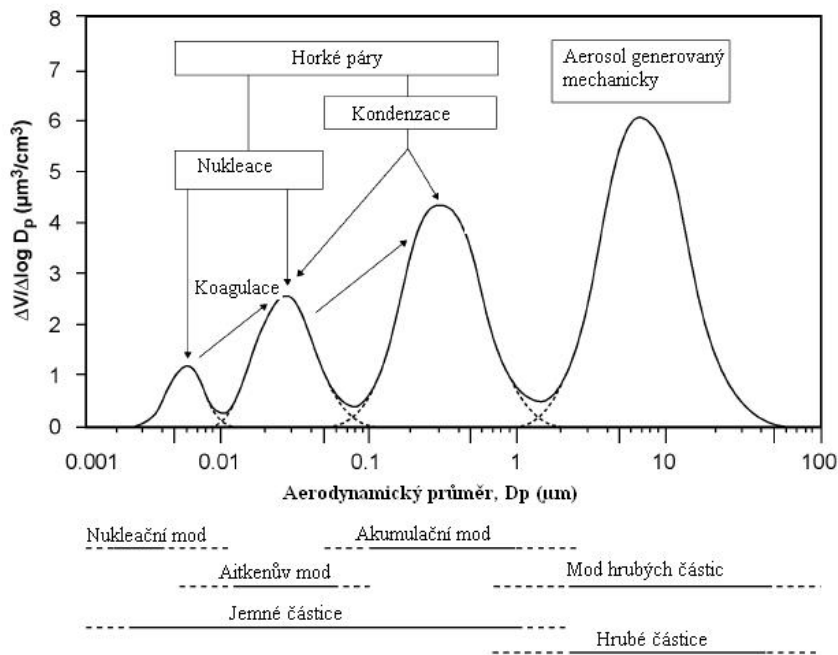
- Mód hrubých částic  
Nejvíce částic má velikost 5 až 30 μm. Jde zejména o částice vzniklé mechanickými procesy (prach unášený z větrné eroze, emise vzniklé spalováním nebo dopravní či stavební činností).
- Akumulační mód  
Nejvíce částic má velikost 0,15 až 0,5 μm. Tyto částice vznikají hlavně kondenzací a koagulací. Částice akumulačního módu jsou z atmosféry odstraňovány méně než částice nukleačního a hrubého módu a tím dochází k jejich akumulaci v atmosféře.
- Nukleační mód  
Nejvíce částic má velikost 0,015 až 0,04 μm. Tyto částice vznikají převážně kondenzací a koagulací ale i v důsledku vysokoteplotních procesů (jako je spalování a tavení kovů a rud).

<sup>1</sup>Podle Whitbyho a Sverdrupa (1980) <sup>[1, 8, 25]</sup>

- Aitkenův mód

Byl nalezen dalšími výzkumy. Nejvíce částic má velikost 0,01 až 0,1  $\mu\text{m}$ , jde tedy opět o jemné částice. Objevuje se v důsledku růstu malých částic a zejména v dopravou zatížených oblastech.

[1, 8, 25]



Obr. 1.2: Velikostní distribuce aerosolových částic <sup>[25]</sup>

### 1.3.3 Dělení aerosolových částic podle tvaru

Částice izometrické (izodimenzionální, korpuskulární) mají všechny tři rozměry vzájemně srovnatelné. U neizometrických částic (anizodimenzionálních) převládají dva rozměry nad třetím (laminární, ploché částice) nebo jeden rozměr nad dvěma (fibrilární, vláknité částice). U neizometrických částic je v plynném prostředí jejich chování při pohybu obtížně definovatelné. <sup>[4, 12]</sup>

Tvar aerosolových částic závisí především na jejich vzniku. Jednoduché a pravidelné tvary vznikají při kondenzaci (tedy u spalovacích procesů) nebo krystalizaci. Složitější tvary vznikají mechanickým působením (drcením, mletím) nebo koagulací (shlukováním). <sup>[4]</sup>

### 1.3.4 Dělení aerosolových částic podle zdravotních účinků

Prach se může do lidského organismu dostávat třemi cestami – pokožkou, trávicími orgány a dýchacími orgány. V pracovním prostředí se prach dělí podle působení na člověka na:

- **Prach s fibrogenním účinkem**

Jde o prašné částice, jejichž dlouhodobým vdechováním vzniká zaprášení plic, tedy onemocnění, kdy v plicích dochází ke zvýšenému bujení vaziva (tvorbě fibróz). Mezi fibrogenní látky patří oxid křemičitý (způsobující silikózu<sup>2</sup>), azbest (způsobující azbestózu), hliník (způsobující aluminózu) a skelná vata.

- **Prach s dráždivým účinkem**

Může mechanicky dráždit sliznice dýchacích cest, pokožku a oční spojivky, nebo vyvolávat alergické reakce. Především částice organického původu jsou schopny vyvolávat přecitlivělost, která vede k průduškovému astmatu.

- **Infekční prach**

Jde o aerosol obsahující choroboplodné zárodky jako bakterie, viry nebo plísně.

- **Prach s toxickým účinkem** – včetně karcinogenního a mutagenního

Působení těchto částic závisí na jejich chemickém složení. **Olovo** vyvolává změny v krvi, žilách a nervové soustavě. V orgánech se usazuje v nerozpustné formě, po přeměně na rozpustnou se stává pro organismus jedovatým. **Sloučeniny arzenu** jsou toxické pro trávicí ústrojí, pokožku, kapiláry a nervovou soustavu. **Rtuť** působí na zažívací ústrojí, uzliny, oči, krevní systém a nervovou soustavu. **Mangan** poškozuje mozek, nervovou soustavu, plíce a slezinu. **Soli fluóru** způsobují otravu nervového systému, svalstva, trávicích orgánů, při dlouhodobém působení jsou toxické pro zuby, šlachy a kosti. **Sodný louh** leptá pokožku a sliznice, po vniknutí do oka působí oslepnutí. Podobně silně toxické jsou i další prvky a jejich sloučeniny: **chróm, nikl, uran, beryllium, zirkonium, kobalt, molybden, vanad, selen, oxidy železa, oxidy kadmia, oxid zinečnatý.**

[5, 12]

---

<sup>2</sup>Krystaly oxidu křemičitého po vniknutí do plicních sklípků reagují s plicním tkanivem a postupně tak v plicích vznikají ložiska zápalu, který se sice po čase zahojí, ale na jejich místě se vytvoří drobné jizvy, kvůli nimž se tato plicní tkáň stává nefunkční. Plíce proto začnou vytvářet nové tkanivo, které postupně vytváří nádorovitou hmotu a vzniká tak rozedma plic a stále větší obtíže při dýchání. Postupně se přidávají onemocnění srdce, cév, tuberkulóza nebo rakovina plic. <sup>[12]</sup>

## 1.4 Vliv meteorologických podmínek na koncentraci aerosolu

Kromě rozložení zdrojů tuhých znečišťujících látek výrazně koncentraci aerosolových částic v ovzduší ovlivňují i meteorologické podmínky, především teplota, rychlost a směr větru, relativní vlhkost a přítomnost srážek.

### Vliv teploty vzduchu

Vliv teploty je primární nebo sekundární. Primární vliv je zřejmý hlavně v teplejším období, protože s rostoucí teplotou se tvoří i více sekundárních aerosolů. Oproti tomu sekundární (antropogenní) vliv působí zejména v chladnějším období, v topné sezóně a období teplotních inverzí. S poklesem teploty pak dochází i ke zvýšenému procentuálnímu zastoupení frakcí  $PM_{2,5}$  a  $PM_1$ .<sup>[9]</sup>

### Vliv rychlosti a směru větru

Směr a rychlost větru určuje, kam se budou částice šířit, případně zda se budou kumulovat v místě vzniku.

### Vliv relativní vlhkosti vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu ovlivňuje jak koncentraci částic, tak jejich velikostní distribuci. Čím je relativní vlhkost vyšší, tím je vyšší i podíl jemných částic.<sup>[9]</sup>

### Vliv srážek

Aerosol se z ovzduší dostává suchou nebo mokrou atmosférickou depozicí. Atmosférické srážky tedy koncentraci aerosolu v ovzduší snižují.<sup>[23]</sup>

## 1.5 Legislativa týkající se aerosolových částic

Kvalitou ovzduší se v legislativě České republiky zabývá zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů. Jednotlivé imisní limity pro látky znečišťující ovzduší jsou stanoveny v nařízeních vlády č. 597/2006 Sb., o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší, a č. 42/2011 Sb.

Nařízení vlády č. 597/2006 Sb., o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší, stanovuje imisní limity  $PM_{10}$  na  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  při ročním průměrování a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  s dobou průměrování 24hodin a přípustnou četností překročení 35 dní v roce a pro  $PM_{2,5}$  na  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  při ročním průměrování. Nařízení vlády č. 42/2011 Sb. požadavky na limity  $PM_{2,5}$  zmírňuje a stanovuje, že ročního limitu  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  má být dosaženo do konce roku 2014, do té doby je tento imisní limit pouze cílovým limitem.

Nařízení vlády č. 597/2006 Sb. dále stanovuje cílový imisní limit v městských pozadřových lokalitách pro  $PM_{2,5}$  na  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pro průměrování za roky 2013, 2014 a 2015 a pokles klouzavé roční koncentrace  $PM_{2,5}$  v městských pozadřových lokalitách k roku 2021 (tedy za roky 2018, 2019 a 2020) vůči roku 2010 (resp. klouzavé roční koncentraci z let 2009, 2010 a 2011) v závislosti na výchozí koncentraci.

## 2 Měření prašného aerosolu

### 2.1 Metody měření

Měření prašného aerosolu je možné provádět manuálně – gravimetrickou metodou nebo automatizovaně – nefelometrickou a radiometrickou metodou.

#### 2.1.1 Gravimetrie

Gravimetrická metoda není schopna poskytovat on-line data, většinou se využívá spojitého 24 hodinového odběru.

Principem této metody je vážení prachu zachyceného na filtru. V praxi se tedy porovnává váha čistého filtru a filtru se zachyceným prachem. Poměr prachové navážky s množstvím prosátého vzduchu pak udává koncentraci prachových částic v ovzduší [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]. K měření jednotlivých frakcí se využívají odběrová zařízení vybavená speciálními separačními hlavicemi. Odebraný vzorek může být dále využíván např. k rozboru na přítomnost těžkých kovů. <sup>[3, 22]</sup>

Vážení filtrů se vzorkem částic, který byl odebrán při využití separační hlavy pro danou frakci a při stanoveném průtoku, je podle nařízení vlády 597/2006 Sb. referenční metodou. K měření je možné použít i jinou metodu (radiometrickou, nefelometrickou), ale musí být prokazatelná její těsná statistická vazba k referenční metodě (zde gravimetrické) – toto musí být prokázáno a doloženo testem ekvivalence k referenční metodě. Všechny ostatní metody pro měření hmotnosti a koncentrace prachových částic je tedy nutné navázat právě na gravimetrickou metodu. Na rozdíl od jiných měřených znečišťujících látek se měření  $\text{PM}_{10}$  a  $\text{PM}_{2,5}$  vztahují k vnějším podmínkám, především teplotě a atmosférickému tlaku v době měření (nepřepočítávají se na standardní podmínky). <sup>[17]</sup>

### Referenční metoda odběru vzorků a stacionární měření PM<sub>10</sub>

Tato metoda je definována v normě EN 12341:1999 „Kvalita ovzduší – Stanovení frakce PM<sub>10</sub> v suspendovaných částicích – Referenční metoda a polní zkouška k prokázání ekvivalence metod měření“.

### Referenční metoda odběru vzorků a stacionární měření PM<sub>2,5</sub>

Tato metoda je definována v normě EN 14907:2005 „Normalizovaná metoda gravimetrického měření ke stanovení hmotnostní frakce suspendovaných částic PM<sub>2,5</sub> ve vnějším ovzduší“.

## 2.1.2 Radiometrie

Analyzátoary pracující na radiometrickém principu jsou schopné poskytovat data v reálném čase.

Radiometrie také využívá prosávání vzduchu přes filtr, resp. pásku. Na rozdíl od gravimetrie se ale exponovaný filtr neváží, ale sonduje se paprskem  $\beta$  záření. Detektor umístěný za filtrem pak měří úroveň zeslabení tohoto paprsku při průchodu filtrem. K eliminaci vlivu okolních podmínek (kolísání teploty a tlaku) se využívá dvoupaprskový kompenzační postup. Pro výpočet koncentrace se opět využívá průtok vzduchu změřený sondou. <sup>[3, 22]</sup>

## 2.1.3 Nefelometrie

Analyzátoary pracující na nefelometrickém principu jsou schopné poskytovat data v reálném čase.

Ortogonální nefelometrie využívá prosvěcování proudu vzduchu laserovým paprskem pod 90° úhlem. Pokud tento paprsek narazí na prolétávající částici, pak je odražen pod úhlem, který odpovídá velikosti dané částice, a je zaznamenán opticko-elektrickým detektorem. <sup>[22]</sup>



## 2.2 Analyzátor GRIMM 1.109

K měření vlivu modifikovaného odběru byly použity 2 analyzátoři GRIMM 1:109. Tento analyzátor je určený k měření počtu částic prашného aerosolu v ovzduší, pro měření využívá nefelometrickou metodu. Dokáže měřit 31 různých velikostních frakcí zároveň, kontinuálně a v reálném čase. Měří částice o aerodynamickém průměru 0,25 / 0,28 / 0,3 / 0,35 / 0,4 / 0,45 / 0,5 / 0,58 / 0,65 / 0,7 / 0,8 / 1,0 / 1,3 / 1,6 / 2,0 / 2,5 / 3,0 / 3,5 / 4,0 / 5,0 / 6,5 / 7,5 / 8,5 / 10,0 / 12,5 / 15,0 / 17,5 / 20,0 / 25,0 / 30,0 / 32,0  $\mu\text{m}$ .



Obr. 2.1: Přístroje GRIMM 1.109 použité při měření vlivu odběrové trasy a sondy

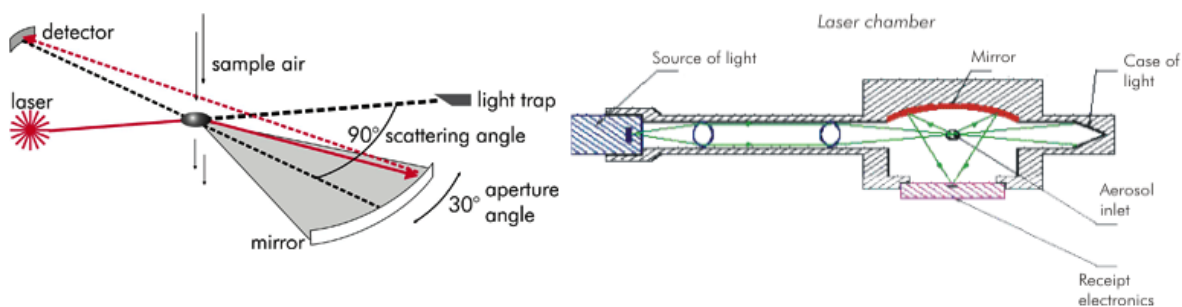
Analyzátor umí generovat výsledky měření ve 2 základních modech – počet částic dané frakce na litr vzduchu nebo celkovou hmotnost částic dané frakce na  $\text{m}^3$  vzduchu. Přístroj automaticky kontroluje a reguluje průtok vzorkovaného vzduchu na objem 1,2 litru za minutu. Vzorkovaný vzduch při výstupu z analyzátoru prochází skrz 47 mm PTFE filtr, takže je možné jej následně analyzovat i gravimetrickou metodou nebo využít chemický rozbor zachycených částic. Analyzátor může být napájen přímo z elektrické sítě nebo baterií. Data jsou ukládána na paměťovou kartu. Interní paměť analyzátoru je 80 kb. [6, 21, 24]

Na začátku každého měření provádí analyzátor tzv. self-test o délce přibližně 30 s, pak až začíná samotné měření. Vzorkovací interval je 6 s, naměřená data jsou vždy po 1 min ukládána na vyjímatelnou paměťovou kartu. Zároveň jsou tato data dostupná i přes integrovaný RS-232 sériový port pro uložení nebo další zpracování v počítači nebo k vytisknutí. Data z měření jsou

ukládána buď v rychlém (tedy každých 6 s) nebo normálním módu (tedy každou 1 min). Výstupem z měření pak v softwaru GRIMM může být počet částic / litr vzduchu nebo  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vzduchu v jednotlivých 31 frakcích nebo rovnou jako  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  nebo  $\text{PM}_1$ . Chyba přístroje GRIMM 1.109 je  $\pm 3\%$  z maximálního rozsahu, rozměry jsou 24 x 12 x 6 cm, váha 2,5 kg. <sup>[21, 24]</sup>

## Princip

Analyzátor GRIMM využívá metodu ortogonální nefelometrie, tedy měření rozptylu světla v  $90^\circ$  úhlu. Velmi úzkým proudem analyzovaného vzduchu prochází paprsek polovodičové laserové diody s vlnovou délkou 685 nm a maximálním výkonem 60 mW. Světlo rozptýlené částicemi je pak měřeno fotocitlivou diodou v pravém úhlu k původnímu směru laserového paprsku. <sup>[6]</sup>

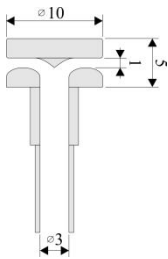


Obr. 2.2: Princip ortogonálního nefelometrického měření aerosolových částic <sup>[24]</sup>

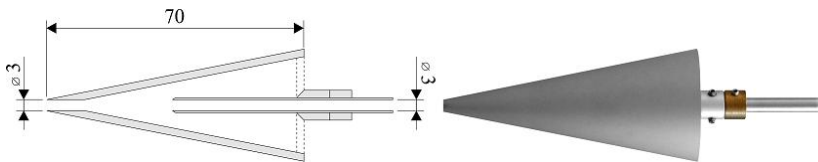
Čerpadlo kromě přísunu vzorkovaného vzduchu zajišťuje i přísun čistého ochranného vzduchu, který je přefiltrován a vháněn skrz vzduchový regulátor zpět do optické komory k zajištění, že nedojde ke kontaktu prachových částic s měřicí optikou přístroje. Tento čistý vzduch je také využíván jako referenční vzorek pro testování nulových hodnot při autokalibraci. <sup>[21]</sup>

## 2.3 Nestandardní měření prašného aerosolu

Při měření prašného aerosolu analyzátozem GRIMM 1.109 vstupuje odebíraný vzorek vzduchu s aerosolovými částicemi do analyzátoru skrz odběrovou trasu, kterou za standardních podmínek tvoří sonda zobrazená na obr. (2.3). V případě měření prašného aerosolu s využitím letadla nebo automobilu ale dochází k nestandardnímu odběru, neboť z technických důvodů je odebrání měřeného vzduchu v jiném místě (na křídle, na střeše) než kde je umístěn analyzátor (uvnitř letadla nebo automobilu). Odběrová trasa je pak tvořena ocelovou trubicí o poloměru 3 mm a o různé délce a zakřivení, doplněnou rychlostní sondou (Obr. 2.4). Částice se zde pak usazují a dochází ke snížení účinnosti transportu částic k analyzátoru. <sup>[1]</sup>



Obr. 2.3: Standardní sonda k analyzátoru GRIMM 1.109<sup>[ČHMÚ]</sup>



Obr. 2.4: Odběrová (kvazikinetická) sonda k analyzátoru GRIMM 1.109<sup>[ČHMÚ]</sup>

### 3 Chování aerosolu při průtokodběrovou trasou k analyzátoru

#### 3.1 Charakteristické ekvivalentní rozměry aerosolových částic

Pro neizometrické nekulové částice existuje celá řada metod ke stanovení jejich velikosti. Daná metoda se pak volí podle toho, aby v konkrétním procesu co nejlépe vystihovala vlastnosti částice.

K popisu velikosti částice je možné využívat:

Feretův (vzdálenost rovnoběžných tečen k obrysu částice) nebo Martinův průměr (délka tětiny dělicí průmět částice na dvě poloviny)

Ekvivalentní velikost částice dle průmětu **aA**

Ekvivalentní velikost částice dle povrchu **aS**

Ekvivalentní velikost částice dle objemu **aV**

Ekvivalentní velikost částice dle objemu a povrchu **aVS**

Ekvivalentní velikost částice dle pádové rychlosti **a**

Ekvivalentní velikost částice dle Stokesova zákona **aStk**

[1, 4]

Jak bylo uvedeno výše, pro měření a určování velikosti prašných aerosolů se využívá aerodynamická velikost částic, tedy **ekvivalentní velikost částice podle pádové rychlosti**, příp. **podle Stokesova zákona**.<sup>[4]</sup>

Aerodynamická velikost částice **a** je pak taková velikost kulové částice o hustotě  $1\,000\text{ kg/m}^3$ , která v daném prostředí sedimentuje při stejné pádové rychlosti jako skutečná částice. Pro menší částice, u kterých lze aerodynamický odpor vyjádřit pomocí Stokesova zákona, se podle tohoto zákona určuje i velikost těchto částic a platí, že **aStk < a**.<sup>[4]</sup>

## 3.2 Měrná hmotnost a povrchové vlastnosti částic

Měrná hmotnost  $\rho_m$  ovlivňuje odlučitelnost prachu, objem a pórovitost prachové vrstvy. Jde o poměr mezi hmotností částic  $G_m$  a jejich objemem  $V_m$ :

$$\rho_m = \frac{G_m}{V_m} \quad (3.1)$$

[12]

Povrchovými vlastnostmi částic se rozumí: měrný povrch, adheze a lepivost, abraze, smáčivost, výbušnost, sypký úhel, úhel skluzu, úhel vnitřního tření a sypná hmotnost<sup>[4]</sup>. Z hlediska chování částic při měření popisovaném v této práci jsou podstatné následující vlastnosti:

### Měrný povrch částic

Měrný povrch částic určuje většinu povrchových vlastností aerosolových částic. Vyjadřuje se jako hmotný měrný povrch  $S_M$  [ $m^2/kg$ ] nebo objemový měrný povrch  $S_V$  [ $m^2/m^3$ ].<sup>[4]</sup>

### Adheze částic a lepivost

Lepivost není jednoznačně fyzikálně definovaná. Zahrnuje jevy způsobující ulpívání částic na stěnách i soudržnost shluků částic. Lepivost je způsobena adhezními silami (molekulárními – Van der Waalsovými, kapilárními, elektrostatickými). Adhezní síly působí na částice, které jsou velmi blízko u sebe, pak ale může velikost těchto sil dosahovat až pevnosti materiálu. Dle pevnosti na odtrhnutí prachové vrstvy rozlišujeme:

nelepkavé prachy – suť, suchá hlína

málo lepkavé prachy – koks, úletový popílek s obsahem nespáleného uhlí, prach z vysokých pecí, hrubý uhelný prach

středně lepkavé prachy – úletový popílek bez nespáleného uhlí, kovové prachy, oxidy olova, cínu, zinku, a jiné prachy, jejichž částice nejsou větší než 25  $\mu m$

velmi lepkavé prachy – sádra, cement, mouka, azbestová, bavlněná, vlněná a kakaová vlákna a jiné prachy, jejichž částice nejsou větší než 10  $\mu m$

[1, 4, 12]

### 3.3 Pohybové vlastnosti částic

#### 3.3.1 Pohybová rovnice částice

Řešením pohybové rovnice částice je v obecném případě, tedy křivočarém pohybu, trajektorie částice. Zjednodušené řešení pohybové rovnice částice předpokládá ustálený pohyb částice a zjednodušené proudové obrazy, tzv. kvazistacionární pohyb částice. Pro kulovou částici o průměru  $a$  má **obecná pohybová rovnice** částice tvar:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_\tau + \vec{F}_v + \vec{F}_e \quad (3.2)$$

[4]

Pro **setrvačnou sílu**  $\vec{F}_1$  působící na částici o hmotnosti  $M_\zeta$  a hustotě  $\rho_\zeta$  se směrem vektoru ve směru vektoru zrychlení částice  $\frac{d\vec{u}}{dt}$  pak platí:

$$\vec{F}_1 = M_\zeta \frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{\pi a^3}{6} \rho_\zeta \frac{d\vec{u}}{dt} \quad (3.3)$$

[4]

Ve vazkém prostředí se společně s částicí pohybuje i objem plynu - přiřazený objem částice  $V_p$ . Pro přiřazenou hmotnost částice  $M_p$ , objem částice  $V_\zeta$  a hustotu vzduchu  $\rho$  platí:

$$M_p = V_p \rho = \frac{V_\zeta}{2} \rho = \frac{\pi a^3}{12} \rho \quad (3.4)$$

Pro **setrvačnou sílu přiřazené hmotnosti částice**  $\vec{F}_2$ , rychlost přiřazeného plynu a rychlost částice  $\vec{u}$  a rychlost okolního plynu  $\vec{v}$  pak platí:

$$\vec{F}_2 = M_p \frac{d(\vec{u}-\vec{v})}{dt} = \frac{\pi a^3}{12} \rho \left( \frac{d\vec{u}}{dt} - \frac{d\vec{v}}{dt} \right) \quad (3.5)$$

[4]

**Aerodynamický odpor** kulové částice je síla, kterou působí plyn na částici. Pro aerodynamický odpor kulové částice  $\vec{F}_\tau$  a součinitel odporu  $\xi$  platí:

$$\vec{F}_\tau = \xi \frac{\pi a^2}{4} \frac{|\vec{v}-\vec{u}|(\vec{v}-\vec{u})}{2} \rho \quad (3.6)$$

[4]

Pro  $Re_r < 0,2$ , tedy v oblasti platnosti Stokesova zákona, platí po dosazení Stokesova zákona za součinitel odporu částice vztah pro aerodynamický odpor:

$$\vec{F}_\tau = \frac{24}{Re_r} \frac{\pi a^2}{4} \frac{|\vec{v}-\vec{u}|(\vec{v}-\vec{u})}{2} \rho = 3\pi\mu a |\vec{v}-\vec{u}|^3 \quad (3.7)$$

V případě kapalných částic dochází při obtékání plynu k cirkulaci kapaliny uvnitř částice, kterou způsobuje tečné napětí na povrchu částice. Tím se aerodynamický odpor snižuje a se zahrnutím dynamické viskozity kapaliny částice  $\mu_\zeta$  lze psát vztah:

$$\vec{F}_\tau = \pi\mu a |\vec{v}-\vec{u}| \frac{2\mu+3\mu_\zeta}{\mu+\mu_\zeta} \quad (3.9)$$

Pro částice s velikostí  $a$  srovnatelnou se střední volnou dráhou molekul plynu  $l_m$  už není splněna podmínka ulpívání tekutiny na povrchu částice a dochází k obtékání částice se skluzem, takže aerodynamický odpor je menší a je třeba uvažovat korekci na skluz plynu pomocí Cunninghamova korekčního součinitele  $C$ :

$$\vec{F}_\tau = 3\pi\mu a |\vec{v}-\vec{u}| \frac{1}{C} \quad (3.10)$$

Korekční součinitel  $C$  lze přibližně vypočítat zjednodušeným vztahem:

$$C \doteq 1 + 2,7 \frac{l_m}{a} \quad (3.11)$$

Vliv skluzu je významný u částic o velikosti  $a < 1\mu\text{m}$ . Pro tyto částice zároveň platí i Stokesův zákon.

[4, 12]

**Vztlaková síla**  $\vec{F}_v$  působí na částici v prostředí, kde se s polohou částice mění i tlak  $p$ , který na ni působí, a platí pro ni:

$$\vec{F}_v = -V_\zeta \vec{\nabla} p \quad (3.12)$$

[4]

$\vec{F}_e$  je **vnější síla** působící na částici. Díky výše popsaným vztahům dostáváme po dosazení do vztahu (3.2) **obecnou pohybovou rovnici** ve tvaru:

$$\frac{\pi a^3}{6} \rho_\zeta \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{\pi a^3}{12} \rho \left( \frac{d\vec{u}}{dt} - \frac{d\vec{v}}{dt} \right) = \zeta \frac{\pi a^2}{4} \frac{|\vec{v}-\vec{u}|(\vec{v}-\vec{u})}{2} \rho - V_\zeta \vec{\nabla} p + \vec{F}_e \quad (3.13)$$

[4]

<sup>3</sup> $Re_r$  je **Reynoldsovo číslo** a popisuje relativní obtékání částice tekutinou. Pro Reynoldsovo číslo  $Re_r$  a dynamickou viskozitu  $\mu$  platí:

$$Re_r = \frac{|\vec{v}-\vec{u}| a \rho}{\mu} \quad (3.8)$$

[4]

### 3.3.2 Přímočarý rovnoměrný pohyb

Nejjednodušším pohybem částice je sedimentace, tedy přímočarý rovnoměrný pohyb kulové částice v homogenním silovém (gravitačním) poli. Řešení pohybové rovnice se pak provádí pouze ve směru působení gravitačního zrychlení  $\vec{g}$ . Pro ustálený stav pak lze podle vztahu (3.2) psát:

$$0 = \vec{F}_\tau + \vec{F}_v + \vec{F}_g \quad (3.14)$$

Pro aerodynamický odpor a sedimentační (pádovou) rychlost  $\vec{u}_p$  zde platí:

$$\vec{F}_\tau = -\xi \frac{\pi a^2 |\vec{u}_p| \vec{u}_p}{2} \rho \quad (3.15)$$

Pro vztlakovou sílu lze psát Archimédův vztah:

$$\vec{F}_v = -V_\xi \rho \vec{g} \quad (3.16)$$

A pro gravitační sílu platí:

$$\vec{F}_g = V_\xi \rho \vec{g} \quad (3.17)$$

Po dosazení pak ze vztahu (3.14) pro pádovou rychlost plyne:

$$u_p = \sqrt{\frac{4a(\rho_\xi - \rho)g}{3\xi\rho}} \quad (3.18)$$

A pro oblast Stokesova zákona platí vztah (3.18) ve tvaru:

$$u_p = \frac{a^2(\rho_\xi - \rho)g}{18\mu} \quad (3.19)$$

[1, 4]

### 3.3.3 Křivočarý pohyb částice

Křivočarý pohyb částice popisuje obecný pohyb částice. Obecné řešení je proto složité a vyžaduje současné řešení pohybové rovnice (3.13), rovnice pro popis rychlostního pole, rovnice pro popis vnější síly, rovnice kontinuity a tlaku.

Pokud pohyblivost  $B$ , tedy poměr konečné rychlosti částice v klidném prostředí k vnější síle  $\vec{F}_e$ , která tento pohyb vyvolala, lze popsat vztahem (3.20) a pro dobu relaxace částice  $\tau_\xi$  platí vztah (3.21):

$$B = \frac{1}{3\pi\mu a} \quad (3.20)$$

$$\tau_\xi = \frac{a^2\rho_\xi}{18\mu} \quad (3.21)$$

pak při zanedbání setrvačnosti přiřazené hmoty, korekce podle Stokesova zákona, vztlakové i vnější síly dostáváme vztah:

$$\tau_\xi \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{v} - \vec{u} \quad (3.22)$$



Pro numerické řešení nahradíme diferenciály  $d\vec{u}$  a  $dt$  diferencemi  $\Delta\vec{u}$  a  $\Delta t$ . Pro krátký časový interval  $\Delta t$ , kdy lze  $(\vec{v} - \vec{u})$  považovat za konstantní, pak platí:

$$\Delta\vec{u} = (\vec{v} - \vec{u}) \frac{\Delta t}{\tau_c} \quad (3.23)$$

Pokud označíme počáteční hodnoty indexem  $i$  a konečné indexem  $j$ , tak dostáváme soubor rovnic popisujících pohyb částice:

$$\Delta\vec{u}_{ij} = (\vec{v} - \vec{u})_i \frac{\Delta t}{\tau_c} \quad (3.24)$$

$$\vec{u}_j = \vec{u}_i + \Delta\vec{u}_{ij} \quad (3.25)$$

$$\Delta\vec{s}_{ij} = \left( \vec{u}_i + \frac{1}{2} \Delta\vec{u}_{ij} \right) \Delta t \quad (3.26)$$

$$\vec{s}_j = \vec{s}_i + \Delta\vec{s}_{ij} \quad (3.27)$$

Pro další časové intervaly  $\Delta t$  tak postupně získáváme trajektorii částice.

[4]

### 3.4 Přenosové vlastnosti částic

Mezi přenosové vlastnosti částic řadíme difúzi částic, koagulaci částic a termoforézu.

#### 3.4.1 Difúze částic

Molekulární (Brownovská, tepelná) difúze je pohyb částic vyvolaný nárazy molekul plynu, které se pohybují náhodným tepelným (Brownovým) pohybem. Turbulentní difúze je pohyb částic způsobený turbulentními fluktuacemi tekutiny. Pohyb částic je náhodný, proto v případě difúze částic nesledujeme pohyb individuální částice ale hmotnostní tok částic. [4, 12]

Pro konvektivní přenos ( $\vec{v}C$ ), kdy jsou částice unášeny proudem plynu, difúzní přenos ( $-D\nabla C$ ), kdy se částice pohybují ve směru klesající koncentrace, a součinitel difúze  $D$  pak hustota toku částic  $\vec{j}$  popisuje přenos částic v plynu vztahem:

$$\vec{j} = \vec{v}C - D\nabla C \quad (3.28)$$

[4]

Přenos částic difúzí je podstatný zejména u částic s velikostí  $a < 1\mu\text{m}$ , v této oblasti je naopak zanedbatelná sedimentace částic, v klidném prostředí pak takto malé částice zůstávají ve stavu vznosu.<sup>[4]</sup>

### 3.4.2 Koagulace částic

Při vzájemném styku částic s určitými povrchovými vlastnostmi dochází ke shlukování těchto částic neboli koagulaci. U tepelné (Brownovské) koagulace je příčinou Brownův pohyb, u turbulentní koagulace pohyb částic v turbulentním proudu, u akustické jde o pohyb částic v akustickém poli a u kinematické (v případě polydisperzních souborů částic) jsou příčinou rozdílné relativní rychlosti různě velikých částic vůči prostředí. Koagulace je vyšší u koloidních disperzních soustav, v turbulentním prostředí, v gravitačním nebo odstředivém silovém poli, v akustickém poli a při zvýšené koncentraci prachu. Snadno koagulují saze a oxidy kovů (zinku, mědi, olova, železa). Pro časový průběh počtové koncentrace  $C_N(t)$  a konstantu koagulace  $K_N$  platí vztah:

$$C_N = \frac{C_{N,0}}{1 + K_N C_{N,0} t} \quad (3.29)$$

[1, 4, 12]

### 3.4.3 Termoforéza

K termoforéze dochází v prostředí s vysokým teplotním gradientem. Sdílená hybnost molekul plynu při nárazu na povrch částice je v takovémto prostředí vyšší na straně s vyšší teplotou než na straně s teplotou nižší. Tento jev se projevuje například usazováním částic na vnitřních stěnách potrubí při proudění horkých plynů nebo zašpiněním stěn nad otopnými tělesy.

Pro částice o velikosti  $a > 1\mu\text{m}$  platí vztah pro termoforetickou sílu  $\vec{F}_t$ :

$$\vec{F}_t \sim a \vec{\nabla} T \quad (3.30)$$

Pro částice o velikosti  $a < 1\mu\text{m}$  pak platí vztah pro termoforetickou sílu  $\vec{F}_t$ :

$$\vec{F}_t \sim a^2 \vec{\nabla} T \quad (3.31)$$

[1, 4]

### 3.5 Vliv transportu odebíraného vzorku k analyzátoru

Na odběrové trase odebíraného vzduchu k analyzátoru dochází k usazování aerosolových částic působením hned několika vlivů: gravitace, difúze, turbulentní prostředí, setrvačná síla v ohybech a zúžení trasy, elektrostatické síly a termoforéza. Celková účinnost odběrové trasy vzorku je pak součtem účinností jednotlivých vlivů. V dalších částech této práce bude předpokládáno pouze laminární proudění vzduchu. <sup>[1]</sup>

#### 3.5.1 Usazování částic v odběrové trase působením gravitace

Působením gravitační síly dochází k usazování aerosolových částic na spodní stěně všech nevertikálních částí odběrové trasy. Pro laminární proudění vzduchu v přímé horizontální trubici s kruhovým průřezem, gravitační usazovací parametr  $Z$ , délku trubice  $L$  a vnitřní průměr trubice  $d$  pak platí účinnost  $\mu_{tr,grav}$  podle vztahů:

$$\mu_{tr,grav} = 1 - \frac{2}{\pi} \left( 2\varepsilon \sqrt{1 - \varepsilon^{2/3}} - \varepsilon^{1/3} \sqrt{1 - \varepsilon^{2/3}} + \sin^{-1}(\varepsilon^{1/3}) \right) \quad (3.32)$$

$$\varepsilon = \frac{3}{4} Z = \frac{3}{4} \frac{L}{d} \frac{u_p}{v} \quad (3.33)$$

Pro laminární proudění vzduchu v přímé trubici s kruhovým průřezem a sklonem vůči horizontále  $\theta^\circ$ , délku trubice  $L$  a vnitřní průměr trubice  $d$  pak platí účinnost  $\mu_{tr,grav}$  podle vztahů:

$$\mu_{tr,grav} = 1 - \frac{2}{\pi} \left( 2\kappa \sqrt{1 - \kappa^{2/3}} - \kappa^{1/3} \sqrt{1 - \kappa^{2/3}} + \sin^{-1}(\kappa^{1/3}) \right) \quad (3.34)$$

$$\kappa = \varepsilon \cos \theta = \frac{3}{4} \frac{L}{d} \frac{u_p}{v} \cos \theta \quad (3.35)$$

pro:

$$\frac{u_p \sin \theta}{v} \ll 1 \quad (3.36)$$

Bylo odvozeno, že usazování částic působením gravitační síly při laminárním proudění a sklonu trubice je rozdílné pro proudění vzduchu ve směru vzhůru nebo dolů v trubici. Pokud je dodržena podmínka podle vzorce (3.36), pak je tento rozdíl zanedbatelný a lze použít vztah (3.34).

[1]

### 3.5.2 Usazování částic v odběrové trase působením difúze

Ztrátu částic na odběrové trase vlivem difúze, při objemovém průtoku  $Q$  a difúzním koeficientu  $\mu_{diff}$ , lze obecně vyjádřit vztahem:

$$\mu_{tr,diff} = \exp\left(-\frac{\pi d L \mu_{diff}}{Q}\right)^4 \quad (3.37)$$

[1]

### 3.5.3 Usazování částic v odběrové trase působením setrvačné síly

Pro ohyby na odběrové trase o úhlu  $\varphi$  [rad] a Stokesův zákon  $Stk$  lze vycházet ze vztahu:

$$\mu_{oh,setr} = 1 - Stk \varphi \quad (3.38)$$

$$Stk = \frac{\tau_{\xi} v}{d} \quad (3.39)$$

Zúžením na odběrové trase by mělo být pokud možno zabráněno. Určení jeho vlivu je totiž velice obtížné. Pro zúžení z průměru  $d_i$  na  $d_o$ , kde  $d_i > d_o$ , lze použít pro minimální účinnost transportu vztah:

$$\mu_{zú,setr,min} = 1 - \left[1 - \left(\frac{d_o}{d_i}\right)^2\right]^2 \quad (3.40)$$

[1]

---

<sup>4</sup>Příklad: Pro průtok  $Q = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , průměr trubice  $d = 0,00181 \text{ m}$ , délku trubice  $L = 0,05 \text{ m}$ , tlak  $p = 1\,013 \text{ hPa}$  a teplotu  $t = 20^\circ \text{ C}$  vychází účinnost odběru vlivem difúze  $\mu_{tr,diff} = 1,0$  pro částice o velikosti  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\mu_{tr,diff} = 0,96$  pro částice o velikosti  $0,01 \text{ }\mu\text{m}$  a  $\mu_{tr,diff} = 0,45$  pro částice o velikosti  $0,001 \text{ }\mu\text{m}$ .<sup>[1]</sup>

### **3.5.4 Usazování částic v odběrové trase působením elektrostatické síly**

I v případě, že je odebíraný vzorek vzduchu elektricky neutrální, mohou mít jednotlivé částice elektrický náboj a ten pak způsobuje jejich usazování na odběrové trase. Protože ale lze jejich náboj jen obtížně určit, je i určení účinnosti vlivem tohoto náboje velice obtížné. Obecně lze říci, že tento vliv je zanedbatelný, pokud jsou částice nenabitě nebo pokud v odběrové trase neexistuje elektrické pole. Naopak pro nabitě částice v nevodivé trase je působení elektrostatické síly větší než v případě ostatních vlivů zde zmiňovaných. Vlivu elektrostatické síly se tedy lze poměrně snadno vyhnout použitím trubic vyrobených z kovu nebo jiných vodivých materiálů.<sup>[1]</sup>

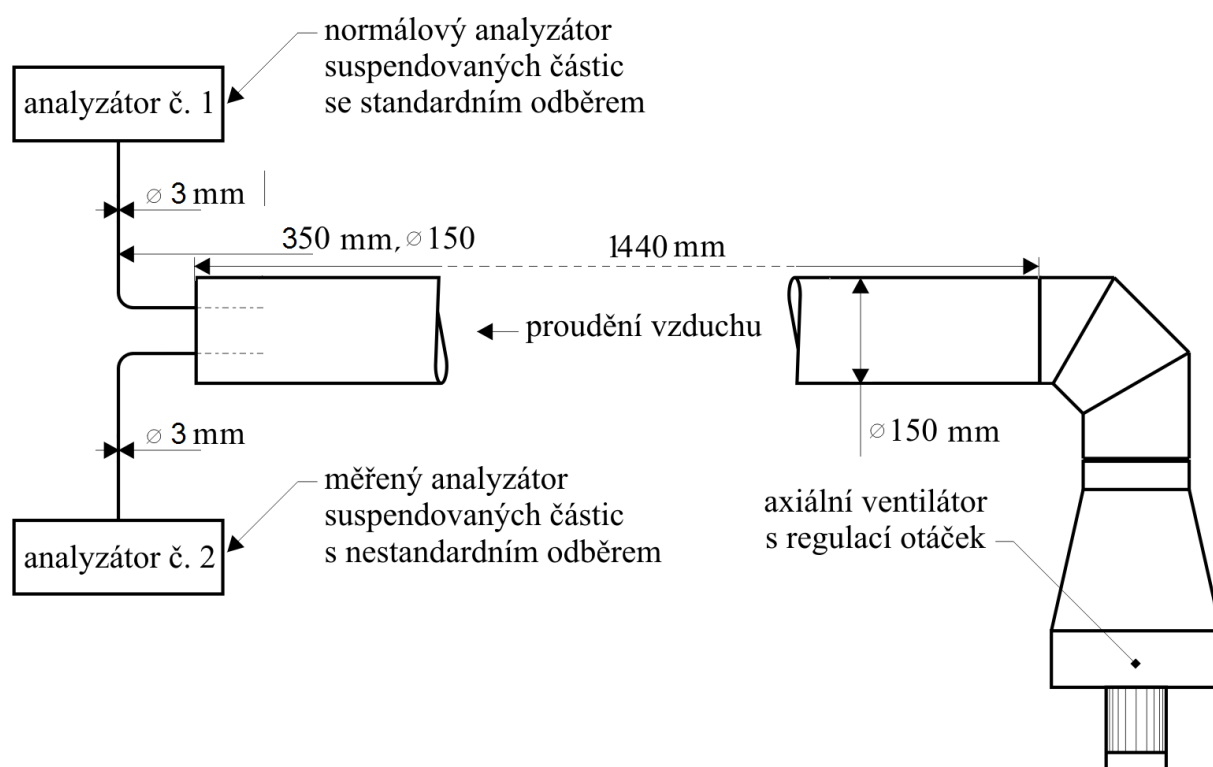
### **3.5.5 Usazování částic v odběrové trase působením termoforézy**

I pro termoforézu lze její vliv jen obtížně kvantifikovat. V případě laminárního proudění není zatím k dispozici žádný vztah, který by její vliv na účinnost odběru měřeného vzorku popisoval.<sup>[1]</sup>

## 4 Komparativní měření standardního a modifikovaného odběru

### 4.1 Měřicí aparatura

Komparativní měření standardního a modifikovaného odběru probíhalo v prostorách ČHMÚ v Plzni během února až dubna 2012. Měřicí aparatura je znázorněna na následujícím schématu (Obr. 4.1). K měření byly použity 2 přístroje GRIMM 1.109. Přístroj č. 1 byl použit jako normál a během celého měření byl zapojen s odběrovou trasou ve tvaru pravoúhlého kolena o délce 35 cm a průměru ohybu 15 cm. Přístroj č. 2 byl zapojován s různými odběrovými trasami podle daného měření. Odběrové trasy byly tvořeny ocelovými trubicemi (vnitřní průměr 3 mm), které ČHMÚ v praxi používá. Axiální ventilátor umožňoval plynulou regulaci rychlosti proudění vzduchu až do 4,5 m/s.



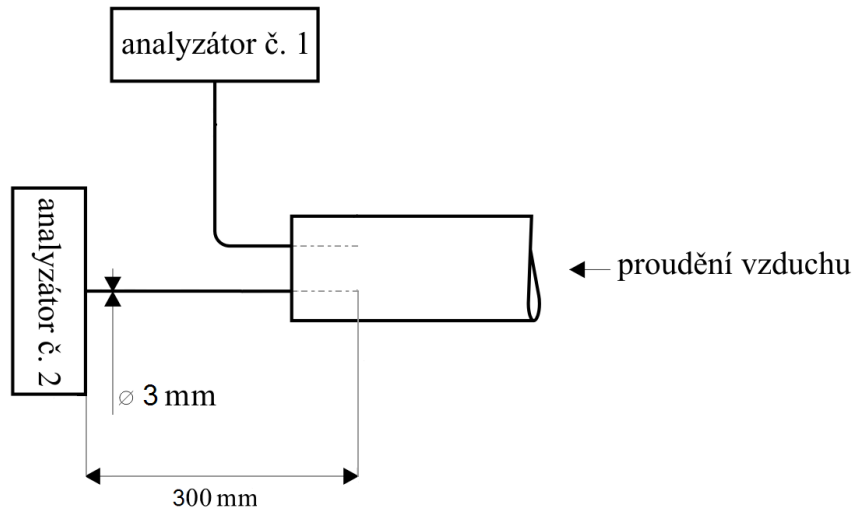
Obr. 4.1: Schéma zapojení měřicí aparatury

### Kalibrace přístrojů

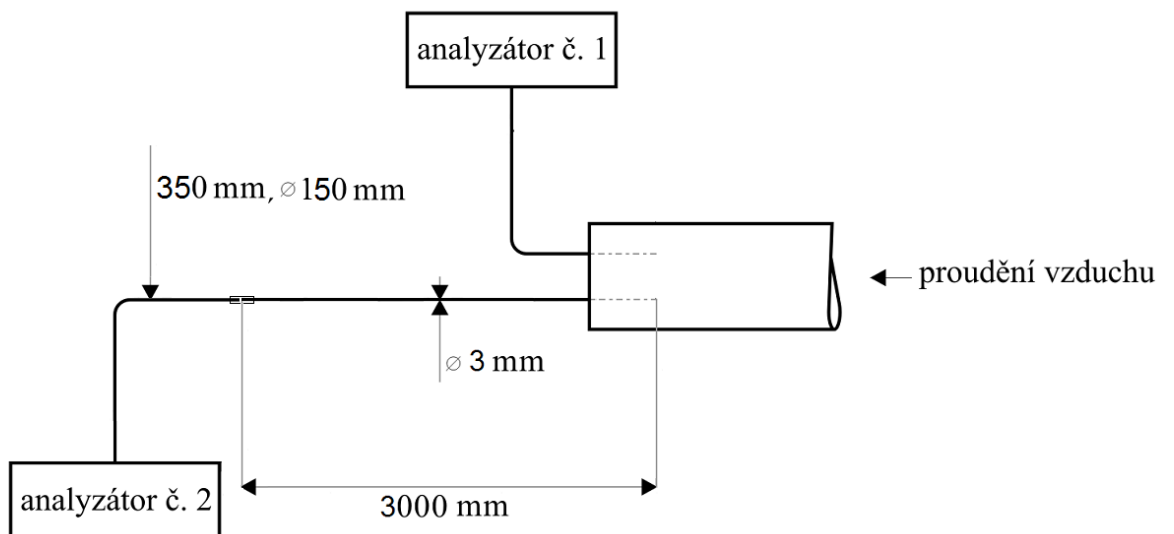
Pro vzájemné srovnávání měřených hodnot oběma přístroji byla nejprve změřena a vyhodnocena data s odběrovou trasou 2. přístroje shodnou se odběrovou trasou normálu (Obr. 4.1).

**Měření vlivu odběrové trasy**

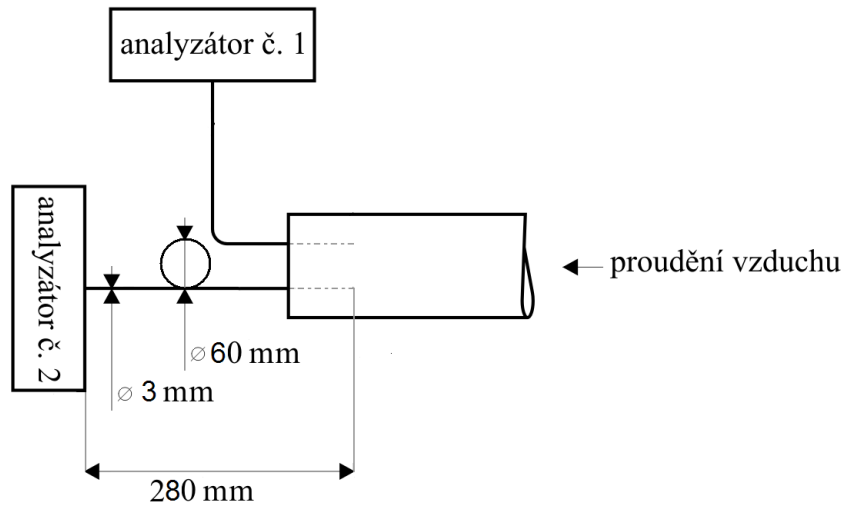
Vliv parametrů odběrové trasy byl zjišťován měřeními s různými odběrovými trasami: rameno 30 cm (Obr. 4.2), rameno 3 m (Obr. 4.3) a smyčka (Obr. 4.4).



Obr. 4.2: Schéma zapojení odběrové trasy s 30 cm ramenem



Obr. 4.3: Schéma zapojení odběrové trasy s 3 m ramenem

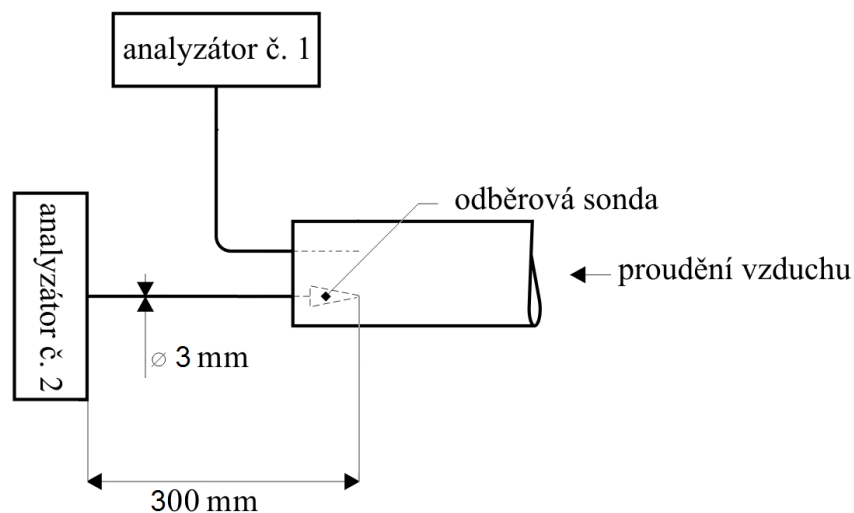


Obr. 4.4: Schéma zapojení odběrové trasy se smyčkou

### Měření vlivu odběrové sondy

Odběrová sonda se využívá k regulaci rychlosti vzduchu podle vztahu (4.1), kde  $v$  je rychlost vzduchu vstupujícího do sondy,  $v_0$  je rychlost vzduchu vystupujícího ze sondy,  $\phi_0$  průměr vstupního otvoru sondy,  $\alpha$  úhel hlavice sondy a  $x$  je výsledné nastavení vzdálenosti vstupu sondy od vstupu do trubice (Obr. 2.4). Její vliv na měření prašného aerosolu s ohledem na nastavení sondy byl zjišťován při zapojení podle obr. (4.5).

$$v = \left( \frac{\phi_0 + 2x \tan \alpha}{\phi_0} \right)^2 v_0 \quad (4.1)$$



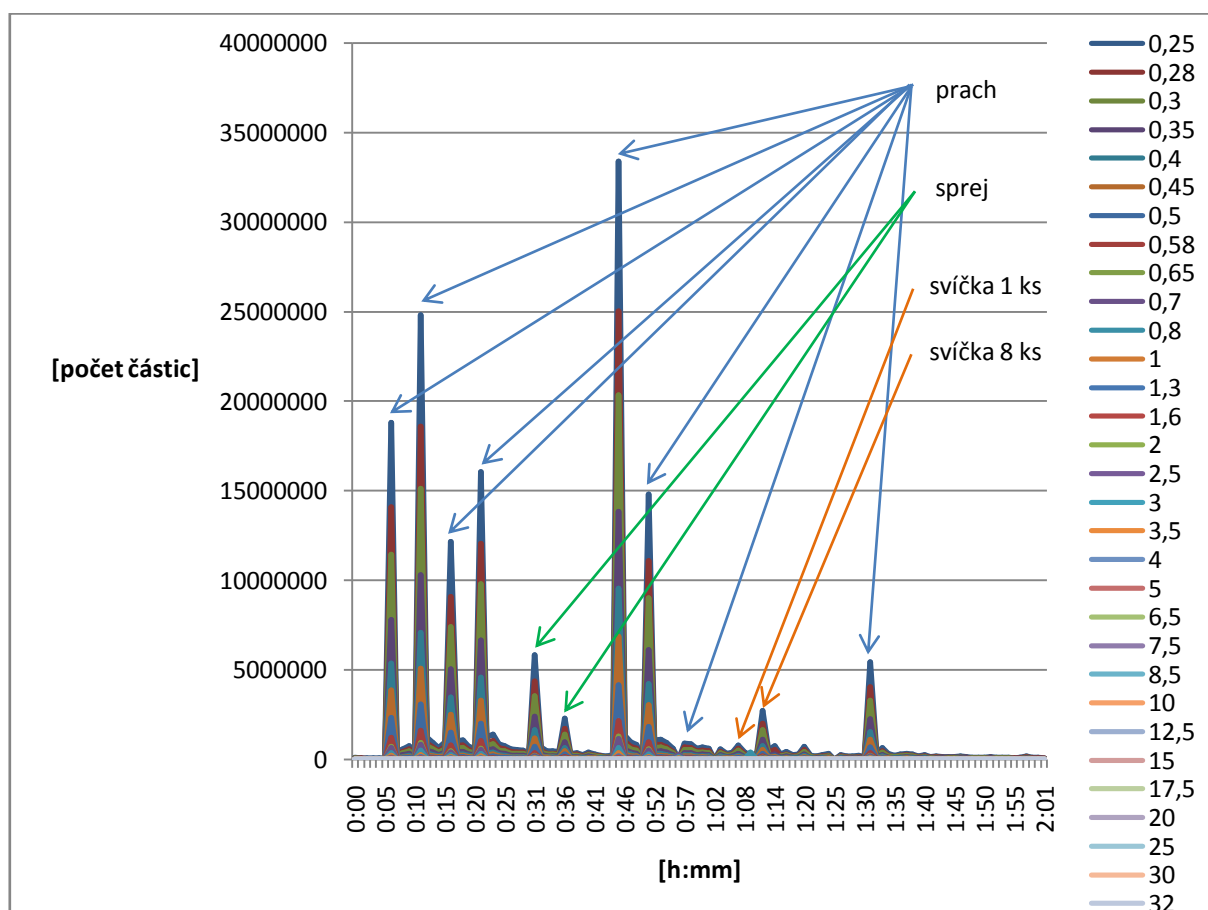
Obr. 4.5: Schéma zapojení s odběrovou sondou



## 4.2 Popis měření

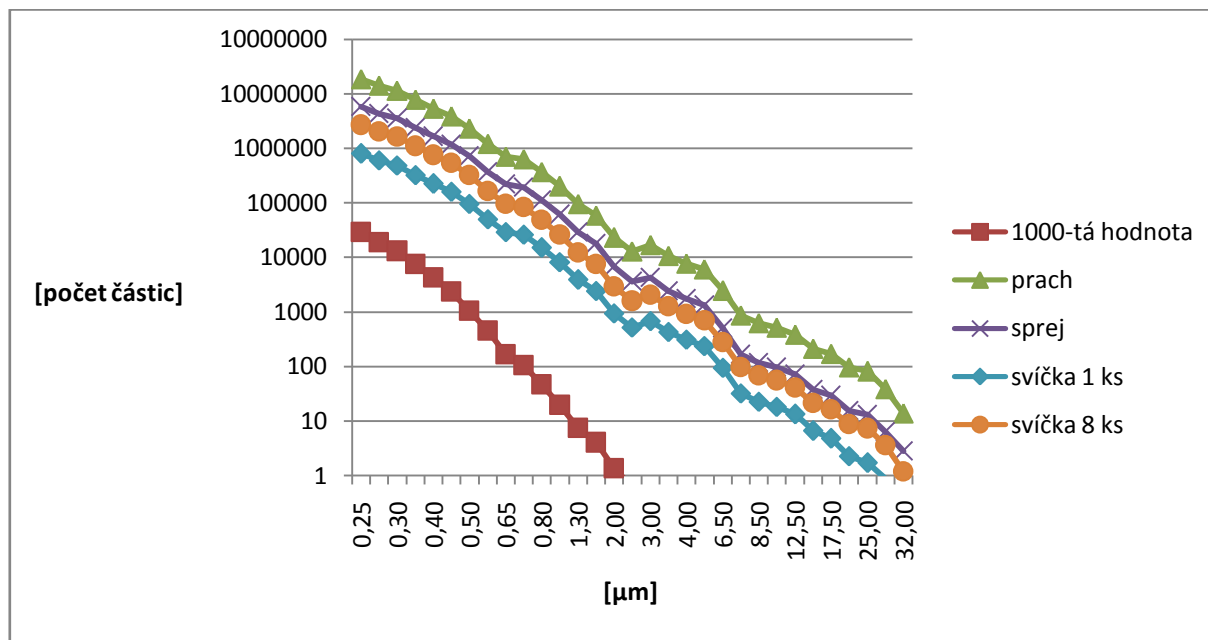
### Kalibrace přístrojů a měření vlivu odběrové trasy

Oba přístroje GRIMM 1.109 byly nastaveny na normální mód ukládání dat, tj. po 1 min. Ventilátor zajišťoval rychlost proudícího vzduchu 2,8 m/s. Tato rychlost odpovídá měřenému objemu 1,2 l vzduchu za minutu a poloměru odběrové trubice 3 mm. Měření při každém zapojení probíhalo 20 hodin, k dispozici je tedy pro každou trasu 1200 hodnot v každé velikostní frakci částic. První 2 hodiny měření byly do vzduchu vstupujícího do ventilátoru přidávány aerosolové částice ve formě prachu z vysavače, vonného spreje a kouře ze zhasínající čajové svíčky, zbylých 18 hodin byl měřen cirkulující vzduch v místnosti bez vnějších zásahů. Graf (4.1) popisuje právě první 2 hodiny měření, kdy jsou do měřeného vzduchu vnášeny další aerosolové částice. Nejvyšších počtů částic je dosahováno přidáváním prachu. V čase 00:55 chybí výrazná špička kvůli chybovému měření přístroje.



Graf 4.1: Počet aerosolových částic v průběhu prvních 2 hodin měření – data z 2. přístroje při zapojení s 30 cm ramenem

Z grafu (4.2) je patrný nárůst počtu aerosolových částic v jednotlivých velikostních frakcích částic vlivem přídatných zdrojů prašnosti. V ustáleném stavu vstupujícího vzduchu (v grafu (4.2) „1000tá hodnota“) byly částice hrubé frakce naměřeny jen v řádu jednotek, příp. vůbec.



Graf 4.2: Počet aerosolových částic pro jednotlivé velikostní frakce částic vlivem přídatných zdrojů prašnosti – data z 2. přístroje při zapojení s 30 cm ramenem

### Měření vlivu odběrové sondy

Oba přístroje GRIMM 1.109 byly nastaveny na normální mód ukládání dat, tj. po 1 min. Nastavení parametru  $x$  sondy bylo 0 mm, 2,3 mm a 5 mm pro rychlosti proudění vzduchu 0 m/s, 2,8 m/s a 4,5 m/s. Celkem tedy bylo proměřeno 9 kombinací nastavení sondy a rychlosti vzduchu, každé z těchto měření probíhalo 1 hodinu, během které byly každých 10 minut přidávány do vzduchu vstupujícího do ventilátoru aerosolové částice ve formě prachu z vysavače. Získáno tedy bylo 60 hodnot v každé kombinaci nastavení sondy a rychlosti proudění vzduchu. Podle vzorce (4.1) lze získat rychlost proudění vzduchu  $v_0 = 2,8$  m/s nastavením na 0 mm při rychlosti proudění vzduchu  $v = 2,8$  m/s nebo na 2,3 mm při rychlosti proudění vzduchu  $v = 4,5$  m/s.

### 4.3 Metodika vyhodnocení naměřených dat

#### Kalibrace přístrojů

Softwarové nastavení přístroje č. 1 udávalo změřená data pouze jako celkovou hmotnost částic  $M$  dané frakce na  $m^3$  vzduchu, zatímco přístroj č. 2 vykazoval pouze počet částic  $N$  dané frakce na litr vzduchu. Bylo tedy nutné určit konstantu, která umožní přepočítání naměřených dat mezi oběma přístroji a zároveň bude zahrnovat i možné chyby přístrojů vůči sobě. S výhodou byla jako tato konstanta použita hmotnost částice  $m$  jednotlivých velikostních frakcí vypočtená podle vztahu:

$$M = Nm \quad (4.2)$$

Soubory naměřených dat z obou přístrojů byly vzájemně časově srovnány. Vyloučení neúplně popsaných objektů bylo využito pro odpovídající si časové okamžiky, kdy alespoň v jednom ze souborů data chyběla nebo byla chybná (tzn. rovna -1). V případě naměření nulových hodnot jedním nebo druhým přístrojem byly vyloučeny pouze neúplné páry.

Pro každý pár dat pak byla vypočtena hodnota  $m_i$  podle vztahu (4.2). Konstanta  $m$  dané frakce byla vypočtena jako medián hodnot  $m_i$  této frakce. Výsledné konstanty  $m$  pro jednotlivé velikostní frakce jsou uvedeny v tabulce (4.1).

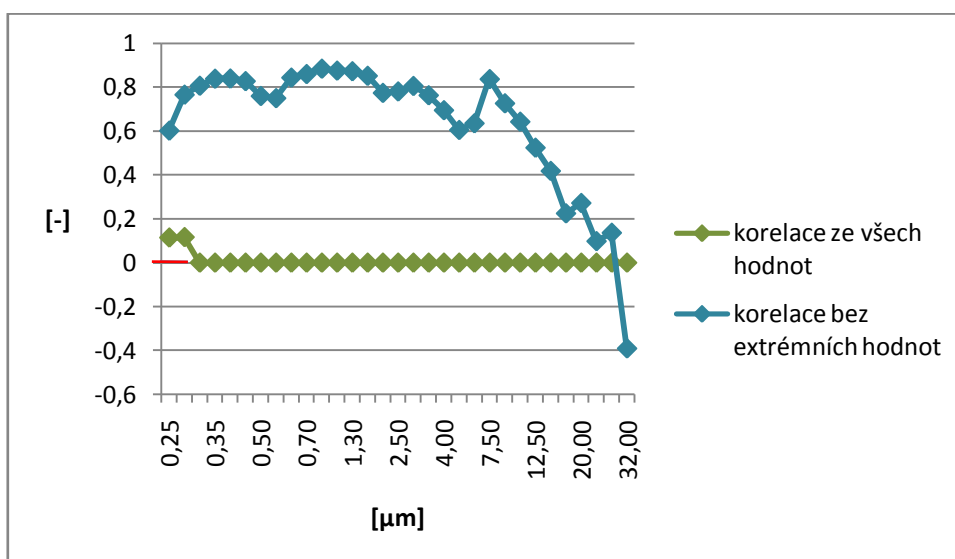
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,25</b>	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,40</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>
<b>konstanta <math>m</math> [<math>\mu\text{g}</math>]</b>	0,005429	0,00725	0,00891	0,013103	0,01902	0,026473	0,043802
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,58</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>1,30</b>	<b>1,60</b>
<b>konstanta <math>m</math> [<math>\mu\text{g}</math>]</b>	0,084403	0,142525	0,160276	0,276509	0,506202	1,066783	1,720606
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>2,00</b>	<b>2,50</b>	<b>3,00</b>	<b>3,50</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,50</b>
<b>konstanta <math>m</math> [<math>\mu\text{g}</math>]</b>	4,4	7,9	6	9,526316	13	16,56349	41
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>7,50</b>	<b>8,50</b>	<b>10,00</b>	<b>12,50</b>	<b>15,00</b>	<b>17,50</b>	<b>20,00</b>
<b>konstanta <math>m</math> [<math>\mu\text{g}</math>]</b>	115,3471	161,1937	194	257,2308	467	572,5	1001
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>25,00</b>	<b>30,00</b>	<b>32,00</b>	-	-	-	-
<b>konstanta <math>m</math> [<math>\mu\text{g}</math>]</b>	1102	1792,563	3457	-	-	-	-

Tab. 4.1: Přepočtové konstanty  $m$  pro jednotlivé velikostní frakce částic

### Měření vlivu odběrové trasy a odběrové sondy

Pro každé měření zapojení byly soubory naměřených dat z obou přístrojů vzájemně časově srovnány. Vyloučení neúplně popsaných objektů bylo využito pro odpovídající si časové okamžiky, kdy alespoň v jednom ze souborů data chyběla nebo byla chybná (tzn. rovna -1). V případě naměření nulových hodnot jedním nebo druhým přístrojem byly vyloučeny pouze neúplné páry. Data z přístroje č. 1 byla přepočtena na počet částic podle vztahu (4.2).

Nárazovým přidáváním relativně velkého množství aerosolových částic docházelo k výraznému rozkolísání párů dat naměřených oběma přístroji v těchto okamžicích. Toto je patrné i z korelací pro soubory se všemi daty a korelací pro soubory, z nichž byly vyloučeny právě tyto extrémní hodnoty (Graf (4.3) – nízké a záporné hodnoty korelace bez extrémních hodnot jsou způsobeny malým počtem párů dat v dané velikostní frakci). Extrémní hodnoty byly definované jako 10 násobek mediánu. Vyloučení kvůli extrémním hodnotám pak platilo pro celý pár dat.



Graf 4.3: Korelace z měření vlivu odběrové trasy - 3 m rameno (podle obr. 4.3)

Z takto upravených dat byly pro každou velikostní frakci vypočteny průměry  $\bar{X}_1$ ,  $\bar{X}_2$  a z nich byla určena účinnost odběrové trasy  $\eta$  podle vztahu:

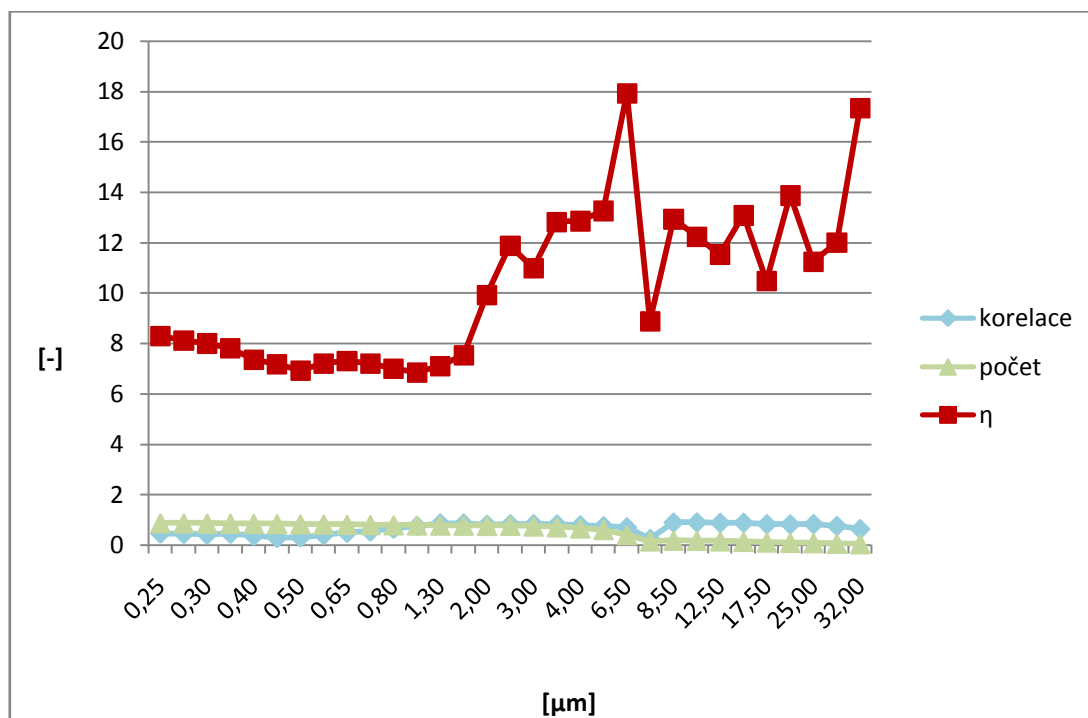
$$\eta = \frac{\bar{X}_2}{\bar{X}_1} \quad (4.3)$$

## 4.4 Vyhodnocení měření a kvantifikace vlivu modifikovaného odběru aerosolu

### 4.4.1 Měření vlivu odběrové trasy

#### Rameno 30 cm

Přístroj č. 1 byl zapojen s odběrovou trasou ve tvaru pravoúhlého kolena o délce 35 cm a průměru ohybu 15 cm, přístroj č. 2 byl zapojen s rovným 30 cm dlouhým ramenem – podle obr. (4.2). V tomto případě tedy při dodržení vztahu (4.3) je výsledná účinnost odběrové trasy  $\eta$  větší než 1 (Obr. 4.4).

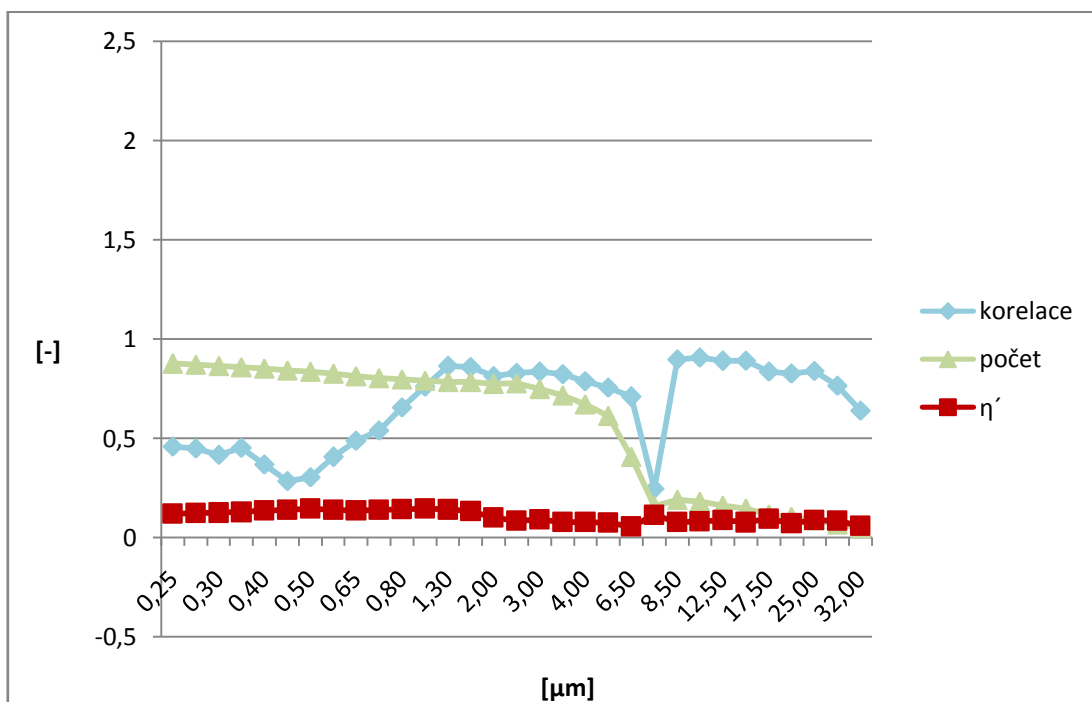


Obr. 4.4: Vliv odběrové trasy – účinnost 30 cm ramena vzhledem k normálovému kolenu

Z tohoto měření je možné snadno určit i vliv normálového kolena na měřené hodnoty použitím vztahu:

$$\eta' = \frac{1}{\eta} = \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2} \quad (4.4)$$

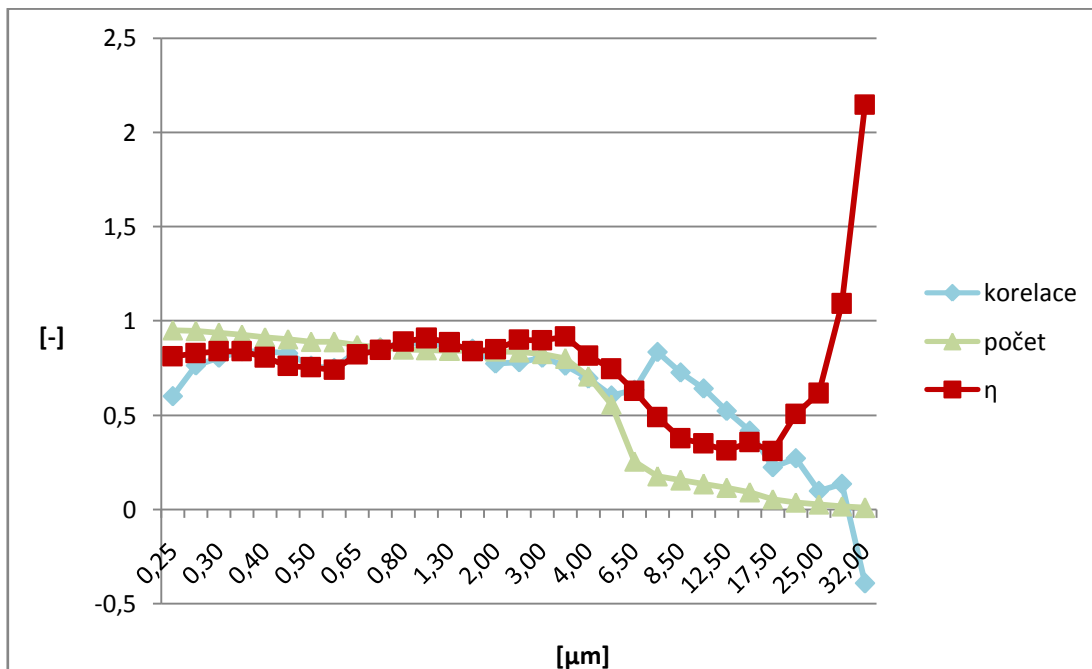
Účinnost odběrové trasy ve tvaru normálového kolena vůči odběrové trase ve tvaru 30 cm rovného ramene je velmi nízká. Pro částice menší než 2  $\mu\text{m}$  se účinnost odběrové trasy pohybuje mezi 0,12 a 0,15, pro větší částice účinnost klesá až k hodnotám 0,08 a 0,06 (viz. Graf 4.5, Tab. P3.1).



Graf 4.5: Vliv odběrové trasy – účinnost normálového kolena vzhledem k 30 cm ramenu

### Rameno 3m

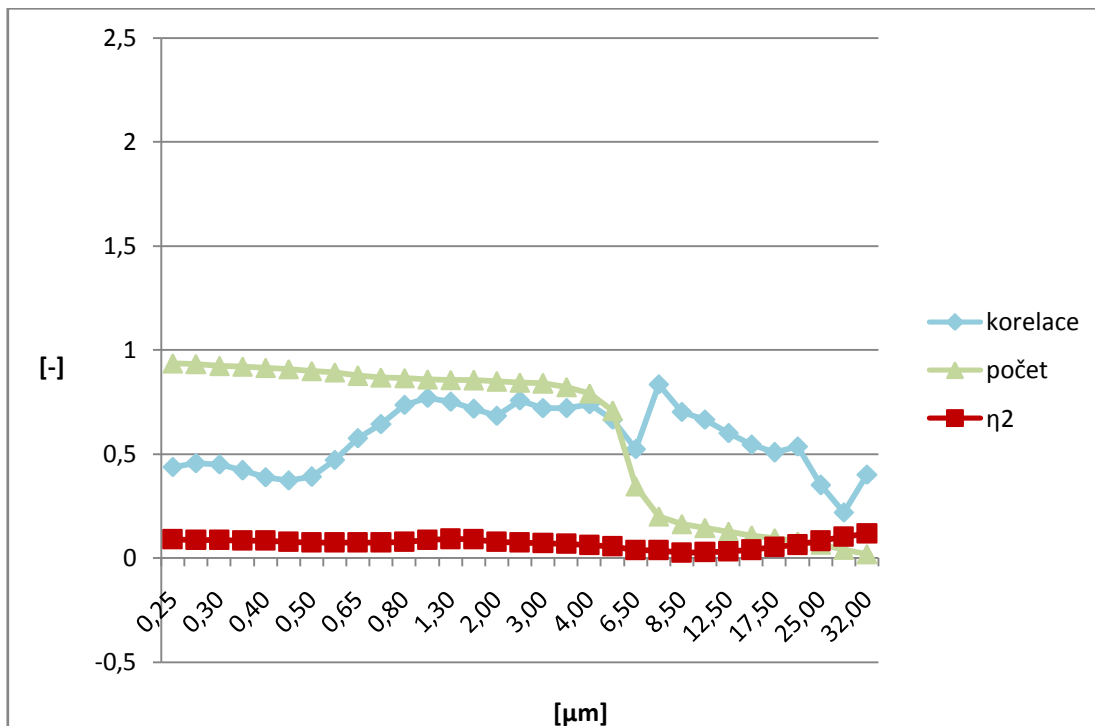
Přístroj č. 1 byl zapojen s odběrovou trasou ve tvaru pravoúhlého kolena o délce 35 cm a průměru ohybu 15 cm, přístroj č. 2 byl zapojen s rovným 3 m dlouhým ramenem a pravoúhlým kolenem shodným s normálovým – podle obr. (4.3). Tímto měřením lze tedy zjistit vliv 3 m ramena přímo, bez porovnávání s jinou trasou. Účinnost 3 m dlouhého ramena je pro částice do 6,5  $\mu\text{m}$  vysoká, hodnoty se pohybují od 0,63 do 0,91. Pro částice od 6,5  $\mu\text{m}$  do 17,5  $\mu\text{m}$  dochází k poklesu účinnosti až k 0,31 a pro větší částice pak k jejímu strmému nárůstu až nad hodnotu 1 – toto je ale pravděpodobně způsobeno nedostatečným množstvím dat pro tyto frakce (viz. Graf 4.6, Tab.P3.2).



Graf 4.6: Vliv odběrové trasy – účinnost 3 m ramena

## Smyčka

Přístroj č. 1 byl zapojen s odběrovou trasou ve tvaru pravoúhlého kolena o délce 35 cm a průměru ohybu 15 cm, přístroj č. 2 byl zapojen s 28 cm ramenem se smyčkou o průměru 6 cm uprostřed – podle obr. (4.4). Tímto měřením lze tedy zjistit vliv smyčky vzhledem k normálovému rameni ( $\eta_1$ ), nebo po započtení účinnosti  $\eta'$  i vliv smyčky vzhledem k 30 cm rovnému rameni ( $\eta_2$ ). Účinnost smyčky vzhledem k 30cm rameni je velmi nízká, dosahuje hodnot od 0,06 do 0,09, s mírným poklesem pro částice od 6,5  $\mu\text{m}$  do 17,5  $\mu\text{m}$  hodnoty 0,03 až 0,05 a nárůstem pro větší částice – toto je ale pravděpodobně způsobeno nedostatečným množstvím dat pro tyto frakce (viz. Graf 4.7, Tab. P3.3).

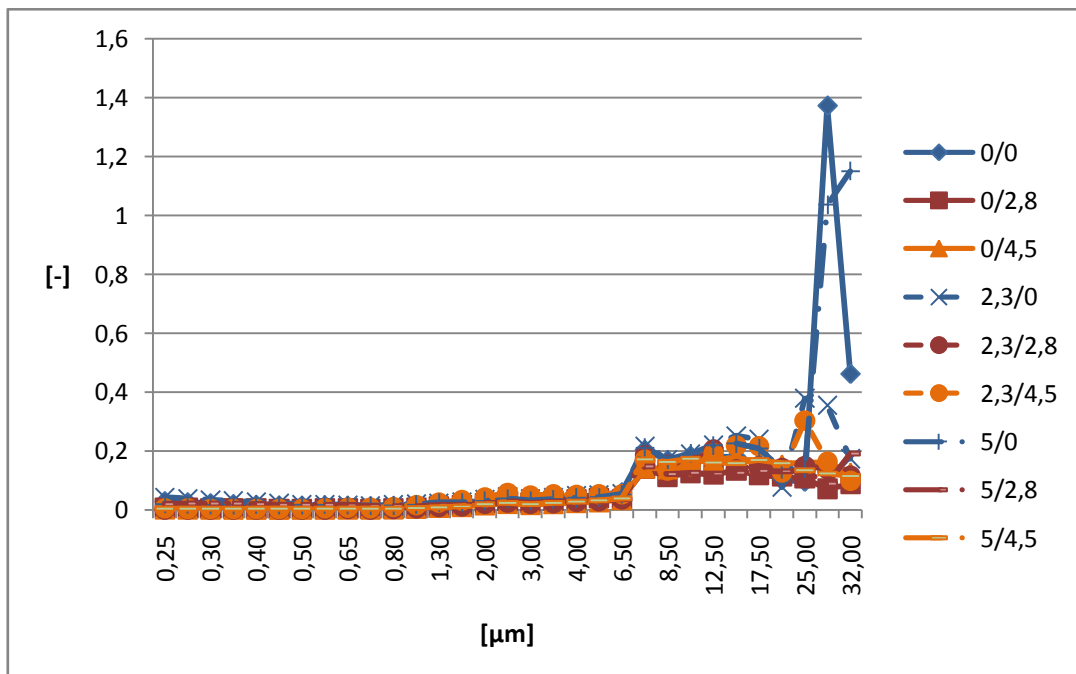


Graf 4.7: Vliv odběrové trasy – účinnost smyčky vzhledem k 30cm rameni

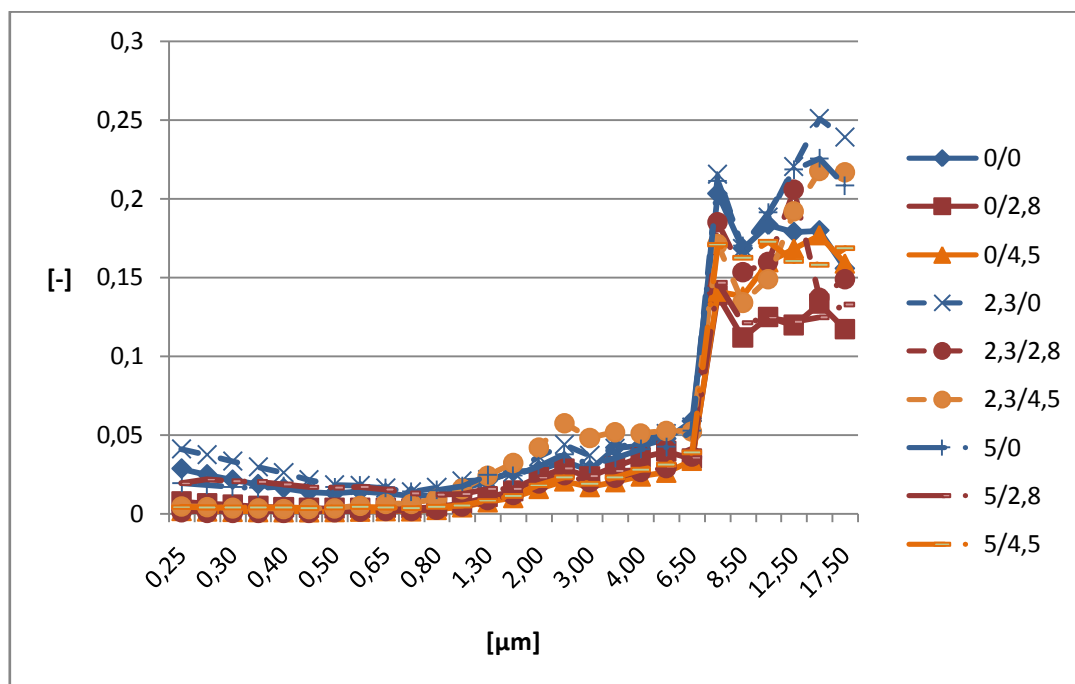


#### 4.4.2 Měření vlivu odběrové sondy

Přístroj č. 1 byl zapojen s odběrovou trasou ve tvaru pravoúhlého kolena o délce 35 cm a průměru ohybu 15 cm, přístroj č. 2 byl zapojen s rovným 28 cm dlouhým ramenem s odběrovou sondou – podle obr. (4.5). Měření neprokázalo jakýkoliv vliv nastavení odběrové sondy nebo rychlosti proudění vzduchu na výsledné hodnoty měření. Účinnost odběrové trasy je vlivem odběrové sondy velice nízká – pro částice do 6,5  $\mu\text{m}$  dosahuje hodnot od 0,001 do 0,05, pro větší částice se účinnost zvyšuje až nad hodnotu 0,2. Výrazný nárůst účinnosti (nad 1) pro největší měřené frakce je pravděpodobně způsoben nedostatkem dat v této oblasti (viz. Graf 4.7, Graf 4.8, Grafy P4.1 – P4.9).



Graf 4.7: Vliv odběrové sondy

Graf 4.8: Vliv odběrové sondy – výseč pro frakce 0,25 až 17,50  $\mu\text{m}$

## Závěr

Kromě shrnutí základních poznatků o aerosolových částicích a metodách jejich měření se v teoretické části této práce podařilo i popsat jejich chování matematicky. Účinnost odběrové trasy je ovlivněna gravitační silou působící na částice, setrvačnou silou v ohybech a zúženích trasy, elektrostatickou silou, difúzí částic, termoforézu a turbulentním prostředím. Celková účinnost odběrové trasy je pak součtem účinností těchto jednotlivých zdrojů. Co se týče velikosti částic, tak s rostoucí velikostí částice se účinnost vlivem gravitační síly, vlivem difúze i setrvačné síly v ohybech trasy zmenšuje. Zvyšující se rychlost proudění vzduchu účinnost vlivem gravitační síly a difúze zvyšuje, účinnost vlivem setrvačné síly v ohybech trasy naopak snižuje.

Konkrétní hodnoty vlivu odběrové trasy a odběrové sondy pak byly zjišťovány praktickým měřením. Měření vlivu odběrové trasy potvrdilo teoretické vztahy, podle nichž pro větší částice by měla být naměřená účinnost odběrové trasy menší. U normálového kolena vůči 30 cm rovnému rameni jde o pokles pro částice větší než 2  $\mu\text{m}$ , u smyčky vůči 30 cm rovnému rameni a u 3 m dlouhému rovnému rameni jde o pokles pro částice větší než 6,5  $\mu\text{m}$ . Účinnost odběrové trasy v provedení dlouhé rovné trubice byla poměrně vysoká. Pokud jde ale o jakékoliv ohyby na této odběrové trase (koleno, smyčka), pak podle provedeného měření klesá účinnost měření k hodnotám, kdy už je jakákoliv korekce dat velice nepřesná. Ještě nižší je pak podle provedených měření účinnost odběrové trasy při použití odběrové sondy. To může být způsobeno kuželovou špičkou sondy, která snižuje aerodynamický odpor a částice jsou tak strhávány proudícím vzduchem kolem sondy. Jako významné se jeví opět velikostní frakce 2 a 6,5  $\mu\text{m}$  u níž dochází k nárůstu účinnosti.

Zjištěné hodnoty účinnosti odběrové trasy a odběrové sondy měřením popsaným výše a provedeným v rámci této práce tedy odpovídají svým průběhem teoretickým předpokladům ale jsou zarážející, co se týče dosahovaných hodnot. Bylo by tedy vhodné se tomuto problému dále věnovat ať už dalším měřením nebo teoretickým modelováním chování částic. Je třeba dodat, že měření bylo prováděno pro rychlost proudícího vzduchu 2,8 m/s, rychlost dosahovaná při měření automobilem nebo letadlem dosahuje ale řádově vyšších hodnot, což by mělo účinnost odběrové trasy vlivem gravitace a difúze zvyšovat (naopak účinnost pro ohyby na odběrové trase bude o to více klesat). V praxi by tedy bylo vhodné co nejvíce se ohybům na odběrové trase vyhnout.

## Seznam použité literatury

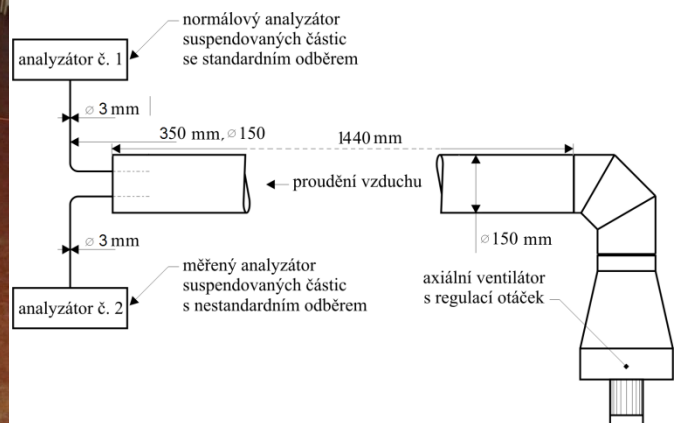
- [1] BARON, P. A. a K. WILLEKE. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. Second edition. USA, 2001. ISBN 0-471-35636-0.
- [2] DOHÁNYOSOVÁ, P., L. KUBINCOVÁ, J. SMOLÍK, J. SCHWARZ a V. ŽDÍMAL. LABORATOŘ CHEMIE A FYZIKY AEROSOLŮ, Ústav chemických procesů AV ČR, Česká aerosolová společnost. *Výkladový slovník aerosolových termínů*. 2007.
- [3] HATLOVÁ, M. ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, Vysoké učení technické v Brně. *Meteorologických podmínek na koncentraci částic v ovzduší*. Brno, 2009.
- [4] HEMERKA, J. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. *Odlučování tuhých částic*. Praha, 2000. ISBN 80-01-02270-6.
- [5] HOLLEROVÁ, J. Prašnost na pracovišti. In: *Státní zdravotní ústav* [online]. 2007 [cit. 2012-02-01]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/prasnost-na-pracovisti-1>
- [6] KEDER, J. ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Rozbor výsledků kontinuálního měření spekter velikostí částic analyzátorů GRIMM ve vztahu k potenciálním nepříznivým zdravotním účinkům*. Beroun, 2007.
- [7] KOTLÍK, B., H. KAZMAROVÁ a V. PUKLOVÁ. STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV PRAHA, Centrum hygieny životního prostředí. *Expozice obyvatel suspendovaným částicím*. 2009.
- [8] MAZNOVÁ, J., I. HŮNOVÁ, O. VLČEK a H. HNILICOVÁ. ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Zlepšení metod hodnocení znečištění ovzduší částicemi PM10 na území České republiky*. Praha, 2009.
- [9] POKORNÝ, B., A. KRUMLOVÁ, A. PEŘINA, I. KOLÁČNÝ, M. TESAŘÍKOVÁ a M. HORÁK. ZDRAVOTNÍ ÚSTAV SE SÍDLEM V BRNĚ, Centrum ochrany zdraví. *Vyhodnocení kvality ovzduší průmyslové zóny města Jihlavy a z něho vyplývajících zdravotních rizik*. Brno, 2009.
- [10] SKÁCEL, F. a V. TEKÁČ. VŠCHT, MŽP. *Podklady pro Ministerstvo životního prostředí k provádění Protokolu o PRTR – přehled metod měření a identifikace látek sledovaných podle Protokolu o registrech úniku a přenosu znečišťujících látek v únicích do ovzduší*. 2007.
- [11] SPIELVOGEL, J., P. CHALOUPECKÝ, M. WEIß a L. MÖLTER. Časově rozlišená měření jemných částic v atmosféře. *CHEMAGAZÍN*. 2011, XXI, č. 3.
- [12] SYNÁČKOVÁ, M. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. *Voda a ovzduší 40 – Ochrana vody a ovzduší*. Praha, 2000. ISBN 80-01-02228-5.

- [13] ČSN EN 12341. *Kvalita ovzduší – Stanovení frakce PM10 aerosolových částic – Referenční metoda a postup při terénní zkoušce ověření požadované těsnosti shody mezi výsledky hodnocené a referenční metody*. Praha: ČNI, 2000.
- [14] ČSN ISO 7708. *Kvalita ovzduší – Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků k hodnocení zdravotních rizik*. Praha: ČNI, 1998.
- [15] ČSN ISO 4225. *Kvalita ovzduší – Obecná hlediska – Slovník*. Praha: ČNI, 1997.
- [16] Zákon č. 472/2005 Sb., Úplné znění zákona č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2005.
- [17] Nařízení vlády 597/2006 Sb., o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. 2006.
- [18] Alergie a její původci. *Avair.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.avair.cz/alergie-a-jeji-puvodci.php>
- [19] CENIA. *Vítejte na Zemi...: Multimediální ročenka životního prostředí* [online]. 2008 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://vitejtenazemi.cenia.cz/index.html>
- [20] Emisní bilance České republiky 1999 – kategorie zdrojů znečišťování ovzduší. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2010 [cit. 2012-02-08]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/oez99/99embil.html>
- [21] Howthe 1100 Aerosol Spectrometer Series works. GRIMM TECHNOLOGIES, INC. *Dustmonitor.com* [online]. 2011 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.dustmonitor.com/General/principles.htm#1100s>
- [22] Metody měření – měřící přístroje. *Virtuální centrum informací o životním prostředí pro školy* [online]. 2012 [cit. 2012-01-2]. Dostupné z: <http://www.virtualnicentrum.cz/vzdelavaci-moduly/modul-ovzdusi/zneistenio-ovzdusi/prach/metody-mereni/>
- [23] Poléťavý prach (PM10). *Integrovaný registr znečišťování* [online]. 2007 [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: [http://www.irz.cz/repository/latky/poletavy\\_prach.pdf](http://www.irz.cz/repository/latky/poletavy_prach.pdf)
- [24] Portable Aerosol Spectrometer. GRIMM TECHNOLOGIES, INC. *Dustmonitor.com* [online]. 2010 [cit. 2012-07-04]. Dostupné z: <http://www.dustmonitor.com/Research/1109.htm>
- [25] Velikostní distribuce aerosolu. In: *Enviwiki* [online]. 2009 [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: [http://www.enviwiki.cz/wiki/Velikostn%C3%AD\\_distribuce\\_aerosolu](http://www.enviwiki.cz/wiki/Velikostn%C3%AD_distribuce_aerosolu)

## Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. 1 – FOTOGRAFIE Z MĚŘENÍ .....	A
PŘÍLOHA Č. 2 – ČASOVÝ PLÁN PŘIDÁVÁNÍ AEROSOLOVÝCH ČÁSTIC .....	D
PŘÍLOHA Č. 3 – VÝSLEDKY Z MĚŘENÍ VLIVU ODBĚROVÉ TRASY .....	E
PŘÍLOHA Č. 4 – VÝSLEDKY Z MĚŘENÍ VLIVU ODBĚROVÉ SONDY .....	G
PŘÍLOHA Č. 5 – FOTOGRAFIE Z MĚŘENÍ POMOCÍ LETADLA.....	L
PŘÍLOHA Č. 6 – NAMĚŘENÁ DATA A JEJICH ZPRACOVÁNÍ .....	M

## Příloha č. 1 – Fotografie z měření



Obr. P1.1: Měřicí aparatura – celkový pohled



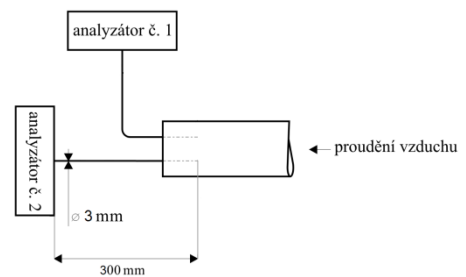
Obr. P1.2: Cejchování regulace rychlosti proudění vzduchu anemometrem



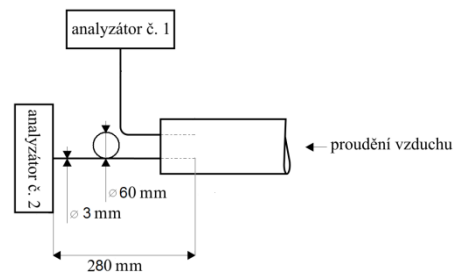
Obr. P1.3: Kalibrace přístrojů



Obr. P1.4: Měření vlivu odběrové trasy – 30 cm rameno



Obr. P1.5: Měření vlivu odběrové trasy – smyčka



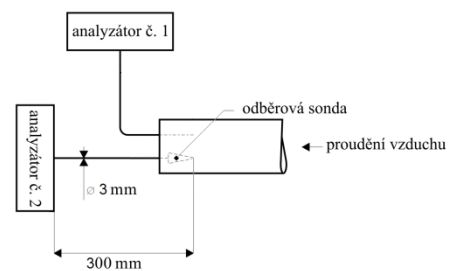




Obr. P1.6: Odběrové trasy používané při měření – smyčka, 30 cm rameno



Obr. P1.7: Měření vlivu rychlostní sondy



## Příloha č. 2 – Časový plán přidávání aerosolových částic

Přidávání aerosolových částic do proudícího vzduchu probíhalo podle následujícího časového plánu:

[hh:mm]

00:00	začátek měření
00:05	prach
00:10	prach
00:15	prach
00:20	prach
00:30	sprej
00:35	sprej
00:45	prach
00:50	prach
00:55	prach
01:06	svíčka 1 ks
01:10	svíčka 8 ks
01:30	prach
20:00	konec měření

## Příloha č. 3 – Výsledky z měření vlivu odběrové trasy

<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,25</b>	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,40</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>
<b>korelace [-]</b>	0,46	0,45	0,42	0,45	0,37	0,28	0,30
<b><math>\eta</math> [-]</b>	8,30	8,13	8,00	7,80	7,36	7,17	6,93
<b><math>\eta'</math> [-]</b>	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,58</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>1,30</b>	<b>1,60</b>
<b>korelace [-]</b>	0,41	0,49	0,54	0,65	0,76	0,86	0,86
<b><math>\eta</math> [-]</b>	7,21	7,29	7,21	6,99	6,85	7,11	7,53
<b><math>\eta'</math> [-]</b>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,13
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>2,00</b>	<b>2,50</b>	<b>3,00</b>	<b>3,50</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,50</b>
<b>korelace [-]</b>	0,81	0,83	0,83	0,82	0,79	0,75	0,71
<b><math>\eta</math> [-]</b>	9,92	11,87	10,99	12,82	12,86	13,26	17,93
<b><math>\eta'</math> [-]</b>	0,10	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,06
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>7,50</b>	<b>8,50</b>	<b>10,00</b>	<b>12,50</b>	<b>15,00</b>	<b>17,50</b>	<b>20,00</b>
<b>korelace [-]</b>	0,25	0,90	0,91	0,89	0,89	0,84	0,83
<b><math>\eta</math> [-]</b>	8,88	12,94	12,24	11,54	13,09	10,48	13,88
<b><math>\eta'</math> [-]</b>	0,11	0,08	0,08	0,09	0,08	0,10	0,07
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>25,00</b>	<b>30,00</b>	<b>32,00</b>	-	-	-	-
<b>korelace [-]</b>	0,84	0,76	0,64	-	-	-	-
<b><math>\eta</math> [-]</b>	11,25	12,01	17,34	-	-	-	-
<b><math>\eta'</math> [-]</b>	0,09	0,08	0,06	-	-	-	-

Tab. P3.1: Vliv odběrové trasy – účinnost 30 cm ramena vzhledem k normálovému kolenu a normálového kolena vzhledem k 30 cm ramenu

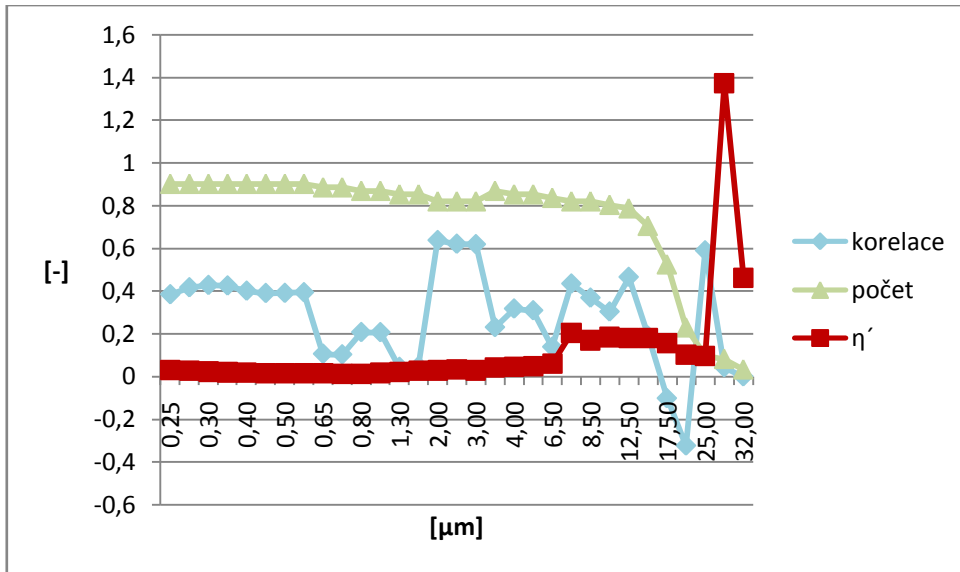
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,25</b>	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,40</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>
<b>korelace [-]</b>	0,60	0,77	0,81	0,84	0,84	0,83	0,76
<b><math>\eta</math> [-]</b>	0,81	0,83	0,84	0,84	0,81	0,76	0,75
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,58</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>1,30</b>	<b>1,60</b>
<b>korelace [-]</b>	0,75	0,84	0,86	0,88	0,88	0,87	0,85
<b><math>\eta</math> [-]</b>	0,74	0,82	0,84	0,89	0,91	0,89	0,84
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>2,00</b>	<b>2,50</b>	<b>3,00</b>	<b>3,50</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,50</b>
<b>korelace [-]</b>	0,77	0,78	0,81	0,76	0,69	0,60	0,64
<b><math>\eta</math> [-]</b>	0,85	0,90	0,90	0,92	0,82	0,75	0,63
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>7,50</b>	<b>8,50</b>	<b>10,00</b>	<b>12,50</b>	<b>15,00</b>	<b>17,50</b>	<b>20,00</b>
<b>korelace [-]</b>	0,84	0,73	0,64	0,52	0,42	0,22	0,27
<b><math>\eta</math> [-]</b>	0,49	0,38	0,35	0,31	0,36	0,31	0,51
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>25,00</b>	<b>30,00</b>	<b>32,00</b>	-	-	-	-
<b>korelace [-]</b>	0,10	0,14	-0,39	-	-	-	-
<b><math>\eta</math> [-]</b>	0,62	1,09	2,15	-	-	-	-

Tab. P3.2: Vliv odběrové trasy – účinnost 3 m ramena

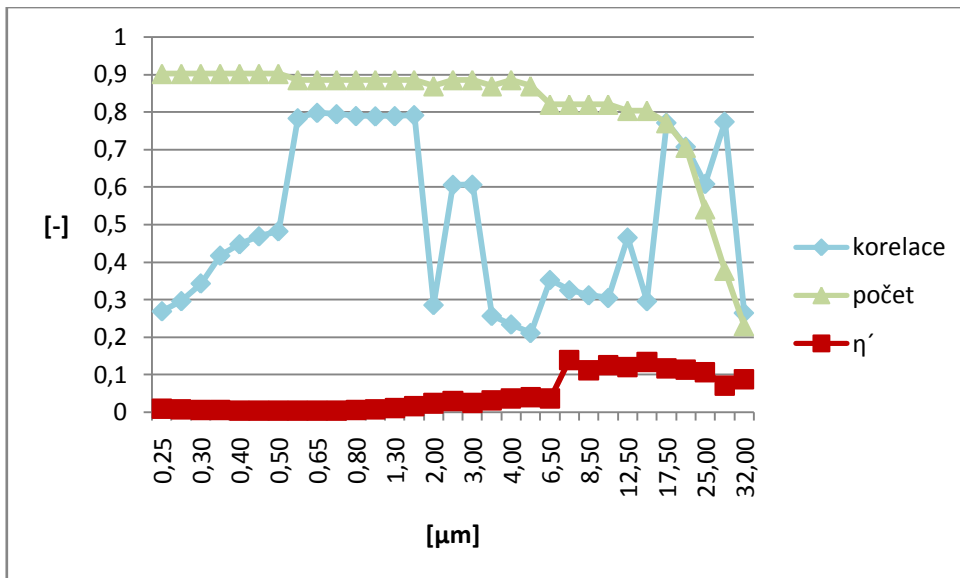
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,25</b>	<b>0,28</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,40</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>
<b>korelace [-]</b>	0,46	0,45	0,42	0,45	0,37	0,28	0,30
<b><math>\eta_1</math> [-]</b>	0,74	0,71	0,70	0,65	0,61	0,56	0,52
<b><math>\eta_2</math> [-]</b>	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,58</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>1,30</b>	<b>1,60</b>
<b>korelace [-]</b>	0,41	0,49	0,54	0,65	0,76	0,86	0,86
<b><math>\eta_1</math> [-]</b>	0,53	0,55	0,53	0,55	0,59	0,65	0,68
<b><math>\eta_2</math> [-]</b>	0,07	0,08	0,07	0,08	0,09	0,09	0,09
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>2,00</b>	<b>2,50</b>	<b>3,00</b>	<b>3,50</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,50</b>
<b>korelace [-]</b>	0,81	0,83	0,83	0,82	0,79	0,75	0,71
<b><math>\eta_1</math> [-]</b>	0,76	0,87	0,79	0,86	0,80	0,74	0,65
<b><math>\eta_2</math> [-]</b>	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>7,50</b>	<b>8,50</b>	<b>10,00</b>	<b>12,50</b>	<b>15,00</b>	<b>17,50</b>	<b>20,00</b>
<b>korelace [-]</b>	0,25	0,90	0,91	0,89	0,89	0,84	0,83
<b><math>\eta_1</math> [-]</b>	0,34	0,33	0,34	0,35	0,51	0,57	0,88
<b><math>\eta_2</math> [-]</b>	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
<b>velikost částic [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>25,00</b>	<b>30,00</b>	<b>32,00</b>	-	-	-	-
<b>korelace [-]</b>	0,84	0,76	0,64	-	-	-	-
<b><math>\eta_1</math> [-]</b>	0,93	1,23	2,04	-	-	-	-
<b><math>\eta_2</math> [-]</b>	0,08	0,10	0,12	-	-	-	-

Tab. P3.3: Vliv odběrové trasy – účinnost smyčky vzhledem k normálovému kolenu ( $\eta_1$ ) a vzhledem k 30 cm rameni ( $\eta_2$ )

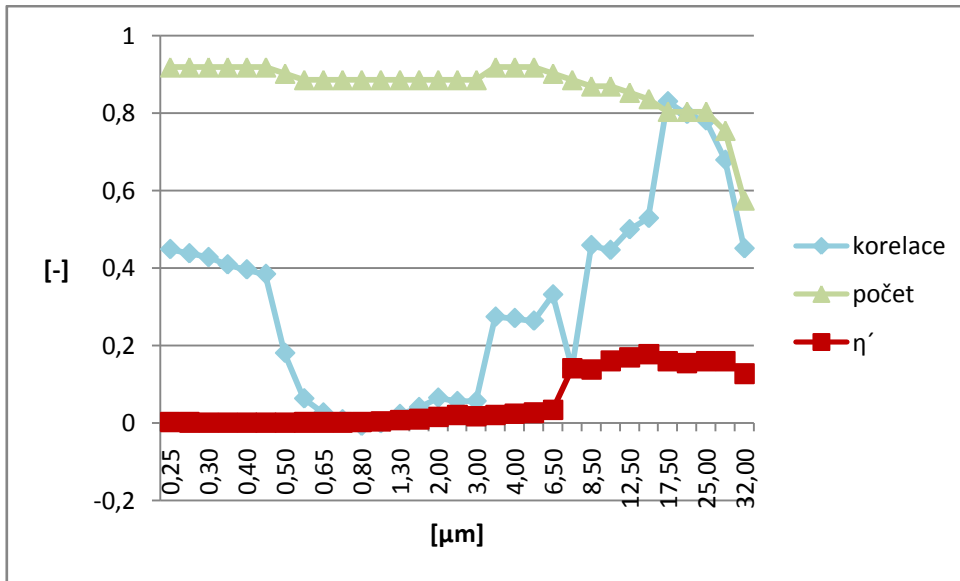
### Příloha č. 4 – Výsledky z měření vlivu odběrové sondy



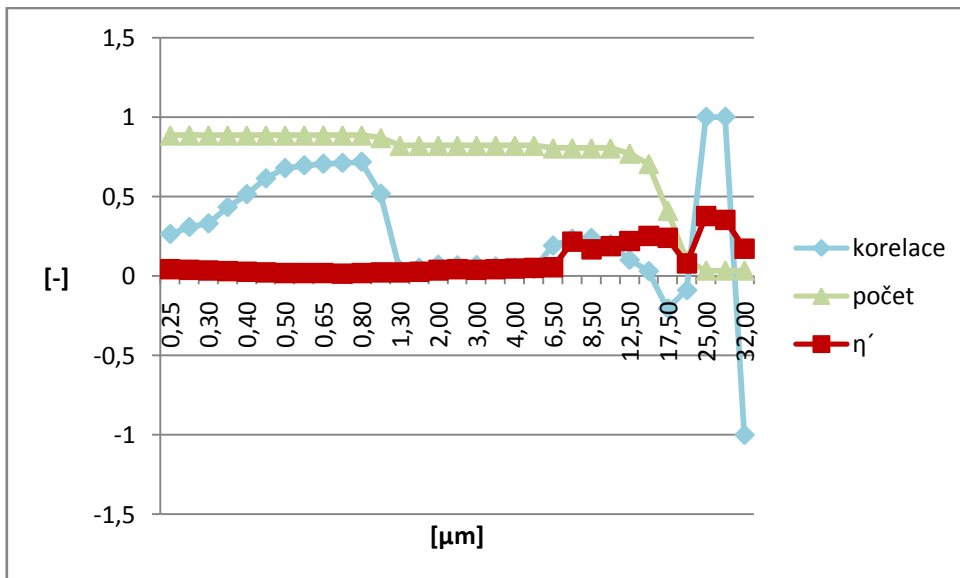
Graf P4.1: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 0$  m/s,  $x = 0$  mm



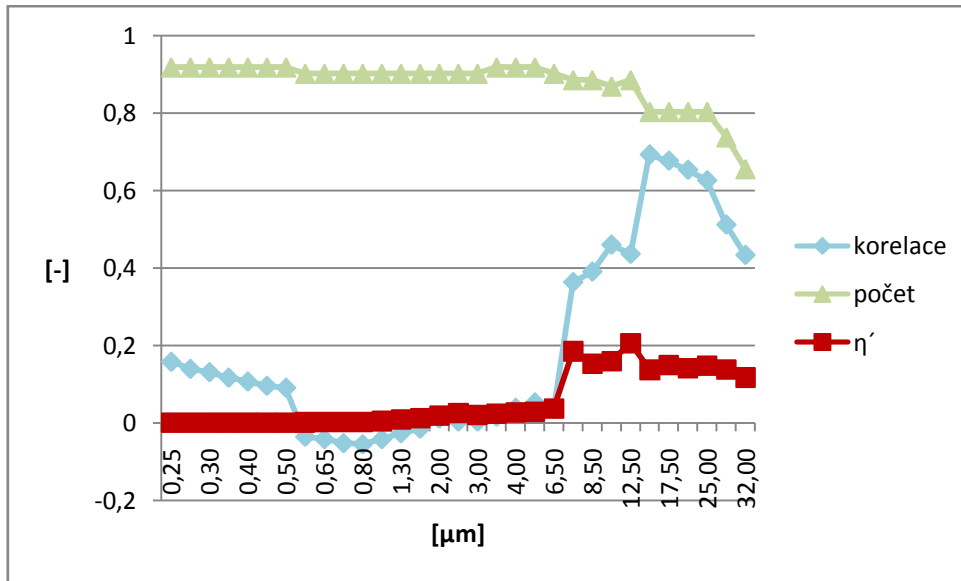
Graf P4.2: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 2,8$  m/s,  $x = 0$  mm



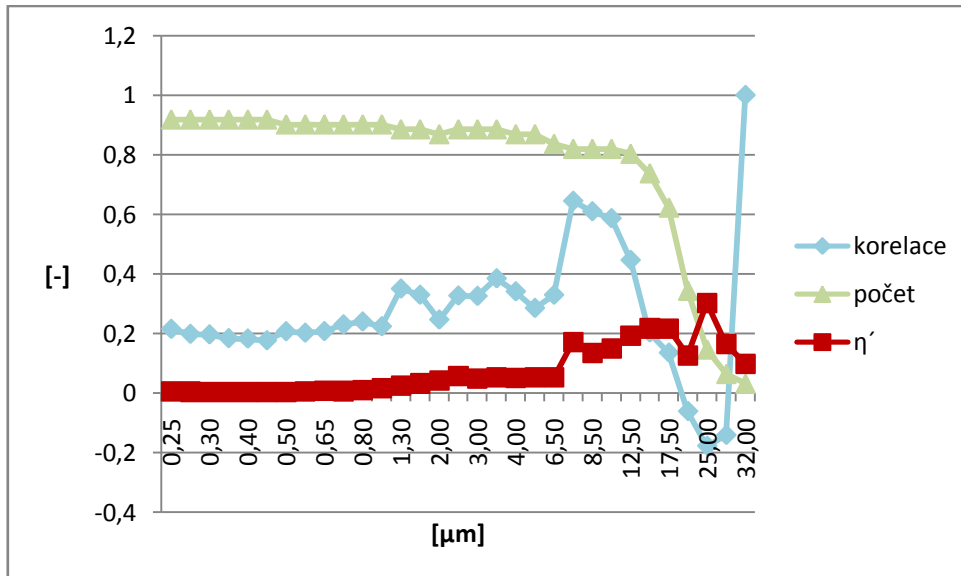
Graf P4.3: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 4,5 \text{ m/s}$ ,  $x = 0 \text{ mm}$



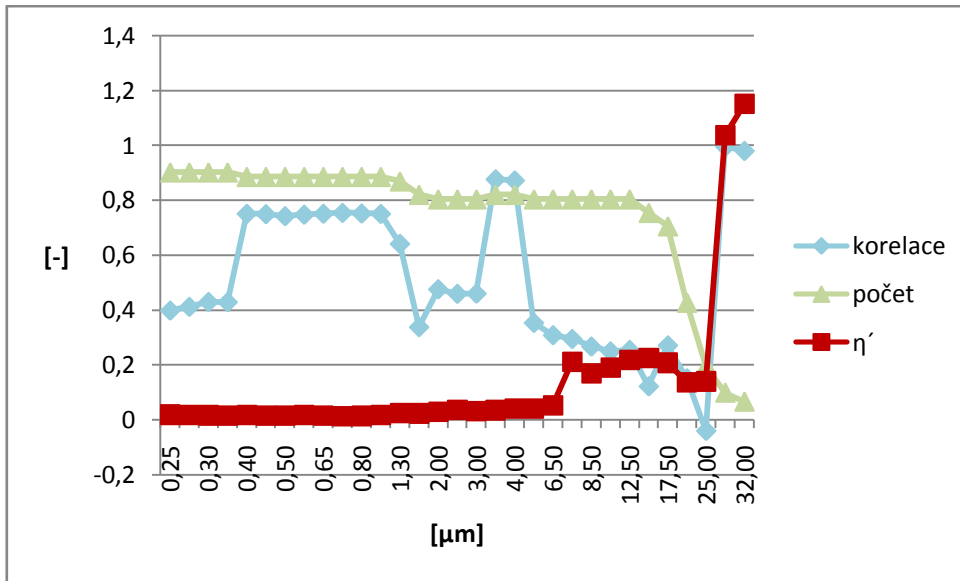
Graf P4.4: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 0 \text{ m/s}$ ,  $x = 2,3 \text{ mm}$



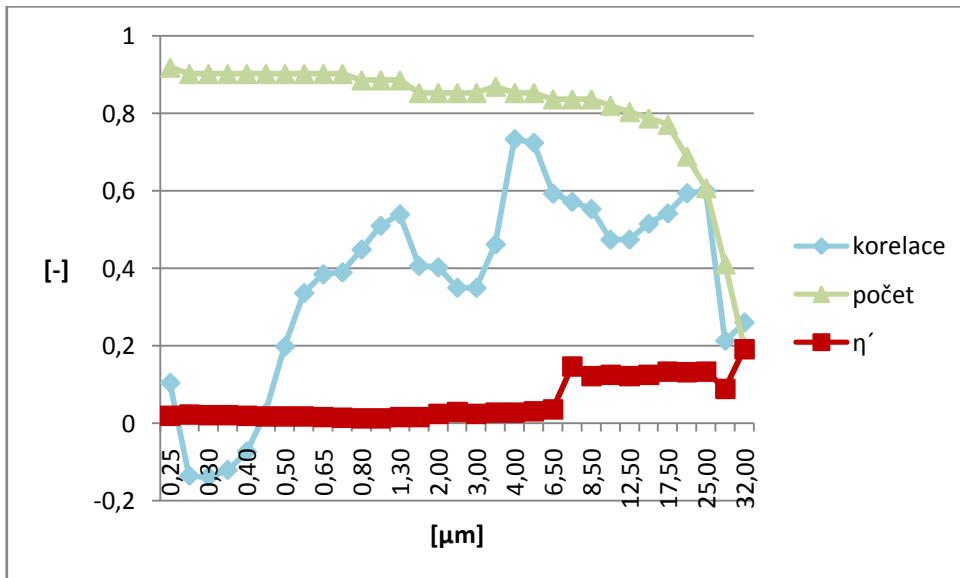
Graf P4.5: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 2,8 \text{ m/s}$ ,  $x = 2,3 \text{ mm}$



Graf P4.6: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 4,5 \text{ m/s}$ ,  $x = 2,3 \text{ mm}$

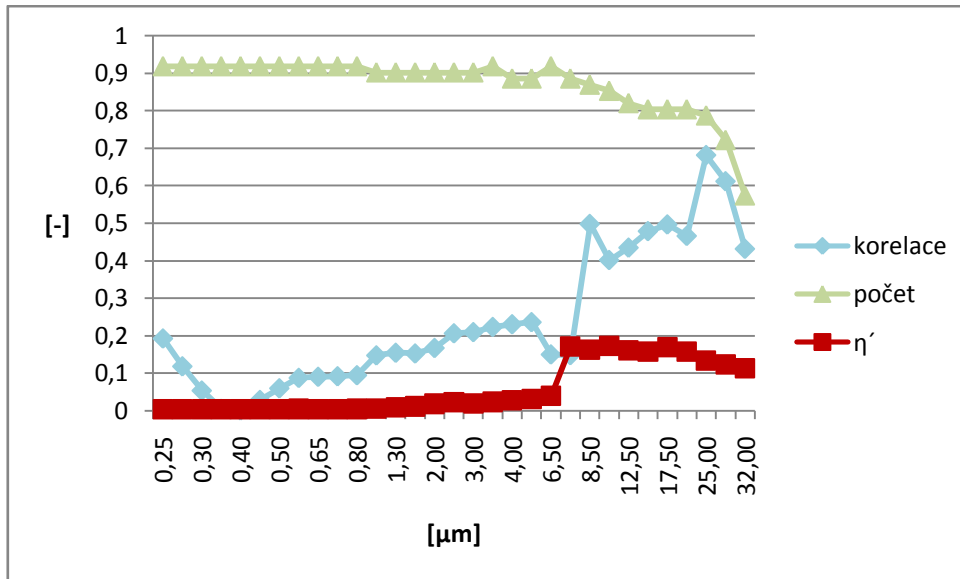


Graf P4.7: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 0$  m/s,  $x = 5$  mm



Graf P4.8: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 2,8$  m/s,  $x = 5$  mm



Graf P4.9: Vliv odběrové sondy – kombinace  $v = 4,5 \text{ m/s}$ ,  $x = 5 \text{ mm}$

## Příloha č. 5 – Fotografie z měření pomocí letadla



Obr. P5.1: Celkový pohled na letadlo [ČHMÚ]



Obr. P5.2: Odběrová sonda umístěná pod křídlem letadla [ČHMÚ]



Obr. P5.3: Analyzátor GRIMM 1.109 [ČHMÚ]

## **Příloha č. 6 – Naměřená data a jejich zpracování**

Naměřená data a jejich zpracování, jehož výstupy jsou uvedeny v této práci, jsou k dispozici elektronicky ve formátu .xlsx na přiloženém CD.