



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MĚŘENÍ KONCENTRACE ČÁSTIC V OVZDUŠÍ RŮZNÝMI METODAMI

PARTICLE CONCENTRATION MEASUREMENT BY VARIOUS METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kuruc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Sitek

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jan Kuruc**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Sitek**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření koncentrace částic v ovzduší různými metodami

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Částice v ovzduší mají přímý vliv na zdraví člověka. Jejich koncentraci lze měřit mnoha více či méně vhodnými metodami. Práce bude věnována popisu metod měření částic v ovzduší. V praktické části budou srovnány a vyhodnoceny hodnoty naměřené přístroji, jimiž v současné době disponuje Energetický ústav.

Cíle bakalářské práce:

- seznámit s problematikou jemných částic v ovzduší,
- popsat měřicí aparaturu,
- vyhodnotit naměřená data.

Seznam doporučené literatury:

BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ. Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.

KULKARNI, Pramod, Paul A. BARON a Klaus WILLEKE, ed. Aerosol measurement: Principles, Techniques, and Applications. 3rd. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-38741-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Atmosféra Země obsahuje kromě plynných složek také pevné a kapalné částice pocházející z různých zdrojů. Tyto částice jsou sledovány a zkoumány především díky svým environmentálním a zdravotním dopadům a pro jejich monitoring a měření je využíváno mnoho metod. Cílem rešeršní části této práce je přiblížit téma aerosolových částic, konkrétně jejich dělení, způsoby vzniku, uvést vliv těchto částic na životní prostředí a lidské zdraví a dále popsat měřicí přístroje používané k měření koncentrace jemných částic. Praktickou část této práce představuje měření koncentrace částic pomocí impaktoru, sledování koncentrací částic a dalších dat naměřených měřicí stanicí Brno-Arboretum, a také následné vyhodnocení naměřených i sledovaných dat. Za primární výstup ze skoro osmnáctidenního měření impaktorem je považována celková koncentrace všech zachycených částic $11,56 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Velikostní distribuce zachycených částic je vykreslena v grafu, stejně jako veličiny sledované ze stanice. Získaná data jsou v závěru porovnána a jsou uvedeny souvislosti tato data spojující.

Klíčová slova

Aerosolové částice, metody měření koncentrace částic, imisní monitoring

ABSTRACT

In addition to the gaseous components, the Earth's atmosphere contains solid and liquid particles from various sources. These particles are monitored and examined mainly due to their environmental and health impacts and many methods are used for their monitoring and measurement. The aim of the research part of this thesis is to bring the topic of aerosol particles, namely their division, the methods of formation closer, to indicate the impact of these particles on the environment and human health, and to further describe the measuring instruments used to measure the concentration of fine particles. The practical part of this work is the measurement of particle concentration using the impactor, the monitoring of particle concentrations and other data measured by the Brno-Arboretum measuring station, as well as the subsequent evaluation of the measured and monitored data. The primary output from the almost 18-day impactor measurement is considered to be the total concentration of all captured particles of $11.56 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. The size distribution of the captured particles is plotted in the graph, as well as the quantities monitored from the station. The data obtained is compared at the end and the links linking these data are given.

Key words

Aerosol particles, methods for measuring particle concentration, immissible monitoring

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KURUC, Jan. *Měření koncentrace částic v ovzduší různými metodami* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129569>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Tomáš Sitek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Měření koncentrace částic v ovzduší různými metodami** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Kuruc

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Tomáši Sitkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce, a také za trpělivost a ochotu, se kterými přistupoval k jejímu vedení.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Pevné částice v ovzduší.....	10
1.1 Dělení částic atmosférického aerosolu podle velikosti	10
1.2 Formy atmosférického aerosolu	11
1.3 Způsob vzniku atmosférického aerosolu.....	12
1.4 Zdroje atmosférického aerosolu	13
1.4.1 Přírodní zdroje primárního aerosolu.....	13
1.4.2 Antropogenní zdroje primárního aerosolu.....	17
1.4.3 Zdroje sekundárního aerosolu.....	21
1.5 Vliv atmosférického aerosolu na životní prostředí a klima.....	22
1.6 Vliv atmosférického aerosolu na zdraví člověka	24
2 Měření koncentrace pevných aerosolových částic v ovzduší	25
2.1 Legislativa týkající se monitoringu pevných částic v ovzduší	25
2.2 Metody měření koncentrace PM částic v ovzduší.....	27
2.2.1 Gravimetrická metoda	27
2.2.2 Radiometrická metoda	29
2.2.3 Metoda oscilačních mikrovah (TEOM).....	30
2.2.4 QCM	32
2.2.5 CAMM.....	34
2.2.6 APM.....	34
2.2.7 Optické měřicí metody	35
2.2.8 Metody využívané ČHMÚ k měření částic PM ₁₀ a PM _{2,5}	38
3 Praktická část	39
3.1 Popis měřicí aparatury impaktoru a postup měření.....	39
3.2 Gravimetrické stanovení hmotnostní koncentrace naměřených částic.....	41
3.3 Výsledky a vyhodnocení měření	43
ZÁVĚR	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	51
SEZNAM OBRÁZKŮ	52
SEZNAM TABULEK.....	53

ÚVOD

Atmosféra, jakožto plynný obal naší planety, je složena z běžně známých plynů, jako jsou dusík, kyslík, oxid uhličitý a další plyny. Nedílnou součástí atmosféry je také voda. Ta za běžných meteorologických podmínek zaujímá v atmosféře tři skupenství, a to pevné ve formě ledových částic, kapalné zastoupené vodními kapičkami a plynné v podobě vodní páry.

Dále však v atmosféře můžeme nalézt různé znečišťující příměsi především aerosolové povahy. Aerosol, který je obecně definován jako soustava částic pevného nebo kapalného skupenství rozptýlených v plynném prostředí, představuje tedy všechny pevné a kapalné částice vyskytující se v ovzduší Země. Původ těchto polutantů se rozlišuje dle zdroje, ze kterého dané látky pochází. Přírodním zdrojem těchto látek je sama příroda. Lesní požáry, eroze půdy, sopečné erupce a mnoho dalších procesů jsou příklady zdrojů především pevných částic. Mezi další typy těchto znečišťujících příměsí patří např. prachové částice, kosmický prach proniklý do atmosféry, malá semínka rostlin, pyl, výtrusy a další malé rostlinné části, dále bakterie a různé produkty rozkladu organických látek. Výrazný zdroj nežádoucích částic představuje také lidská činnost, jejíž přímé a nepřímé produkty jsou častou příčinou znečištění ovzduší. Mezi tyto činnosti patří například zemědělství, důlní a povrchová těžba, průmyslová činnost, doprava a také vytápění budov. Přítomnost těchto částic v ovzduší má nezpochybnitelný dopad na lidské zdraví. I díky tomuto faktoru se čím dál více zaměřujeme na měření a monitoring koncentrace pevných částic v ovzduší [1].

Tato práce je dle určených cílů rozdělena na dvě rešeršní části. První část je věnována přiblížení problematiky jemných částic v ovzduší. Popisuje jejich jednotlivé typy, rozdělení a zdroje. Také je zde vysvětlen dopad částic na životní prostředí a na lidské zdraví.

Druhá část je zaměřena na metody měření koncentrace pevných částic v ovzduší. Je v ní přiblížen postup měření nejvíce rozšířenými metodami, ale také i metodami méně používanými, jsou zde uvedeny popisy používaných aparatur a některé výhody a nevýhody jednotlivých metod.

Třetí část představuje experimentální měření hmotnostní koncentrace a velikostní distribuce aerosolových částic pomocí impaktoru a následným gravimetrickým stanovením hmotnosti. Součástí této praktické části je i sledování hodnot hmotnostní koncentrace frakcí částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ a dále meteorologických veličin, jako je atmosférický tlak, teplota a relativní vlhkost. Tyto údaje byly využity pro zpřesnění výsledných hodnot koncentrace při výpočtech, pro dokázání určité relevance naměřených dat a také pro porovnání.

1 Pevné částice v ovzduší

Jak bylo již zmíněno v úvodu, pevné částice nacházející se v zemské atmosféře tvoří spolu se vzduchem atmosférický aerosol. Tyto částice jsou předmětem zájmu člověka a to z několika důvodů. Zaprvé mají přímý dopad na zdraví člověka (viz podkapitola 1.6) a zadruhé taktéž ovlivňují několika způsoby stav našeho životního prostředí (viz podkapitola 1.5). Zejména proto se jedná o téma velice aktuální a také díky tomu se intenzivně věnujeme měření jejich koncentrace a monitoringu jejich vzniku. Vybraným metodám měření koncentrace částic se věnuje druhá kapitola [2].

Následující podkapitoly jsou zaměřeny na dělení, typy, původ pevných částic a další podrobné vlastnosti a informace potřebné k pochopení problematiky pevných částic a následnému měření jejich koncentrace v ovzduší. Největší pozornost je věnována samozřejmě pevným částicím, ale pro dodržení celistvosti informací a pro možnost problematiku dostatečně popsat a vysvětlit je zde zahrnuto částečně i obecné téma atmosférických aerosolů.

1.1 Dělení částic atmosférického aerosolu podle velikosti

Jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících chování aerosolu v atmosféře je velikost pevných částic v aerosolu obsažených. Za částice vytvářející ve vzduchu atmosférický aerosol se považují tuhé, kapalné nebo směsné částice o velikosti 1 nm–100 μm suspendované v atmosféře minimálně po dobu umožňující jejich detekci. Větší částice se vlivem gravitace usazují příliš rychle na to, aby byly považovány za aerosolové. Názvosloví z hlediska velikosti není zcela jednotné. Rozdělení dle velikosti částic se uplatňuje hojně např. ve zdravotnictví [1, 6].

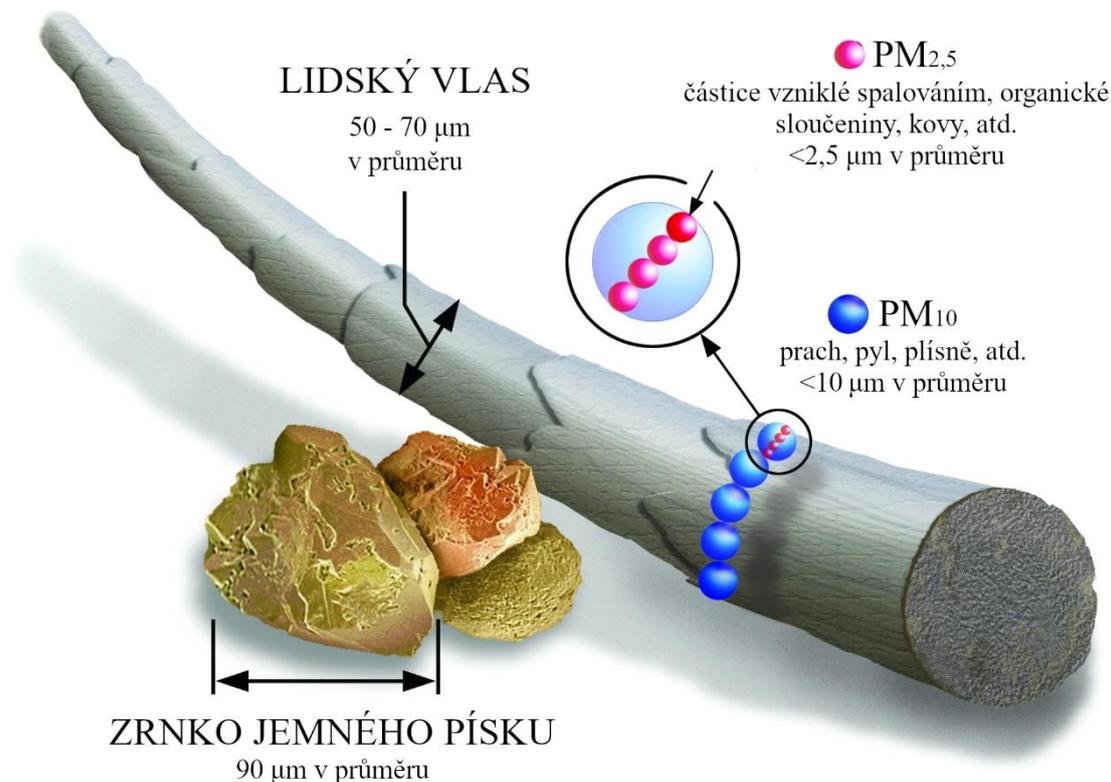
Pojem „pevné částice“ je odborně označován zkratkou PM (z anglického *particulate matter*) nebo také SPM (*suspended particulate matter*). Tato zkratka je také součástí zavedeného značícího systému, který je používán právě ve spojitosti se zdravotními dopady jednotlivých velikostních skupin částic na člověka. Začneme-li však od největších částic, můžeme se někdy setkat s pojmem TSP neboli „*total suspended particles*“, který označuje sumu všech částic atmosférického aerosolu o velikosti 1 nm–100 μm. Dalším podobným hromadným označením je termín „hrubé částice“ neboli „*coarse particles*“, který zahrnuje všechny částice o velikosti větší než 2,5 μm. Pro porovnání, nejmenší částice, jež můžeme jednoduše vidět lidským okem, jsou částice o velikosti cca 50 μm [1, 4].

Na výše uvedená obecnější rozdělení navazují skupiny pevných částic označovaných jako PM. Jak již bylo zmíněno, tento systém má původ ve zdravotnictví. Z hlediska zdravotního dopadu bylo definováno několik různých frakcí prachových částic (PM) označovaných obecně jako X. Tohle X představuje ve značícím systému index, za který je dosazena velikostní hranice dané frakce. Forma označení je tedy spojení zkratky PM a indexu X, tedy PM_X, kde za X je dosazena příslušná frakce prachových částic. Takto rozlišujeme 4 skupiny:

- PM₁₀ – částice o velikosti menší než 10 μm,
- PM_{2,5} – částice o velikosti menší než 2,5 μm, také označované jako jemné částice,
- PM₁ – částice o velikosti menší než 1 μm, také označované jako submikrometrové částice,
- PM_{0,1} – částice o velikosti menší než 0,1 μm, také označované jako ultrajemné částice (alternativní značení UFP – „*ultrafine particles*“) [3, 4].

Existují i další, méně používané, skupiny jako např. PM_{0,5} a PM₄. Poslední skupinou na pomyslné velikostní ose, se kterou se můžeme setkat, jsou tzv. nanočástice (značené jako NPs – z anglického „*nanoparticles*“).

Tato skupina zahrnuje všechny částice o velikosti menší než 100 nebo 50 nm – názvosloví není jednoznačné a ne vždy se navíc české shoduje s anglickým. Na obr. 1.1 lze vidět velikostní poměr částic PM_{2,5} a PM₁₀ se zrnkem písku a s lidským vlasem [3, 4].



Obr. 1.1 Částice PM_{2,5} a PM₁₀ v porovnání s lidským vlasem a se zrnkem písku [2].

1.2 Formy atmosférického aerosolu

Částice atmosférického aerosolu nejsou v atmosféře rozmístěny rovnoměrně. Jejich chování v atmosféře je nejvíce ovlivněno jejich velikostí, dále také tvarem a hustotou. Díky širokému rozsahu hodnot těchto tří faktorů může atmosférický aerosol nabývat různých forem a může zapříčinit vznik jevů spojených např. se změnami koncentrace aerosolových částic v ovzduší.

Přestože velká část částic je lidským okem neviditelná, jejich soubory mohou tvořit lehce viditelné a běžné atmosférické jevy. Částice atmosférického aerosolu s největší hustotou pravděpodobnosti výskytu v atmosféře mají velikost cca okolo 0,3 μm. Takhle velké částice jsou prostým okem nerozlišitelné. Nejmenší částice, které lze lidským okem jednoduše rozeznat, mají velikost větší než 50 μm [1].

Začneme od nejběžnějších jevů, které můžeme v atmosféře běžně spatřit. Aerosolové částice běžně vytvářejí soubory o různé koncentraci částic. Pokud v některém z těchto souborů vzroste koncentrace částic natolik, že se hustota vzniklého aerosolu rovná více než 1 % hustoty vzduchu ($\rho_{\text{vzduchu}} = 1,205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pro $T = 20^\circ \text{C}$ a $p_{\text{atm}} = 101\,325 \text{ Pa}$), jeví se soubor jako mrak nebo také oblak. Mraky a oblaky jsou na pohled rozlišitelné, mají zřetelně utvořené hranice a především se liší od řidšího aerosolu svými objemovými vlastnostmi [1].

Dalším běžně známým jevem je mlha. Jedná se o případ kapalného aerosolu, který vzniká kondenzací přesycených vodních par nebo atomizací kapaliny, což je zjednodušeně proces, kdy se větší množství kapaliny přeměňuje v kapky. Podobným jevem je tzv. opar, který má dopad především na viditelnost v atmosféře [1] [5].

Příkladem další skupiny aerosolových forem je dým a kouř. Od předchozích forem jsou odlišné svým vznikem. Pro vznik dýmu a kouře je potřeba určitého procesu, při kterém vznikají pevné nebo kapalné částice tvořící danou aerosolovou formu. Takovým procesem je například hoření. Dým představuje aerosol tvořený z pevných částic většinou menších než $0,05 \mu\text{m}$. Tyto částice jsou uskupeny do shluků nebo také řetězců tvořených aglomerací částic. Aglomerace je proces tzv. spojování částic, kdy se menší částice pojí ve větší celky. Tyto částice vznikají kondenzací par generovaných většinou při vysokoteplotních procesech. Kouř se od dýmu liší skupenstvím částic, které ho tvoří, protože obsahuje totiž kromě částic pevných také částice kapalné. Rozdílný je i způsob vzniku, jelikož kouř vzniká jako produkt nedokonalého spalování [1].

Běžně známým jevem je poléťavý prach. Jako prach se obecně označují soubory hrubých částic o velikosti větší než $0,6 \mu\text{m}$. Proces vzniku prachových částic je definován jako působení mechanických sil na pevnou hmotu povrchu Země. Dále se můžeme setkat s termíny sprej nebo tříšť, což jsou naopak soubory kapalných částic, které vznikly vlivem působení mechanických sil na kapalinu. Velmi často skloňovaným pojmem je také tzv. smog. Tato složenina vznikla spojením anglických slov „*smoke*“ – kouř a „*fog*“ – mlha. Smog je obecné označení viditelného znečištění atmosféry především v městských, obydlených a průmyslových oblastech. Méně známý je termín fotochemický smog. Aerosol tohoto typu obsahuje kapalné nebo pevné částice o velikosti $2 \mu\text{m}$ a menší, ale zásadní roli zde hraje spíše vznik ozonu jako produktu atmosférických chemických reakcí [1].

1.3 Způsob vzniku atmosférického aerosolu

Jeden ze základních a velice důležitých předmětů studia problematiky aerosolových a především pevných částic je původ těchto částic a s tím úzce spjaté zdroje, ze kterých se tyto částice dostávají do ovzduší. Zkoumání vzniku aerosolových částic je pro nás důležité, protože získávání informací o jejich vzniku nám umožňuje postupovat efektivněji např. při minimalizování jejich produkce lidskou činností. Lidská činnost totiž také představuje významný zdroj aerosolových částic, zejména pak těch pevných.

Hovoří-li se o původu aerosolových částic, je nutné si je v první řadě rozdělit zaprvé z hlediska způsobu vzniku a za druhé podle typu zdroje. Jako první se zaměříme na způsob vzniku atmosférického aerosolu.

Částice atmosférického aerosolu se do ovzduší dostávají několika způsoby. Proces vzniku atmosférického aerosolu se dle způsobu dělí na dva typy. První z nich je tzv. primární způsob vzniku. Tento způsob zahrnuje přímé emise částic z přírodních a antropogenních zdrojů. Částice této skupiny vznikají jako produkty zmíněných zdrojů a poté se dostávají do ovzduší. Přesným popisům mechanismů přenosu částic ze zdrojů do ovzduší se dále věnuje následující podkapitola [4].

Sekundární způsob vzniku aerosolů zahrnuje aerosoly vzniklé přímo ve vzduchu chemickými reakcemi plynných složek atmosféry – konkrétně sekundárními reakcemi plynných prekurzorů. Takovýmito běžnými reakcemi jsou například „*gas to particle conversion*“ – konverze plyn-částice nebo sekundární oxidace. Je však možné, že někdy i pevné částice nacházející se v atmosféře se navzájem mohou mísit a mohou vytvářet částice rozdílného složení. Na způsobu vzniku částic závisí také velikost vzniklé částice. Nejmenší částice, které vznikají v atmosféře, se pohybují v řádu nanometrů. Takto malé částice vznikají tzv. homogenní nukleací.

Tento termín označuje děj, při kterém se nově vzniklá částice vytváří přímo z plynné fáze. Takovéto částice se z hlediska velikosti pohybují v řádu jednotek nanometrů. Dále však mohou také růst, což se děje tzv. koagulací nebo již zmíněnou konverzí plyn-částice. Takto mohou dosahovat velikosti až stovek nanometrů [1, 4, 6].

1.4 Zdroje atmosférického aerosolu

Při popisování zdrojů částic atmosférického aerosolu uvažujeme zvlášť o částicích, které vznikají primárním způsobem a částicích, které vznikají sekundárním způsobem. Jejich zcela odlišný způsob vzniku se totiž odráží také v úplné odlišnosti typů zdrojů. Větší pozornost je věnována zdrojům primárně vznikajících částic, protože se jedná o proces přímé emise částic do ovzduší a existuje mnoho významných zdrojů primárního aerosolu. Naproti tomu zdrojem sekundárního aerosolu je aerosol primární, tudíž jeho původ je z velké části objasněn samotnou kapitolou věnovanou primárním aerosolům.

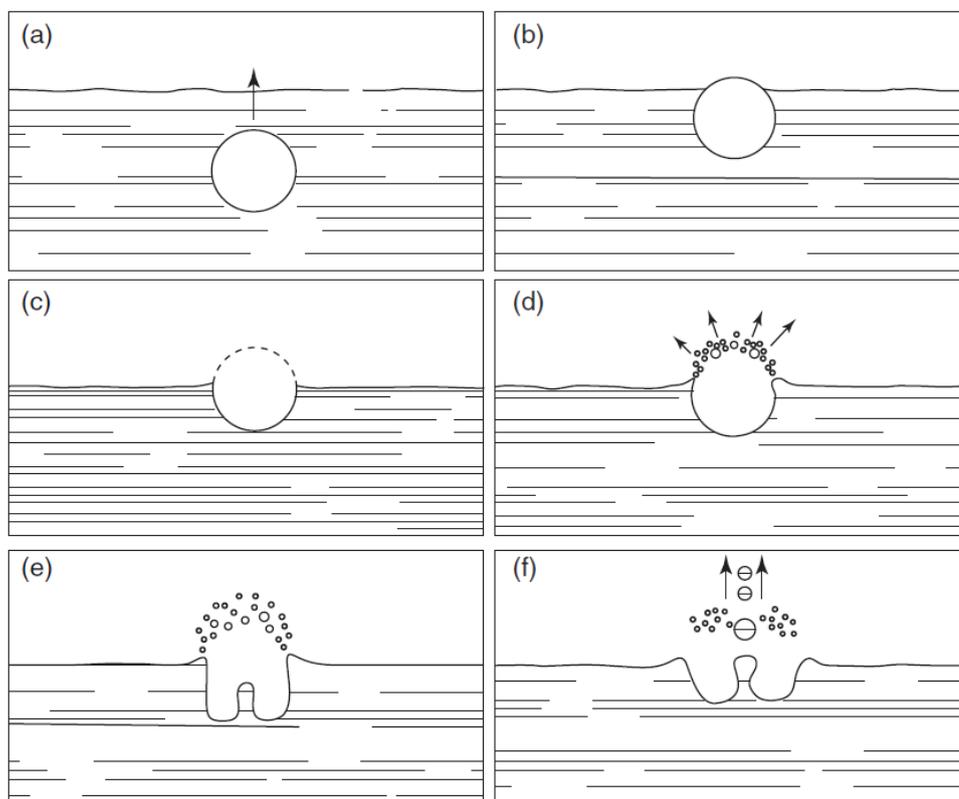
Částice, které jsou součástí primárních aerosolů, se do ovzduší dostávají přímou emisí ze svých zdrojů. Tyto zdroje se dělí na dvě hlavní skupiny, a to na zdroje přírodní a zdroje antropogenní. Následující dvě podkapitoly jsou postupně věnovány přírodním a antropogenním zdrojům atmosférického aerosolu s primárním zaměřením na pevné částice, stěžejní téma této práce.

1.4.1 Přírodní zdroje primárního aerosolu

Definice přírodních zdrojů aerosolových částic je jednoduchá. Jedná se o všechny aerosolové částice, které se do ovzduší dostávají přirozeně vlivem přírodních procesů. Z celosvětového hlediska přírodní zdroje dominují v produkci aerosolových částic emitovaných do ovzduší. Přestože je velice obtížné vytvořit odhady globální koncentrace částic z jednotlivých zdrojů, natož pak celkově, M. O. Andreae a D. Rosenfeld v roce 2008 vytvořili odhad předpokládající celkový průměrný tok aerosolových částic z přírodních zdrojů v rozmezí 4200–22 800 Tg ročně.

Významně se na této statistice podílí mořská sůl. Přibližně 75 % zemského povrchu je tvořeno vodní plochou obsahující mořskou sůl. Částice mořské soli, které se dostávají do ovzduší z mořské vody, mají dvě formy. První formou jsou tzv. tryskové kapky, které jsou složeny z jádra tvořeného solankou – slanou mořskou vodou. Hlavními prvky obsaženými v této vodě jsou sodík a chlor, což jsou prvky tvořící chlorid sodný – kamennou sůl. Toto jádro je obklopeno organickým filmem. Tryskové kapky vznikají srážkami vln a jinými mechanickými procesy, které nastávají především na hladině mořské vody [6, 7].

Druhou formou částic mořské soli, tvořící aerosolové částice, jsou tzv. filmové kapky. Ty jsou na rozdíl od tryskových převážně organické a jsou vytvářeny „jemnějšími“ mechanickými procesy mořské vody, jako je například praskání bublin na mořské hladině a jiné. Například takové kapky pocházející z praskajících bublin dosahují velikosti cca od 0,1 do 1 μm . Schéma vzniku tryskových a filmových kapek při praskání bublin na mořské hladině je podrobněji popsáno na obr. 1.2 a v příloženém popisku. Částice mořské soli a solanky jsou druhou největší skupinou částic obsažených v troposféře z hlediska hmotnostního obsahu částic. Už několik desetiletí se provádí měření a z něj vyplývající odhady emisí aerosolových částic do ovzduší. Také pro emise částic mořské soli bylo v průběhu let provedeno několik takových odhadů. Jedním z nich je odhad M. O. Andreae a D. Rosenfelda z roku 2008, kde odhadují roční průměrný globální emisní tok částic mořské soli v rozmezí od $3 \cdot 10^3$ do $2 \cdot 10^4$ Tg ročně [6, 7].



Obr. 1.2 Schéma vzniku tryskových a filmových kapek při prasknutí vzduchové bubliny [7].

Obrázek 1.2 začíná situací a), kde lze vidět bublinu mořského vzduchu, která se dostává k mořské hladině. Fáze b) představuje situaci, kdy se bublina nachází na úrovni mořské hladiny. Ve fázi c) lze pozorovat počátek narušení souvislosti filmu mořské vody. Situace na obrázku d) představuje tvorbu kapky o průměru $\sim 5\text{--}30\ \mu\text{m}$ po prasknutí filmu bubliny. Ve fázi e) se filmové kapky začínají odpařovat a zanechávají částice mořské soli ve vzduchu. Poslední situace f) zahrnuje odtržení 1–5 velkých kapek (o velikosti 15% průměru původní bubliny) od paprsku vytvořeného na hladině během prasknutí bubliny; čas mezi fázemi a) a f) je $\sim 2\ \text{ms}$.

Co se velikostního rozsahu částic mořské soli týče, zaujímá tato skupina velikosti od $0,05\ \mu\text{m}$ do $10\ \mu\text{m}$. Z tohoto rozmezí jsou zde zastoupeny spíše ty menší částice, protože největší kapičky (především tryskové) padají rychleji zpět na mořskou hladinu a svým dopadem vytvářejí kapičky menší. Z tohoto důvodu se tyto menší, především filmové kapky, zdržují v atmosféře dostatečně dlouho k tomu, aby byly detekovatelné ve větších koncentracích [7].

Dalším významným přirozeným zdrojem částic primárního aerosolu je půdní nebo také tzv. minerální prach. Ten se dostává do ovzduší působením větru v pouštních, suchých a polosuchých oblastech. Mezi hlavní regiony mobilizace půdního prachu patří saharská poušť, řetězec suchých oblastí táhnoucí se nad severní Afrikou, jihoafrické suché oblasti, pouště na Středním východě, v Asii a Jižní Americe. Zdrojem půdního prachu jsou také dna některých vyschlých jezer a přírodních rezervoárů. Jako oblasti původu půdního prachu jsou označovány i okraje polopouští a oblasti suché půdy, kde byla vegetace výrazně narušena lidskou činností (získávání půdy pro zemědělství, obytné plochy atd.). Proto se tyto zdroje z hlediska zařazení často řadí ke zdrojům antropogenním. Ke snížení uvolňování půdního prachu přispívá krustování povrchů půdy, které omezuje dostupnost potenciálně uvolněných částic. [7]

Půdní prach je zástupcem pevných aerosolových částic a je složen především z minerálních materiálů. Jedná se konkrétně o zrnka písku, malé částice půdy, minerálů a hornin. Odhady ročního emisního toku minerálního/půdního prachu vyprodukovaného v globálním měřítku se pohybují od 10^3 do $5 \cdot 10^3$ Tg ročně. Tento odhad řadí půdní prach na první místo v žebříčku skupin částic obsažených v ovzduší. Emitované částice mají svůj původ většinou v již zmíněných oblastech, nicméně jsou dominantním typem částic aerosolu i v oblastech, kde se žádné výrazné zdroje nenacházejí. Částice jako např. pouštní prach totiž mohou být větrem unášeny i tisíce kilometrů od svého zdroje. Příkladem takového přenosu je např. tzv. oranžový sníh, který v zimě roku 2021 napadl na více místech střední Evropy včetně ČR. Tento sníh získal své zbarvení díky obsaženému písku ze Sahary. [6, 7, 8]

Typickým přírodním zdrojem PM v ovzduší je také tzv. bioaerosol. Jedná se o skupinu opět především pevných částic, které mají např. rostlinný nebo živočišný původ. Zahrnuje typy částic od rostlinných částí (fragmenty listů, stonků, atd.), mikrobiálních částic jako jsou například živé a mrtvé viry, bakteriální buňky, spory, pyly, řasy, semena, atd.). Dále do této skupiny spadají mrtvá těla hmyzu, huminové látky – látky vznikající rozkladem rostlinných zbytků a kousky zvířecích kůží [6, 7].

Také díky svému velmi odlišnému původu mají aerosolové částice biologického původu širokou škálu tvarů a pokrývají široký rozsah velikostí od méně než $0,1 \mu\text{m}$ do nejméně $250 \mu\text{m}$. Vzhledem k široké variabilitě zdrojů se koncentrace biogenních aerosolových částic blíží 1 % celkové aerosolové koncentrace v oceánských oblastech. Co se aerosolu v oblasti pevniny týče, může dle odhadů bioaerosol představovat 2-3 % celkové koncentrace částic. Fakt, že frekvencovanost zdrojů vysoce ovlivňuje koncentraci daných částic v jednotlivých oblastech, dokazuje také tvrzení, že částice bioaerosolu v oblasti Amazonie mohou tvořit až 35 % z celkové koncentrace aerosolových částic. Koncentrace hustoty bioaerosolových částic se také liší vzhledem k ročním obdobím a nadmořské výšce. Navíc biogenní aerosoly mají vzhledem ke svému původu často značně nižší hustotu, díky níž mohou být vzduchem unášeny na velmi dlouhé vzdálenosti. Jaenicke (2005) ve své publikaci odhaduje, že globální emisní tok z biosférických zdrojů je přibližně 1000 Tg ročně pro primární aerosoly [6, 7].

Mezi zástupce přírodních zdrojů atmosférického aerosolu se řadí také kouř vznikající při lesních požárech. Běžně používaným ustáleným slovním spojením pro tento typ aerosolu je „*forest fire smoke*“. Kouř je emitován do ovzduší ze spalované biomasy (stromů, keřů, savanové trávy, dalšího lesního porostu a jiné vegetace). Mezi oblasti s častými masivními požáry vegetace patří např. lesnaté oblasti Sibíře, Severní Ameriky, Austrálie. V Evropě patří mezi oblasti nejčastěji zasažené přírodními požáry jižní části kontinentu jako např. určité oblasti Španělska a Portugalska. Během australských lesních požárů v období od srpna 2019 do ledna 2020 shořelo více než 12,6 milionů hektarů plochy a odhaduje se, že během těchto požárů bylo do ovzduší emitováno zhruba 434 milionů tun CO_2 [7, 9].

Emise z hořící vegetace obsahuje především elementární uhlík (EC – „*elementary carbon*“) a organický uhlík (OC – „*organical carbon*“) a další látky. Pevné uhlíkaté částice vznikající spalováním se souhrnně označují jako saze. Elementární uhlík je také nazýván tzv. volným uhlíkem, grafitem nebo také černým uhlíkem. Jde o látku, která má schopnost silně absorbovat sluneční záření celého viditelného rozsahu vlnových délek, tudíž jeho zvýšená přítomnost v ovzduší určitých oblastí může znamenat např. zhoršenou viditelnost [7].

Aerosoly emitované z lesních požárů jsou tvořeny především ze submikrometrových částic (nejčastěji částice o velikosti cca $0,1 \mu\text{m}$) a obsahují poměrně vysokou koncentraci elementárního uhlíku. Dopad emisí ze spalování biomasy na klima a zdraví člověka nelze popírat. Většina těchto částic emitovaných do ovzduší totiž zaujímá ve skupině submikrometrových částic menší hodnoty – vysoká koncentrace částic menších než $0,2 \mu\text{m}$. Další početnou skupinou jsou částice v rozmezí $0,2\text{--}1 \mu\text{m}$, dále už pouze malé procento částic větších než $1 \mu\text{m}$

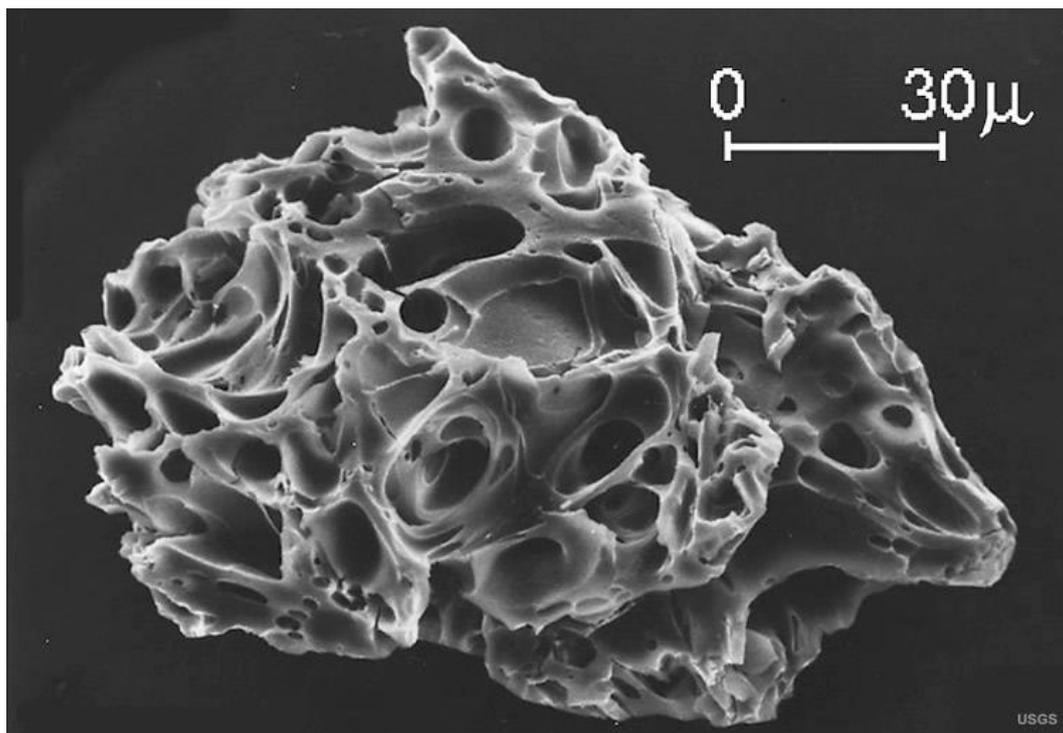
a pouze stopové množství částic větších než 2 μm . To znamená, že velká část kouřových částic může snadno pronikat do dýchacích cest člověka a může způsobovat různé zdravotní problémy (viz. podkapitola 1.6) [7].

Mezi přírodními zdroji atmosférického aerosolu má své nezpochybnitelné místo také sopečná a vulkanická činnost. Sopky emitují během svých erupcí do troposféry (nejnižší vrstva atmosféry v rozmezí cca 8 – 18 km od Země; závisí na zeměpisné šířce) pevné částice i plyny. Průměrný roční odhad emisního toku vulkanického aerosolu Andraeho z roku 1995, který souhlasil s několika dalšími odhady z dřívějších let, se rovná ~ 33 Tg za rok. Hlavním produktem sopečné činnosti je vedle řady plynů především tzv. sopečný prach a také sopečný popel. Co se obsažených částic týče, představuje sopečný prach a popel zjednodušeně směs kamenných a minerálních částic vyloučených ze sopky během sopečné erupce. Z hlediska velikosti vulkanický popel označuje částice o velikosti od 0,063 mm do 2 mm. Vulkanický prach pak zahrnuje částice menší než 0,063 mm. Většina částic sopečného prachu spadá do menších velikostních skupin jako např. submikrometrové nebo ultrajemné částice [7, 10, 11].

Snímky částic vulkanického popela různých velikostí ze vzorků odebraného z oblaku emitovaného sopkou Eyjafjallajökull v dubnu 2010 týmem Schumanna dokazují přítomnost křemičitanů a smíšených částic o velikosti nižší než 500 nm. Tento typ částic tvořil největší skupinu pevných částic obsažených v oblaku emitovaném ze sopky. Ve stejné velikostní skupině, tedy <500 nm, byla ve vzorcích aerosolu zjištěna také vysoká koncentrace síry. Síra se v sopečném prachu účastní chemických reakcí, což znamená, že značná část částic z této velikostní kategorie vzniká i sekundárním způsobem. Takto vznikajícími sloučeninami jsou např. síran amonný a také některé dusičnany. Mezi aerosolovými částicemi odebranými při měření Schumannovým týmem byly také malé kapky kyseliny sírové a minerální aglomeráty – jednoduše směsi více druhů hornin nebo minerálů [7].

Doba setrvání v atmosféře částic emitovaných vulkány do ovzduší se liší dle velikosti a hustoty. Menší částice sopečného prachu (o velikosti < 1 μm), tvořící často tzv. vulkanické mraky, mohou setrvat v atmosféře několik dnů až týdnů, což je ale obecně považováno za kratší dobu pobytu. Oproti tomu větší částice sopečného prachu a popela, který je složen z částic v rozmezí od 0,3 do 30 μm , zůstávají v atmosféře pouze krátkou dobu od několika hodin do cca 2 dnů. Přestože částice vulkanického prachu a popílku nesetrvávají v atmosféře dlouhou dobu, díky svému velmi členitému, zubatému povrchu (jak je zachyceno na snímku na obr. 1.3) a převážné malé velikosti, tedy i nízké hmotnosti, však mohou být vzduchem lehce unášeny a mohou tak urazit velké vzdálenosti od svého zdroje [7].

Kosmický prach sice není produktem zdrojů pocházející z planety Země, ale protože se kosmický prostor minimálně z tohoto hlediska považuje za přírodní, řadíme také kosmický prach mezi přírodní zdroje aerosolových částic. Kosmický prach jsou malé částice o velikosti od několika molekul až do zrn měřících 0,1 μm a jsou také nazývány jako mikrometeoroidy. Částice větší než 0,1 μm se pak nazývají meteoroidy. Zdrojem tohoto prachu jsou větší meteoroidy, komety, asteroidy (planetky), planety, jejich měsíce a prstence, mezihvězdný prach a jiná kosmická tělesa. Kosmický prach se dostává do atmosféry Země z kosmického prostoru nepřetržitě při tom, jak se naše planeta pohybuje kosmickým prostorem a přitahuje tato vesmírná tělíska svojí gravitací. Také se může stát, že větší kosmická tělesa, která proniknou do atmosféry Země, zde při průletu shoří a rozptýlí se na menší částice, které dopadají na zemský povrch nebo nějakou dobu setrvávají v atmosféře [7, 12].



Obr. 1.3 Snímek částice vulkanického prachu z elektronového mikroskopu zachycující výraznou členitost povrchu těchto částic [11].

Doba setrvání těchto částic v atmosféře závisí na jejich velikosti. Menší částice opět setrvávají v atmosféře delší dobu, zatímco částice velikosti až menších kamínků dopadají na povrch Země. Na základě měření, které roku 2012 uskutečnil vesmírný detektor prachu Plane, se odhaduje, že denní hmotnostní tok prachových částic vstupujících do atmosféry Země se pohybuje od 100 do 300 tun. Jiným způsobem provedené měření z oblasti střední atmosféry¹ dalo za vznik odhadům této hodnoty na 5–50 tun denně. Gardner a kol. (2014) po zhodnocení více zdrojů vytvořili odhad ročního průměrného globálního toku kosmického prachu vstupujícího do zemské atmosféry rovnající se $2 \cdot 10^{-2}$ Tg za rok [7, 12].

V atmosféře se zajisté nachází i další typy částic přírodního původu, ale nemají už zdaleka takový dopad, protože jejich koncentrace je velmi nízká až zanedbatelná. Tudíž byla pozornost věnována hlavně těm stěžejním přírodním zdrojům, které svojí přítomností ovlivňují děje v atmosféře, klima, životní prostředí a také zdraví lidí.

1.4.2 Antropogenní zdroje primárního aerosolu

Lidská činnost často dává vzniknout několika druhům jemných částic, které se poté dostávají do ovzduší Země. Částice z přírodních zdrojů dle měření a odhadů tvoří větší část částic obsažených v atmosféře. Vzhledem k tomu, že přírodní zdroje jako oceány, suché oblasti, vulkány atd. z pohledu plochy zabírají velkou část planety, je pochopitelné, že emise z těchto zdrojů jsou vysoké. I přes to se lidská činnost významně podílí na koncentraci jemných částic

¹ střední atmosféra je termín popisující oblast od troposféry až k výšce cca 110 km (oblast tzv. homopauzy) [25].

v ovzduší, především v troposféře. Antropogenní aerosoly představují více než 10 % z celkové hmotnosti aerosolových částic obsažených v troposféře, což je při porovnání s velice výraznými emisemi částic z přírodních zdrojů, poměrně vysoká hodnota. Globální hmotnostní tok antropogenních částic do zemské atmosféry tvoří pak ~ 20 % globálního hmotnostního toku částic přírodních [7].

Antropogenní emise aerosolů vznikají primárně ze čtyř hlavních kategorií zdrojů: a) spalování paliv, b) průmyslové procesy, c) neprůmyslové zdroje (prach ze zpevněných a nezpevněných vozovek, větrná eroze zemědělské orné půdy, stavebnictví, spalování odpadu, atd.), d) různé druhy dopravy a přepravy – automobily, letadla, lodě a další vozidla. Obsah antropogenních aerosolů je rozmanitý, mezi nejčastěji zastoupené složky patří sírany, amonium, dusičnany, stopové kovy a vodu. Dále je zde možné nalézt uhlíkaté materiály, jako EC (elementární uhlík) a OC (organický uhlík). EC se do ovzduší dostávají především díky spalovacím procesům a OC také buď přímými emisemi nebo vzniká sekundárním způsobem vzniku [7].

Významným zástupcem antropogenního aerosolu je skupina částic nazývaná „průmyslový prach“. Jsou zde zahrnuty částice vytvořené lidskou činností, jako: a) prach vytvořený dopravou a prach ze silnic a vozovek, b) spalování uhlí a paliv během průmyslových procesů, c) výroba cementu, d) metalurgie, e) spalování odpadu a další činnosti. Do této skupiny se v některých případech také uvažuje i větrná eroze obdělávané půdy. Na tento proces totiž lze nahlížet ze dvou úhlů pohledu. Jak bylo zmíněno v podkapitole věnující se přírodním aerosolům, zvíření půdního prachu z oblastí, kde byla odstraněna vegetace, se považuje za přírodní zdroj, protože jde o přírodní materiál emitovaný do ovzduší přírodní silou – větrem. Druhý úhel pohledu zastává názor, který tvrdí, že tento děj zvíření půdního prachu by nebyl možný, kdyby dané oblasti nebyly zbaveny vegetace lidskou činností. Co se týče velikosti, mohou částice průmyslového prachu nabývat velice široké velikostní škály vzhledem ke svému rozmanitému původu a jsou tedy běžnými zástupci prakticky ve všech velikostních kategoriích [7].

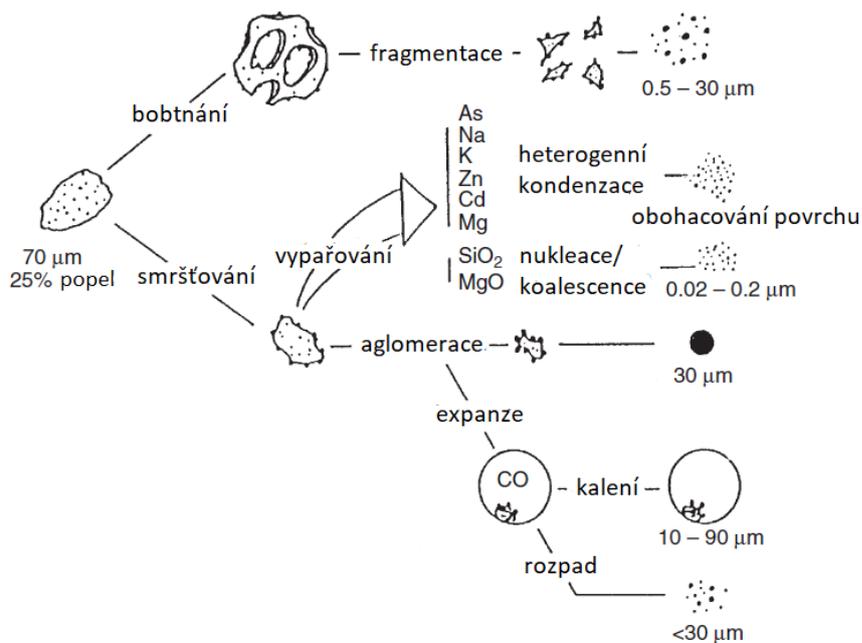
Průmyslový prach je běžně ve vyspělých zemích široce monitorován a následně regulován, což znamená, že dopad fugitivních² emisí průmyslového prachu na klima a životní prostředí je omezený. Fugitivní zdroje prachu jsou výraznější ve venkovských oblastech. Určitý, i když relativně nižší, podíl má na emise průmyslového prachu např. unášení prachu ze zpevněných a nezpevněných vozovek komunikací, zemědělská činnost, pozemní stavitelství, požáry atd. V průběhu dvacátého století tvořily emise antropogenních částic pouze malý zlomek při porovnání s celkovou hmotností částic emitovaných z přírodních zdrojů. S rostoucí populací a narůstajícím technickým pokrokem se výrazně zvýšila také průmyslová i neprůmyslová činnost. To vše vedlo také k výraznému zvýšení emisí prachu z těchto zdrojů. V současné době jsou výše uvedené typy zdrojů aerosolových částic odpovědné za nejvýraznější dopad antropogenních aerosolů na životní prostředí. Hlavně v Severní Americe a Evropě se proto v posledních 20 letech výrazně zvýšila míra monitoringu a regulace těchto emisí, což vedlo ke zlepšení kvality ovzduší v těchto částech planety. Oproti tomu v oblastech, kde posledních až 50 let rostla industrializace bez přísnějších emisních opatření a kontrol, antropogenní emise výrazně vzrostly. Příkladem tohoto průběhu jsou například určité oblasti Asie. Odhaduje se, že růst industrializace v tomto měřítku by mohl vést k výraznému zvýšení emisního toku průmyslového prachu a to tak, že předpokládaný globální tok těchto částic by mohl v roce 2040 dosáhnout

² fugitivní emise = emise znečišťujících látek, u kterých měřením nelze přesněji zjistit všechny potřebné veličiny určené k výpočtu hmotnostního toku.

hodnoty 300 Tg ročně. Pro porovnání, průměrný globální hmotnostní tok průmyslového prachu odhadovaný Andreaem a Rosenfeldem pro rok 2008 uvádí rozmezí 40–130 Tg za rok. Dle hodnot Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) pro rok 2017 tvořily v ČR částice průmyslového prachu cca 24,3 % celkových ročních emisí částic PM₁₀ a cca 9,2 % celkových ročních emisí částic PM_{2,5} [7, 16].

Další kategorií antropogenních aerosolů, která představuje velký zlomek z celkového množství antropogenních aerosolů emitovaných do ovzduší Země, jsou aerosolové částice vznikající při spalování fosilních paliv (ropa, uhlí, zemní plyn). Do této skupiny se řadí také jiné uhlíkaté částice sazí z různých typů spálených paliv mimo biopaliva a mimo spalování paliv v průmyslu, což patří do průmyslového prachu. Aerosoly emitované ze spálených fosilních paliv tvoří výraznou složku antropogenního aerosolu. Při současném růstu spotřeby fosilních paliv se předpokládá, že v roce 2040 by tyto emise mohly být až dvojnásobné [7].

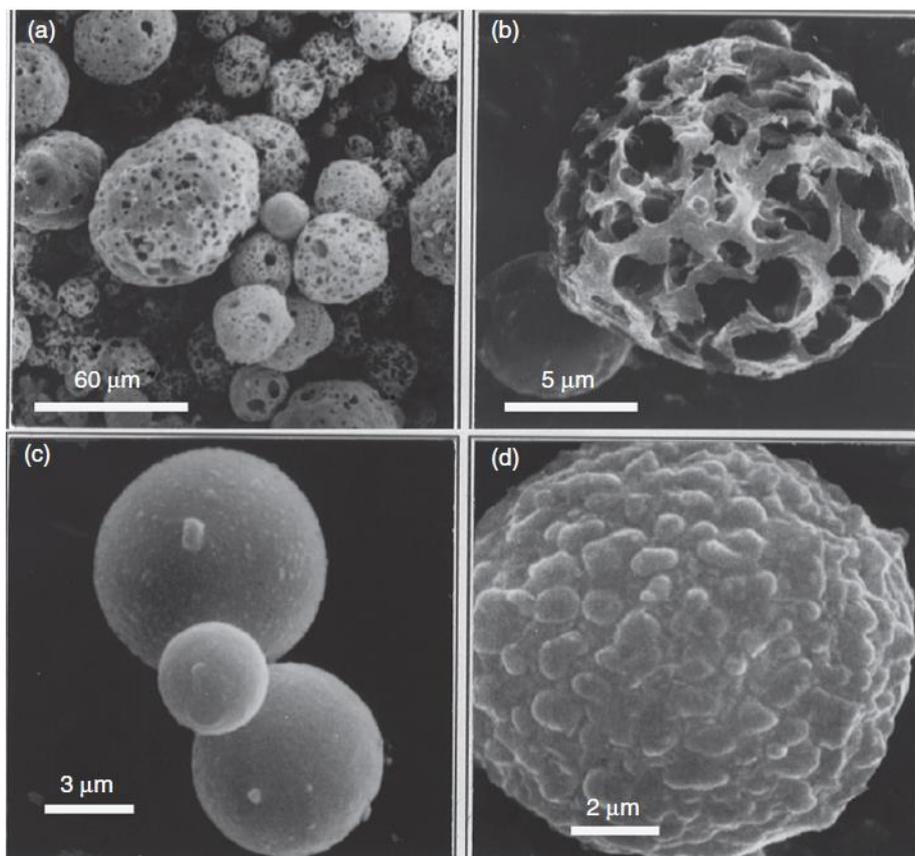
Spalování paliv, které obsahují částice uhlíku, vede ke vzniku již zmíněných částic EC (elementárního uhlíku), dalších částečně spálených palivových složek a jiných produktů vznikajících při vysokoteplotních reakcích. Částice EC vzniklé tímto způsobem a následně emitované do ovzduší jsou na velikostní škále většinou pod hodnotou 2 μm. Je však běžné, že se ihned po jejich emitování srážejí – agregují. Agregace je proces, kdy se volné částice spojují ve větší celky. Proces vzniku částic při spalování fosilních paliv je velice rozmanitý a liší se dle typu paliva. Hlavně u pevných fosilních paliv zaznamenáváme širokou variaci způsobů vzniku především pevných částic různých velikostí, tvarů a různého složení. Příkladem je četnost fyzikálně-chemických dějů probíhajících při spalování práškového uhlí, které je samo o sobě velmi komplexní a jeho vysvětlování a popis spadá mimo zaměření této práce. Na obr. 1.4 jsou znázorněny procesy, které mohou probíhat při spalování částice práškového uhlí a také je zde vidět velikostní rozmezí vzniklých částic. Jednotlivé fáze a děje, které mohou nastat, jsou zde představeny na částici práškového uhlí o velikosti 70 μm. Je běžné, že se při vysokoteplotních procesech spalování především tuhých paliv tvoří velké množství plynných látek a ve značné míře zde také vznikají částice sekundárním způsobem [7].



Obr. 1.4 Schéma fyzikálně-chemických procesů, které mohou nastat při spalování částice práškového uhlí [7].

Analýzy provedené na vzorcích z elektráren spalujících uhlí, topné oleje a destilovanou naftu dokazují, že částice vzniklé spalováním topných olejů jsou velmi často sférického tvaru a houbovitě struktury s častými vnitřními dutinami, jak lze vidět na obr. 1.5 – snímky a) a b). Tyto částice s běžným obsahem sodíku, vanadu, hliníku, hořčíku a dalších prvků se nacházejí ve velikostní skupině okolo 0,01–50 μm . Částice polévatého popílku emitované při spalování uhlí často obsahují sklovité hlinitokřemičitany (živce) různého složení, uhlikaté látky, sférické kovové částice obsahující různé fáze oxidu železa, sférické rutilové a vápenné částice. Tyto částice jsou většinou sférického tvaru a jsou vyobrazeny na obr. 1.5 – snímek c). Pro částice vznikající spalováním destilované nafty, používané především v menších topných jednotkách, platí, že zaujímají většinou různé typy tvarů od nepravidelných přes zaoblené, sférické, sférické s kruhovými póry nebo hladké a sférické složené z aglomerovaných částic, jak lze pozorovat na obr. 1.5 – snímek d) [7].

Zatížení atmosféry, které vytváří spalování fosilních paliv, je velmi těžce určitelné a opět vychází z odhadů založených na měřeních koncentrace těchto látek v určitých oblastech. Odhaduje se, že celkové průměrné roční emise OC (organického uhlíku) kolísají v rozmezí 15–80 Tg ročně. Příspěvek vzniklý spalováním fosilních paliv tvoří přibližně 7 % z celkového množství částic. V České republice dle dat ČHMÚ pro rok 2017 tvořily částice vzniklé při vytápění domácností, veřejné výrobě tepla a provozu vozidel (kde značná část využívá spalování fosilních paliv) cca 60,6 % celkových ročních emisí částic PM_{10} a cca 74,3 % celkových ročních emisí částic $\text{PM}_{2,5}$ [7, 16].



Obr. 1.5 Částice vzniklé spalováním fosilních paliv nasnímané elektronovým mikroskopem.

Částice vzniklé při spalování:

a), b) topného oleje; c) uhlí; d) destilovaného nafty [7].

Poslední skupina antropogenních aerosolů, které je věnována pozornost, je skupina shrnující částice vzniklé spalováním biomasy a odpadu. Do této skupiny se řadí převážně spalování biopaliv, zemědělské požáry a nekontrolované požáry biomasy. Ve srovnání s řízeným technologickým spalováním fosilních paliv, kde jsou produktem z velké části čisté saze, vzniká při výše zmíněných procesech širší spektrum uhlíkatých částic. Množství studií z posledních let prokázalo, že zemědělské požáry seriózně ovlivňují složení atmosféry a výrazně ovlivňují kvalitu ovzduší a regionální i globální stav klimatu. Mezi hlavní typy částic vznikajících při spalování biomasy a odpadu patří mimo sazí také množství organických i anorganických složek. Příkladem je např. přítomnost anorganických solných složek v organických částicích.

Běžným typem částic pro tuto skupinu zdrojů jsou také tzv. dehtové kuličky, které jsou oproti jednotlivým částicím sazí větší. Jsou složeny nejen z uhlíku a kyslíku, ale lze v nich někdy pozorovat i dusík a stopové množství síry, křemičitanů a dalších prvků. Z pohledu obsahu této kategorie částic v atmosféře je úmyslné spalování biomasy hlavním zdrojem částic atmosférického aerosolu vzniklých spalováním. Velká část těchto spalovacích činností se odehrává v tropických oblastech, kde jde především o emise z nekontrolovaných procesů spalování vegetace. Úmyslné spalování biomasy (dřeva, zemědělského odpadu,..) spolu s úmyslnými lesními požáry představuje odhadovanou produkci cca 40 % z celkových globálních emisí uhlíkatých částic. Celkové roční emise ze spalování biomasy se odhadují na 45–80 Tg ročně (IPCC, 2001). Procesy spalování představují výrazný zdroj BC („black carbon“ neboli „černý uhlík“), což je prakticky označení pro již zmiňovaný EC (elementární uhlík) vzniklý při spalování biomasy a biopaliv. Tento typ uhlíkatých částic spadá z pohledu velikosti do submikrometrové skupiny částic atmosférického aerosolu [7].

Existuje ještě řada antropogenních zdrojů aerosolových částic, které nebyly zmíněny především proto, že svojí produkcí částic nemají takový dopad v porovnání s těmi zmíněnými. Výše zmíněné skupiny patří mezi nejvýraznější antropogenní zdroje, které je dle mého názoru nutné zmínit, což dokazuje i pozornost jim věnovaná z hlediska jejich monitoringu a regulace.

1.4.3 Zdroje sekundárního aerosolu

V kapitole pojednávající o způsobech vzniku atmosférického aerosolu je vysvětleno, že částice sekundárního atmosférického aerosolu vznikají několika druhy mechanismů a procesů, především chemickou reakcí plynných složek nacházejících se v atmosféře. Aby tyto děje mohly proběhnout a částice sekundárního aerosolu mohly vzniknout, je zapotřebí vstupních materiálů. Vzhledem k faktu, že tyto procesy probíhají přímo v atmosféře, tudíž nejsou produkty přímé emise ze zdrojů, to znamená, že za zdroje sekundárního aerosolu jsou považovány částice aerosolu primárního. Ty totiž představují onen zmíněný vstupní materiál. Příkladem jednoduchého mechanismu, který může být považován za sekundární způsob vzniku, je časté mísení částic minerálního prachu s částicemi mořské soli při pohybu v atmosféře, které zapříčiňuje rozdílné složení výsledného aerosolu [1, 7].

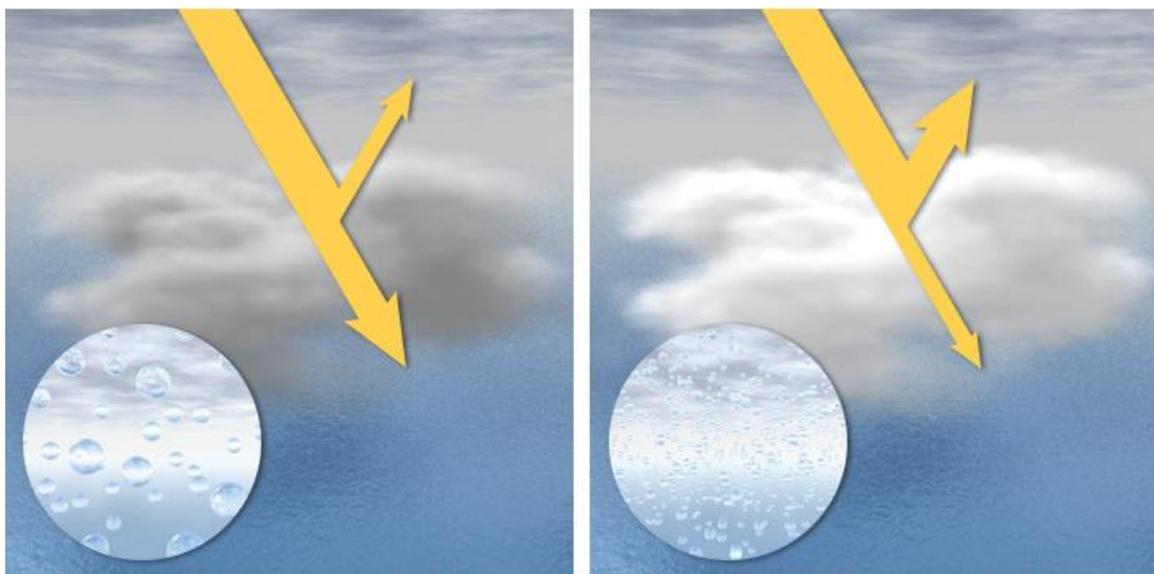
Za nejvýznamnější zdroj sekundárního aerosolu jsou považovány plynné složky atmosféry, které mohou reagovat s pevnými či kapalnými částicemi nebo s ostatními plyny obsaženými v atmosféře buďto přirozeně nebo z určitého přírodního či antropogenního zdroje. V tomto případě se již jedná o složitější procesy, při kterých mohou vznikat částice o velice rozdílných fyzikálně-chemických vlastnostech v porovnání s částicemi do reakce vstupujícími. Pro úplné pochopení vzniku sekundárního aerosolu je nutná široká znalost chemických reakcí probíhajících v atmosféře a další množství informací s tím spojených. Dále je tato problematika také velice úzce spjata s tématem plynných polutantů atmosféry, které nespadá do tematického okruhu této práce. Proto je tato podkapitola považována pouze za informativní a není podrobně rozvedena a popsána.

1.5 Vliv atmosférického aerosolu na životní prostředí a klima

Vzhledem k množství jemných částic vyskytujících se v ovzduší Země není vůbec překvapivé, že jejich přítomnost má nepochybný dopad na naše životní prostředí a stav podnebí Země. Dopad aerosolu na klima se dle typu účinku dělí na účinky přímo a nepřímo ovlivňující. Jedná se o škálu složitých procesů, které nejsou vždy úplně objasněny a jejichž studiu se lidstvo aktivně věnuje. V prvním případě, tedy při přímých účincích atmosférického aerosolu na klima, se jedná například o problém absorpce a rozptylu slunečního světla. Všechny aerosolové částice mohou svojí přítomností v atmosféře rozptylovat (krátkovlnné) sluneční záření a také dlouhovlnné záření, které je emitováno ze zemského povrchu. Mezi částice s výraznou schopností odrazu záření patří hlavně čisté sírany a dusičnany, které odrážejí téměř veškeré záření. Některé typy částic mohou záření i absorbovat. Mezi ty patří hlavně částice BC (černého uhlíku), ale také i částice OC (organického uhlíku) a částice minerálního prachu mající absorpční vlastnosti. Absorpce a reflexe záření mohou být kombinovány u částic, které vznikly smíšením různých druhů částic. Minerální prach může být např. obalen černým uhlíkem a tím pádem záření částečně odráží i pohlcuje [13].

Země vstřebáním solární energie zahřívá svůj povrch a emituje část energie zpět ve formě dlouhovlnného záření – infračervených paprsků. Všechna tělesa, která se nacházejí ve vesmíru a mají určitou teplotu, vyzařují elektromagnetické záření. Slunce vysílá viditelné krátkovlnné záření, které obsahuje více energie, protože díky své vysoké teplotě vyzařuje obrovské množství energie. Oproti tomu Země, jako výrazně chladnější objekt, vyzařuje pouze malé množství energie a to pomocí dlouhovlnného záření. Toto záření je následně také částečně pohlcováno a rozptylováno aerosolovými částicemi. Ať už jde o pohlcování a rozptyl záření ze Země nebo ze Slunce, narušuje tento proces tzv. energetickou bilanci Země. Tato bilance popisuje to, jak je využita energie ze slunečního záření a jak je vyzařována zpět. Zjednodušeně, pokud jsou příchozí a odchozí hodnoty energie v rovnováze, teplota na Zemi zůstává stabilní. Narušení této rovnováhy znamená teplotní nestabilitu a představuje nepřímý dopad atmosférického aerosolu na klima Země [13, 14, 15].

Atmosférický aerosol může také ovlivňovat tvorbu a vlastnosti mraků. Tvorbu mraků, která probíhá kondenzací vodní páry v atmosféře, výrazně zvyšují právě částice aerosolu, které v tomto procesu hrají významnou roli tzv. jader kondenzace mraků. Vodní pára začne kondenzovat na ploškách částice, čímž vznikají oblačné kapky nebo případně ledové krystalky. Běžnými přírodními částicemi podílejícími se na vzniku mraků jsou sulfáty, částice mořské soli nebo amonné soli. Kondenzačními jádry mraků se ale také velmi často stávají částice antropogenních aerosolů. Oblaky vytvořené v čistším vzduchu jsou formované z menšího množství větších kapek, a proto se v nich sluneční světlo tolik neodráží a jsou tmavé. Naproti tomu mraky formované ve více znečištěném vzduchu jsou složeny z velkého množství menších kapiček, protože vodní pára má mnoho dostupných jader ke kondenzaci. Tyto typy oblaků jsou pak velice jasné, protože odráží výrazně větší část slunečního světla – světlo vstupující je odráženo a lámáno velkým množstvím povrchů kapek. Tento efekt rozjasnění mraků nazývaný anglickým spojením „*cloud albedo effect*“, tedy „efekt oblačného albeda“ (viz. obr. 1.6) je považován za nepřímý vliv aerosolových částic na klima, nicméně jeho dopad na zemské klima je výrazný, protože redukuje dopad slunečního záření na zemský povrch, čímž planetu ochlazuje [13, 15].



Obr. 1.6 „Cloud albedo effect“ neboli „efekt oblačného albeda“ se schématickým znázorněním množstvím průchozího a odraženého světla [15].

Částice aerosolu obsažené v mracích mohou zvýšit schopnost mraků částečně pohlcovat a také odrážet sluneční záření, což ve větším měřítku opět zapříčiňuje ochlazování Země. Zvýšená přítomnost aerosolových částic v mracích také může při specifických procesech prodlužovat životnost mraků a brzdit přeměnu oblačných částic vody na dešťové kapky. Tento proces opět vede ke zvyšování odrazu slunečního záření a tím následnému snižování teploty zemského povrchu. Přestože je atmosférickému aerosolu věnována velká pozornost, stále ještě nejsou objasněny všechny účinky, které tyto jemné částice mají na naše klima. Protipólem k efektu ochlazování je výrazné oteplování planety v důsledku emisí skleníkových plynů do ovzduší. Dle odhadů by například 5% zvýšení odrazivosti mraků mohlo zcela kompenzovat průměrné oteplování planety v důsledku emise skleníkových plynů. Vědci také předpokládají, že by v průběhu následujících let mohlo docházet ke zvyšování kompenzace globálního oteplování díky ochlazování způsobenému aerosolovými částicemi. Dle odhadů založených na modelech distribuce aerosolů působil od 80. let 20. století ochlazovací efekt aerosolů proti zhruba polovině oteplovacího účinku skleníkových plynů. Vzhledem k faktu, že skleníkové plyny se díky svému skupenství jednodušeji distribuují atmosférou a distribuce pevných aerosolových částic je závislá na dalších několika faktorech, je teplotní kompenzace různě účinná v závislosti na oblastech. V tomto ohledu je tedy proces ochlazování prospěšný a je možné, že pokud naopak bude atmosférického aerosolu ubývat a vzduch bude čistší, bude také o to více růst teplota Země [13, 15].

Sluneční záření není odráženo a pohlcováno pouze aerosolovými částicemi obsaženými volně v atmosféře nebo v mracích. Tento efekt mají také částice, které jsou trvale i dočasně usazeny na zemském povrchu. Jasně zbarvené a průsvitné částice, jako např. částice mořské soli a mořského ledu a sněhu, odrážejí záření z povrchu různými směry a způsobují ochlazení klimatu. Tmavé částice, jako je černý uhlík, absorbují záření a tím planetu spíše ohřívají. Běžná je také situace, kdy emise černého uhlíku nebo jiných tmavých částic pokryjí led a sníh zejména v arktických oblastech, čímž změní jejich odrazivost a také urychlují jejich tání. Vědci se však domnívají, že ochlazovací účinek reflexních aerosolů převažuje oteplovací účinek tmavých absorpčních aerosolů [15].

Využívání půdy k zemědělství, které je spjato s odstraňováním vegetace a další antropogenní i přírodní zásahy do krajinného pokryvu může zapříčinit změnu koncentrace minerálního prachu v atmosféře. Tyto změny koncentrace také mohou zasahovat do radiační (energetické) rovnováhy Země. Významnou roli z pohledu životního prostředí hrají aerosoly zejména v městském prostředí. Hospodářský a ekonomický růst zapříčiňující růst průmyslu a urbanizace vede ke zvyšování emisí antropogenních aerosolů především v městských oblastech. Tyto emise nejenže zhoršují viditelnost v městských oblastech, ale vede k řadě dalších problémů ovlivňujících životní prostředí. Hlavním takovým problémem je snížení kvality ovzduší těchto hustě osídlených oblastí a s tím úzce spjatý dopad na zdraví obyvatel (viz podkapitola 1.6). Dalšími způsoby, jak převážně antropogenní aerosoly zasahují do životního prostředí, je např. reakce s dalšími složkami v atmosféře a řada chemických reakcí, jejichž produkty také vedou ke zhoršení kvality ovzduší nebo třeba k ničení ozonové vrstvy, kontaminace dešťové vody atd. [13, 15].

1.6 Vliv atmosférického aerosolu na zdraví člověka

Už několikrát byly v některých částech této práce zmiňovány zdravotní rizika a dopady, které mohou částice atmosférického aerosolu přinášet. Se zvyšujícím ekonomickým a průmyslovým rozvojem, rozvojem dopravy atd. se pojí také zhoršování kvality ovzduší především v městských oblastech. Také proto si v posledních letech výzkum dopadu aerosolů na lidské zdraví získává velký zájem lékařské komunity. Mezi částice nejvíce ohrožující lidské zdraví patří částice PM_{10} a $PM_{2,5}$, nazývané se v tomto oboru jako inhalovatelné částice. Při dýchání se totiž tyto částice dostávají do dýchacího traktu lidského těla. Částice větší než $10\ \mu m$ (tedy než PM_{10}) se vzhledem ke svojí kratší době výskytu ve vzduchu nepovažují za tolik nebezpečné a při vdechnutí jsou z většiny filtrovány nosní dutinou, hrdlem, sliznicemi a řasinkami v horní části průdušnice. Čím menší průměr od $10\ \mu m$ částice mají, tím jednodušeji pronikají dále do dýchacího systému člověka. Inhalace částice PM_{10} poškozuje především kardiovaskulární a plicní systém. Například částice PM_{10} se mohou usazovat v průduškách a výzkumy prokázaly jejich nepříznivé účinky na zdraví. Částice $PM_{2,5}$ a menší se mohou dostávat dále až do plic krevního řečiště a způsobovat např. vznik různých typů emfyzému, jako je např. plicní emfyzém neboli rozedma plic – chronické plicní onemocnění, při kterém dochází k trvalému poničení nebo zániku přepážek plicních sklípků, a řady dalších plicních onemocnění. I díky tomu jsou tyto menší částice ze zdravotního hlediska považovány za nebezpečnější [3, 13, 17].

Většina pevných částic může do určité míry pohlcovat vlhkost, ale částice také mohou absorbovat různé plyny, sloučeniny a jiné látky, které mohou být také škodlivé pro lidský organismus, například tím, že jsou karcinogenní. Stejně tak mohou být karcinogenní např. určité typy kovových prášků emitované např. z tavných pecí. Rakovina plic obecně patří mezi častá onemocnění spojená se znečištěním ovzduší, stejně jako skupina zánětlivých onemocnění plic. Mezi další onemocnění a zdravotní problémy spjaté s přítomností jemných částic v ovzduší patří také různá onemocnění spojená se schopností částic absorbovat i mikroby a bakterie, které mohou vést k řadě infekčních onemocnění a dalších chorob. Co se obecně týče onemocnění spojených s inhalací (mikrobiálních) částic týče, velice aktuálním příkladem je koronavirová epidemie. Taková onemocnění mohou i po vyléčení ponechat řadu déle trvajících zdravotních problémů. Konkrétní dopad inhalace jemných částic na zdraví člověka je však také z velké části ovlivněn zdravotními a genetickými predispozicemi jedince. Krátkodobá studia potvrdila, že starší lidé a lidé s již existujícím zdravotním onemocněním srdce a plic jsou náchylnější na účinky jemných částic v ovzduší. Inhalace PM částic také může souviset se snižováním růstu plic u dětí [3, 13, 17].

2 Měření koncentrace pevných aerosolových částic v ovzduší

Vzhledem k velikosti jemných aerosolových částic nacházejících se v atmosféře nejsou lidé schopni určovat jejich koncentrace pouze svými smysly. Jak bylo zmíněno v úvodu práce, nejmenší okem jednoduše viditelné částice se svým průměrem pohybují okolo hodnoty 50 μm . Především díky dopadům, které tyto částice mají na životní prostředí, klima a lidské zdraví, je lidstvo nuceno monitorovat a měřit koncentraci aerosolových částic v ovzduší. V současné době existuje několik metod, jimiž lze měření koncentrace částic v ovzduší provádět. V kapitole 2.2 jsou představeny a podrobně popsány nejpřednější z nich, které se běžně používají v měřicích stanicích. Existují však také mnohem složitější, specifické nebo náročné metody, které slouží např. pro účely výzkumu a jsou používány především na laboratorní úrovni.

Míra znečištění ovzduší pevnými částicemi se tedy primárně určuje měřením koncentrace těchto částic v ovzduší. Obecně se proces měření koncentrace znečišťujících látek označuje jako tzv. imisní monitoring, který také zahrnuje další procesy, jako sběr, vyhodnocování, archivace naměřených dat a podobně. Hlavní cíle imisního monitoringu byly v roce 2020 definovány Světovou zdravotnickou organizací (WHO) a zahrnují body jako např. stanovení expozice populace a přírodních ekosystémů nadměrným koncentracím znečišťujících látek atd. Imisní monitoring musí zachycovat územní (prostorový) výskyt znečišťujících látek (v našem případě pevných částic), to znamená, že musí být provozován v měřicích sítích, které dané území pokrývají v takové míře, že jsou schopny podat přesný záznam o koncentraci pevných částic v ovzduší. Imisní monitoring provozovaný v rámci většiny státních útvarů musí svým měřením sledovat koncentraci všech látek, pro které jsou stanoveny tzv. imisní limity (viz. podkapitola 2.1). Při provádění měření týkajících se kvality ovzduší obecně platí, že naměřená veličina ϑ (v tomto případě např. hmotnostní tok) musí být upřesněna těmito čtyřmi parametry:

$$\vartheta = \vartheta(p, r, s, t) \quad (2.1)$$

kde p symbolizuje místo měření, r vyjadřuje dobu trvání odběru, s značí měřenou složku a t je čas nebo okamžik měření. Na naměřená data se nahlíží ze dvou úhlů pohledu z hlediska času. Cílem imisního monitoringu je zaprvé sledování krátkodobých cílů, jako je především ochrana obyvatelstva při výrazném zhoršení stavu kvality ovzduší v daných postižených oblastech. Dlouhodobý proces vyhodnocování dat sleduje časové tendence a změny v celkovém územním rozložení znečištění ovzduší, hledá příčiny těchto změn, hodnotí dlouhodobé dopady znečištění ovzduší na zdraví lidí, životní prostředí, klima a také např. na stav majetku [1].

2.1 Legislativa týkající se monitoringu pevných částic v ovzduší

V současné době je běžné, že ve většině vyspělejších zemích existuje legislativa, která stanovuje monitoring a regulaci pevných aerosolových částic a jiných znečišťujících látek v ovzduší. Jedná se většinou o zákony definující přípustné úrovně znečištění, procesy vyhodnocování úrovně znečištění ovzduší, imisní limity, povinnosti osob při nakládání s určitými typy paliv a dalšími zdroji znečištění ovzduší, způsoby monitoringu kvality ovzduší a mnoho dalších ustanovení.

Pro monitoring a řízení kvality ovzduší v České republice platí dvě úrovně legislativy. První úroveň je daná členstvím v EU. Platí zde totiž směrnice 96/62/EC přijatá Evropskou unií roku 1996 vymezující obecné požadavky na hodnocení a řízení kvality ovzduší v členských státech EU. Druhou úroveň představuje státní legislativa. V České Republice nyní setrvává v platnosti zákon č. 201/2012 – Zákon o ochraně ovzduší, který je účinný od 1. 9. 2012, a který

se kromě dalších znečišťujících látek týká také pevných aerosolových částic. První významnou částí týkající se pevných částic v ovzduší je druhá část zákona pojednávající o tzv. přípustných úrovních znečištění a znečišťování. Přípustná úroveň znečišťování je určena emisními limity, emisními stropy, přípustnou tmavostí kouře a dalšími opatřeními týkajícími se přímé emise znečišťujících látek (v našem případě PM), a jelikož je toto téma komplexní a nespadá mezi cíle práce, není dále podrobněji rozvedeno [1, 18].

Přípustná úroveň znečištění určuje imisní limity a přípustné četnosti jejich překročení. Imise je definována jako emise po procesu přenosu, rozptýlení a fyzikálně-chemických reakcích, do nichž vstupuje v atmosféře. Pojem imisní limit vyjadřuje hranici maximální průměrné hmotnostní koncentrace znečišťující látky (hmotnost znečišťující látky na jednotku objemu) v ovzduší za určité období za standardní teploty a tlaku. Vzhledem ke zdravotní škodlivosti, dopadům a výskytu pevných částic se za nejvíce sledované frakce pevných aerosolových částic považují PM₁₀ a PM_{2,5}. Pro tyto velikostní třídy jsou zákonem stanoveny tyto imisní limity:

- imisní limit pro průměrnou roční koncentraci PM₁₀ – 40 μg · m⁻³,
- imisní limit pro průměrnou denní (24h) koncentraci PM₁₀ – 50 μg · m⁻³,
- imisní limit pro průměrnou roční koncentraci PM_{2,5} – 20 μg · m⁻³.

Každý imisní limit obsahuje tzv. dobu průměrování – tedy období, pro které je imisní limit platný (8h, denní, roční). Pro každý z těchto imisních limitů je také určený maximální počet překročení. Překročení imisního limitu je potom situace, kdy je na daném místě hodnota imisního limitu překročena vícekrát, než je hodnota maximálního počtu překročení. Pro oba roční imisní limity PM₁₀ a PM_{2,5} je tento počet roven 0. Pro imisní limit průměrné denní koncentrace částic PM₁₀ je maximální počet překročení roven 35 [18, 19].

Při překročení imisních limitů v ČR je nutné, aby Ministerstvo životního prostředí ve spolupráci s příslušným krajským nebo obecním úřadem pro danou oblast vypracovalo Program zlepšování kvality ovzduší (PZKO). Co se překračování imisních limitů PM v ČR týče, není výjimkou, že takhle situace nastává. Nejčastěji překračovaným limitem je denní limit pro imise částic PM₁₀, k jehož překročení může dojít 35krát ročně. Dle dat ČHMÚ pro rok 2018 došlo k překročení tohoto limitu na 31 % stanic, tedy na 45 stanicích z celkového počtu 144 stanic s dostatečným množstvím dat pro hodnocení. Imisní limit pro průměrnou roční koncentraci PM₁₀ byl v roce 2018 překročen na 2,1 % stanic, tedy na 3 ze 146 stanic s dostatečným množstvím vyhodnocovaných dat. Jako poslední byl v roce 2018 překročen imisní limit pro průměrnou roční koncentraci PM_{2,5}, a to na 13 stanicích z celkového počtu 80 vhodných stanic, což znamená na 16 % stanic [16, 19].

Další významnou částí zákona č. 201/2012 je z hlediska změn koncentrace pevných částic v ovzduší § 10, který pojednává o tzv. smogové situaci. Termín smogová situace je zde definován jako stav mimořádně znečištěného ovzduší, při kterém úroveň znečištění oxidem siřičitým, dusičitým, troposférickým ozonem nebo částicemi PM₁₀ překročí informativní prahové hodnoty. Pro částice PM₁₀ je tato informativní prahová hodnota určena na koncentraci 100 μg · m⁻³ za dobu průměrování dvanácti hodin. Tato hodnota je považována za překročenou v případě, že se hodnota 12h klouzavého průměru hodinové koncentrace částic PM₁₀ za dostane nad zmíněnou hodnotu 100 μg · m⁻³ alespoň na polovině vhodných měřicích lokalit v oblasti minimálně 100 km² nebo na dvou měřicích lokalitách, pokud jsou pro úroveň znečištění (PM) v této oblasti vhodné pouze dvě lokality. Dále je zde uvedena tzv. regulační prahová hodnota, která je pro PM₁₀ rovna 150 μg · m⁻³. Při jejím podrobně popsáním překročení pak vchází v platnost regulační postupy a podmínky, které platí pro stacionární zdroje daného znečištění v postižené oblasti. Může nastat, že obec v postižené oblasti vydá tzv. regulační řád, který opatřuje omezení provozu silničních motorových vozidel. Závěr § 10 obsahuje podmínky ukončení smogové situace a odvolání regulací nebo varování. Pro smogovou situaci vytvořenou částicemi PM₁₀

platí, že je ukončena a regulace nebo varování se odvolávají v případě, kdy na žádné příslušné měřicí lokalitě v oblasti minimálně 100 km² není naměřena minimálně po dobu 12 h vyšší koncentrace, než je prahová hodnota a zároveň není v následujících 24 hodinách očekáváno opětovné překročení informativní prahové hodnoty [18].

2.2 Metody měření koncentrace PM částic v ovzduší

Samotná koncentrace aerosolových částic v ovzduší se dá interpretovat více způsoby. Prvním způsobem je vyjádření koncentrace částic ve formě hmotnostní koncentrace uváděné většinou v $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ nebo také v $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tento způsob je běžně využíván při vyhodnocování naměřených hodnot ve většině případů, a to hlavně z důvodu přesného vyjádření, tedy hmotnosti částic v určitém objemu vzduchu. I proto je naprostá většina imisních limitů a podobných hodnot vyjádřena tímto způsobem a tento postup je považován za výchozí na přesné odborné úrovni. Druhou variantou je potom zápis koncentrace v podobě počtu částic na určitý objem vzduchu, tedy např. počet částic na cm³ nebo m³, což je méně často používaný způsob zápisu. Dále také existuje způsob zápisu, který je vyjádřen součtem obsahu plochy – povrchů všech částic obsažených v určitém objemu [20].

Metody měření imisí pevných částic v ovzduší lze rozdělit z hlediska způsobu měření na manuální a kontinuální. Kontinuální měřicí metody se provádí danou přístrojovou technikou, jejíž součástí je také technika s automatizovaným sběrem a zaznamenáváním naměřených dat, nebo je na tento systém připojena měřicí technika. Manuální metody jsou používány hlavně v případě, kdy pro monitorované složky neexistuje vhodná automatizovaná metoda (toto však pro pevné částice úplně neplatí). Dále se používají jako doplněk pro automatizované stanice, který není tak nákladný a může pomoci dokreslit imisní situaci a ověřit data naměřená automaticky [1].

Při popisu metod měření aerosolových částic je vhodné zmínit také pojem měřicí stanice. Jak bylo naznačeno, měření částic atmosférického aerosolu probíhá na specializovaných měřicích stanicích. Na území ČR sledují kvalitu ovzduší primárně státní síť imisního monitoringu provozované ČHMÚ, dále např. síť Státního zdravotního ústavu a několik dalších, jejichž naměřená data zpracovává a archivuje ČHMÚ. V rámci výše uvedené směrnice Evropské unie a legislativy ČR existuje velká řada požadavků a norem, které měřicí stanice musí splňovat. Tyto požadavky se mohou týkat např. počtu stanic na určitou plochu, umístění, jejich tzv. klasifikace, což je jakési „zařazení“ stanice do prostředí, jehož kvalitu ovzduší sleduje. Síť měřicích stanic se dle použitého typu techniky dělí primárně na automatizované a manuální [1].

2.2.1 Gravimetrická metoda

Základním principem gravimetrického stanovení koncentrace částic je odběr určitého vzorku částic na filtr či folii a následné gravimetrické stanovení hmotnosti odebraného vzorku. To se provádí zjištěním rozdílu hmotnosti filtru před expozicí a po expozici vážením filtru na velmi přesných vahách. První fázi této metody představuje tedy odběr vzorku, který může probíhat pomocí různých druhů vzorkovacích zařízení, což jsou jednoduše zařízení sloužící k odběru aerosolových částic z určitého objemu vzduchu (viz. obr. 2.1). Vzorek může být odebírán např. spojitou filtrací, ale existuje mnoho dalších dostupných vzorkovacích zařízení, která mohou být pro tuto metodu vybrána dle konkrétních požadavků a účelů. Další používanou vzorkovací metodou je odběr pomocí impaktoru, který je popsán ve třetí kapitole. Vstup do vzorkovacího filtračního zařízení je většinou realizován přes vstupní hlavice, které mohou být upraveny

dle požadavků pro vstup částic PM₁₀ nebo PM_{2,5}. Do těchto hlavice je nasáván vzduch, který určitým známým průtokem proudí přes filtr (viz. obr. 2.1). Pro příklad, při použití filtru o průměru 35 mm je doporučený průtok vzduchu 6–8 m³ za den [1, 22].



Obr. 2.1 Fotografie a stručný popis vzorkovacího zařízení DIGITEL DHA-80 [23].

Vzhledem k tomu, že naměřená hmotnost může být lehce ovlivněna změnou vlhkosti, musí být při vzorkování a měření brán zřetel na nezávislost na teplotě a vlhkosti procesu. Změna vlhkosti může totiž lehce ovlivnit hmotnost filtru a také hmotnost zachycených částic. Proto se zavádějí postupy, které by měly zajistit maximální nezávislost procesu měření na těchto podmínkách. Běžný způsob, jak minimalizovat účinky vlhkosti na částice a filtr, je vystavení filtrů do prostředí s konstantní teplotou 20 °C a konstantní relativní vlhkostí 50 % po dobu 24 hodin před i po vzorkování. Komplikace může způsobit např. i statický náboj na filtru, který může zapříčinit stáčení filtru při manipulaci a také může ohrozit citlivý mechanismus přesných elektronických vah. Tento problém je většinou minimalizován uzemněním držáků filtru a také vystavením filtru antistatickému proužku před každým vážením. Co se týče vhodnosti filtrů pro tuto metodu, je zapotřebí použití filtrů s vysokou sběrnou účinností blížící se 100 %, jako např. filtry ze skelných vláken nebo membránové filtry. Běžné je použití např. membránových filtrů o střední velikosti pórů 0,85 mm. Materiál takových filtrů je, vzhledem k možným komplikacím, které může způsobovat elektrostatický náboj, často volen tak, aby byl vodivý (např. antistatický polykarbonát nebo PVC) [1, 22].

Přestože je gravimetrie z technologického hlediska metodou jednodušší při porovnání např. s radiometrií, její vysoká přesnost způsobila, že je tato metoda považována za nejspolehlivější metodu pro měření hmotnostní koncentrace jemných aerosolových částic v ovzduší. Toto tvrzení podkládá i fakt, že metoda odběru částic na filtr a následné gravimetrické stanovení

je určena zmiňovanou směrnicí Evropské unie 99/30/EC jako referenční metoda a je doporučena jako referenční metoda pro měření v členských zemích. V ČR je gravimetrická metoda dle evropské normy EN 12341 používána právě jako referenční metoda pro měření částic PM₁₀ a PM_{2,5}, pouze však v manuálních měřicích stanicích. Použití gravimetrické metody pro automatizované měření je vzhledem k nutným postupům metody prakticky nerealizovatelné. Vzhledem k tomu se metoda nedá použít pro sledování koncentrace v reálném čase. Jedná se tedy spíše o metodu používanou pro ověřování přesnosti dat naměřených jinými metodami [1].

2.2.2 Radiometrická metoda

Základním principem radiometrické metody je absorpce beta záření pevnými částicemi zachycenými na filtračním materiálu. Součástí měřicího zařízení (viz. obr. 2.2) je komora, do které je přes vstupní hlavici určitou dobu nasáván vzduch obsahující pevné částice. Vstupní hlavice má většinou i třídící funkci. Obsahuje totiž mechanismus, který dělí částice dle velikosti tak, že do komory s filtrační páskou vstupují jen částice požadované velikosti (většinou částice PM₁₀ a menší). V komoře, kam se vzduch dostává trubicí po tom, co projde hlavicí, se částice zachycují na pás filtračního materiálu, který je většinou vyroben ze skleněných textilních vláken. Po tom, co se částice zachytí, je filtrační materiál s obsaženými částicemi vystaven beta záření, což je zjednodušeně proud elektronů β^- nebo pozitronů β^+ . Toto záření je vysíláno ze zdroje, prochází filtračním materiálem a je tlumeno obsaženými částicemi. Zeslabení intenzity záření je popsáno vztahem, který vychází z Lambert-Beerova zákona pro absorpci elektromagnetického záření:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu q} \quad , \quad (2.2)$$

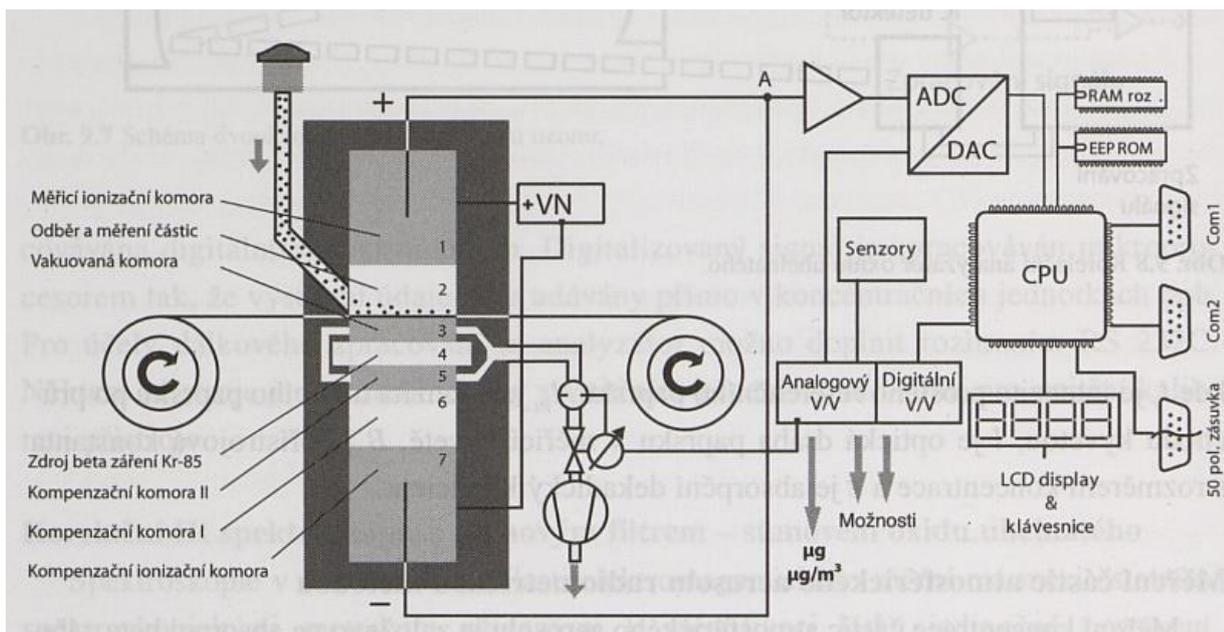
kde I představuje intenzitu beta záření po průchodu vrstvou vzorku aerosolových částic zachycených na filtru, I_0 je potom intenzita beta záření prošlého čistým filtračním materiálem. μ značí hmotnostní absorpční koeficient a q je plošná hustota vrstvy zachycených částic. Tato plošná hustota q je definována vztahem:

$$q = \frac{c \cdot V}{S} \quad , \quad (2.3)$$

ve kterém c představuje hmotnostní koncentraci aerosolových částic ve vzduchu v $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. V značí objem prosátého vzduchu a S je plocha vrstvy aerosolových částic zachycených na filtrační pásce [1, 21, 22].

Částečné tlumené záření dopadá do měřicí ionizační komory, kde je jeho intenzita měřena beta detektory s elektronovými čítači. Z naměřené intenzity prošlého záření se určí množství záření, které bylo absorbováno částicemi na filtračním materiálu. Tato hodnota se porovná s množstvím záření, které bylo absorbováno neexponovaným filtrem bez částic. Vyvozený rozdíl je úměrný hmotnosti zachycených částic, ze které se následně určí hmotnostní koncentrace částic pro daný objem vzduchu, ze kterého byl vzorek odebrán. Zmíněné beta záření lze vyjádřit podílem četností impulsů N po průchodu vrstvou vzorku aerosolových částic zachycených na filtrační pásce radiometru a četností impulsů N_0 po průchodu čistou filtrační páskou. Četnost impulsů je vyjadřována počtem impulsů za sekundu. Pro metodu měření koncentrace částic atmosférického aerosolu radiometrickou metodou pak platí:

$$c = S \cdot \ln(N_0 / N) / \mu \cdot V \quad . \quad (2.4)$$



Obr. 2.2 Schéma radiometrického měřicího přístroje Thermo Scientific FH 62 I-R [1].

Jak lze vidět na obr. 2.2, součástí radiometrických přístrojů sloužících pro měření koncentrace pevných částic v ovzduší bývá často také interní počítač, který monitoruje celý proces měření pomocí senzorů a případně následně vyhodnocuje a odesílá data na příslušné místo [1, 21, 22].

Nezpochybnitelnou výhodou této technologie je skutečnost, že naměřená koncentrace a další data jsou přímo při měření vyhodnocována počítačem a jsou ihned dostupná v digitální podobě, což umožňuje použití této technologie v automatických měřicích stanicích a zajištění sledování koncentrace v reálném čase. Data se téměř okamžitě po naměření mohou dostat do ústředí institucí sledující kvalitu ovzduší a tím mohou poskytovat výrazný časový prostor k reakci na skokové zhoršení kvality ovzduší a podobné situace. Také proto je tato metoda součástí stanic AIM³, kde jsou tyto přístroje používány k měření koncentrace částic PM₁₀ a PM_{2,5} a obecně patří k nejrozšířeněji používaným metodám. V letech 2002–2004 byla většina někdejších přístrojů AIM nahrazena právě modelem FH 62 I-R, který je znázorněn na obr. 2.2.

Za lehkou nevýhodu či komplikaci u této metody je považován fakt, že změny vlhkosti, teploty a tlaku ovlivňují průběh měření, a proto musí být mechanismus vybaven navíc senzory a měřiči, které tyto podmínky neustále monitorují a jejich změny následně musí být kompenzovány při vyhodnocení výsledků měření počítačem, aby nedošlo ke zkreslení informací [1, 21, 22].

2.2.3 Metoda oscilačních mikrovah (TEOM)

Technologie TEOM, z anglického spojení „*tapered-element oscillating microbalance*“, je měřicí metoda ze 60. let, která má svoje kořeny v newyorské observatoři Dudley. Tehdy se jednalo o mikrováhu složenou z tenkého křemenného vlákna a byla navržena pro měření částic mikrometeoritů v rozmezí 10^{-11} – 10^{-5} g. V současnosti se metoda oscilačních mikrovah rozsáhle používá pro měření jemných aerosolových částic v ovzduší. Dominantním prvkem přístrojů používaných pro tento účel je dutý křemenný kuželovitý nástavec (trubice) sklovité konzistence,

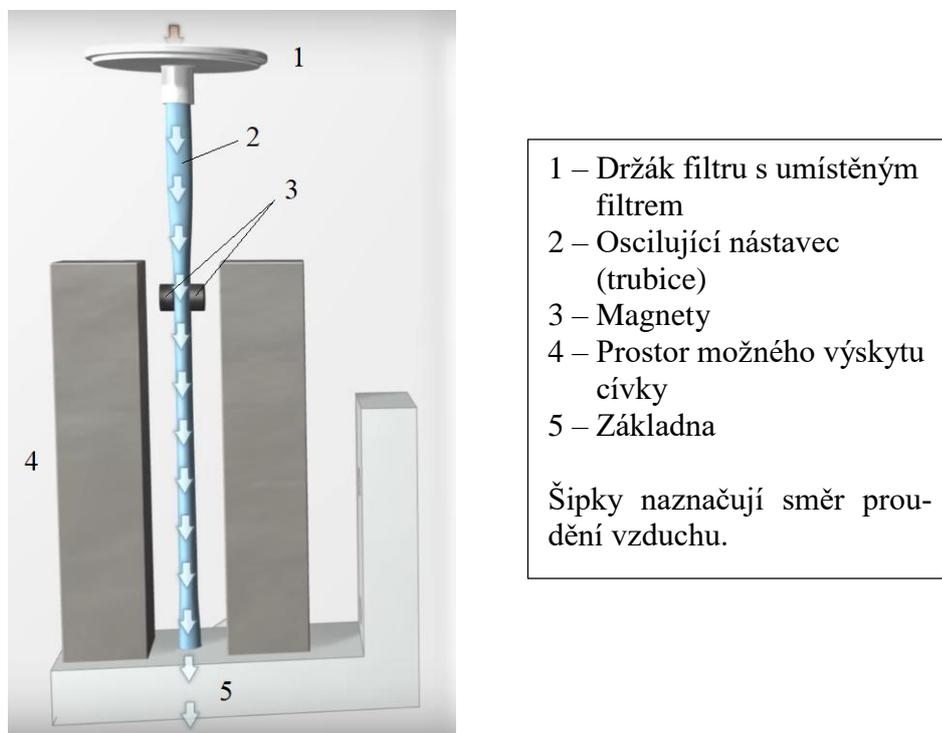
³ AIM = Automatizovaný imisní monitoring ČHMÚ

který koná oscilační (kmitavý) pohyb. Kmitavý pohyb je zajištěn pomocí cívky vytvářející elektromagnetické pole a dvou magnetických prvků připevněných v určitém místě po obvodu nástavce tak, aby se cívka nacházela v ose oscilačního pohybu naproti jednomu z magnetů. Druhý magnet je umístěn také v ose oscilace, pouze na opačné části stěny nástavce. Tato cívka vytváří elektromagnetické pole, na které reagují magnety tak, že uvedou nástavec do kmitavého pohybu a následně jej v něm udržují. Frekvence tohoto kmitavého pohybu se liší v závislosti na konkrétním přístroji, nicméně jedna z běžně používaných hodnot je 300 Hz [1, 22, 24].

Kuželovitý nástavec je upevněn svojí širší částí na základovou desku a na užší část směřující nahoru je připevněno sběrné médium, většinou jde o filtr nebo také nárazovou desku (viz. obr. 2.3). Vzduch je nasáván přes sběrné médium dovnitř kmitajícího nástavce a z něj je následně odváděn potrubím, což většinou řídí regulátor hmotnostního toku. Proces nasávání vzduchu může být prováděn opět přes vstupní třídící hlavici, např. PM₁₀. Při tom, jak nasávaný vzduch prochází přes sběrné médium (např. filtr), se ve vzduchu obsažené částice na tento filtr usazují. S narůstajícím množstvím usazených částic na filtru roste také hmotnost filtru, což způsobuje snížení frekvence kmitání. Závislost hmotnosti usazených částic a frekvence kmitání trubice lze vyjádřit touto rovnicí, která je odvozena z pohybových rovnic pro jednoduchý harmonický oscilátor:

$$\Delta m = K_0 \left(\frac{1}{f_b^2} - \frac{1}{f_a^2} \right), \quad (2.5)$$

kde Δm představuje hmotnost odebraného vzorku, f_b značí frekvenci oscilačního prvku před odběrem vzorku, f_a naopak frekvenci oscilačního prvku po odběru vzorku a K_0 je konstanta (v rovnici pro harmonický oscilátor konstanta pružiny) specifická pro konkrétní použitou trubici [22].



Obr. 2.3 Schématický model hlavní části oscilačních mikrovah firmy Thermo Fisher Scientific [24].

Změny frekvence jsou zaznamenávány, což může být uskutečňováno více způsoby, vzhledem k jednotlivým aplikacím této metody a konkrétním přístrojům. Běžným způsobem monitoringu frekvence kmitání je např. použití LED diody a fototranzistoru, což se poprvé objevilo u prachového monitoru TEOM vyvíjeného pro těžební aplikace Patashnickem a Rupprechtem v roce 1983. Mimochodem, následně založená společnost Rupprecht & Patashnick, Co. byla v roce odkoupena společností Thermo Fisher Scientific, Inc., což je k roku 2011 jedinou společností vyrábějící TEOM měřicí zařízení. V této variantě je dvojice LED dioda – fototranzistor umístěna naproti sobě v rovině kolmé na rovinu kmitání nástavce. Světlo vycházející z diody je přerušováno oscilujícím nástavcem, což zaznamenává fototranzistor, který poté signál posílá k výpočtům a dalšímu zpracování. Ve starší verzi přístroje sloužil tento systém také k udržování oscilačního pohybu, protože princip měřicího mechanismu byl lehce rozdílný. Dalším možným způsobem sledování změn frekvence kmitu je např. použití tzv. Hall-ova senzoru, což je zařízení, které slouží k měření intenzity magnetického pole [1, 22, 24].

Ať už je výstupní informace o změnách frekvence jakéhokoliv původu, následujícím krokem po zaznamenání a zpracování dat je odeslání informace na příslušná místa nebo připravení výstupu. Vzhledem k charakteru těchto dat je možné, že data mohou být ihned po naměření dostupná k výpočtu a vyhodnocení koncentrace. To umožňuje použití této metody pro stanice automatizovaných měřicích sítí a ke sledování koncentrace částic v reálném čase. Naopak k slabinám této měřicí metody patří vlhkost vzduchu a s tím spojená vlhkost částic, která může jednoduše ovlivnit naměřená data. Pro zajištění přesnosti výsledků se měření původně provádělo při 50 °C. Následně se přešlo na prostředí o teplotě 30 °C, protože při 50 °C se mohou některé těkavé složky částic odpařovat (amonné soli, některé organické látky). V prostoru, ve kterém se oscilující mechanismus s filtrem nachází je tedy udržována konstantní teplota 30 °C [1, 22].

Rizikem je také možná situace, kdy by při vysoké koncentraci částic v ovzduší mohlo docházet k ucpání filtru a k následnému odlučování částic z filtru zpět do vzduchu. Při výrazném přetížení filtru částicemi by také mohlo dojít k tomu, že systém zpětné vazby udržující trubici v oscilačním pohybu by již nedokázal udržet trubici v oscilačním pohybu. Tento jev se nazývá saturace a díky němu je systém nastaven tak, že uživatele upozorňuje s dostatečným předstihem na možnost přetížení filtru a udržuje tak přístroj ve stavu svého efektivního rozsahu měření. Při velkém přesycení filtru totiž metoda ztrácí měřicí přesnost. Dalším problémem může být vliv elektrostatických účinků částic na filtr. Bylo zjištěno, že když jsou filtrované částice nabitě a náboj se hromadí ve filtru, může to způsobit snížení frekvence oscilace trubice. Tento problém může výrazně eliminovat průchod vzduchu přes bipolární nabíječ. [1, 22].

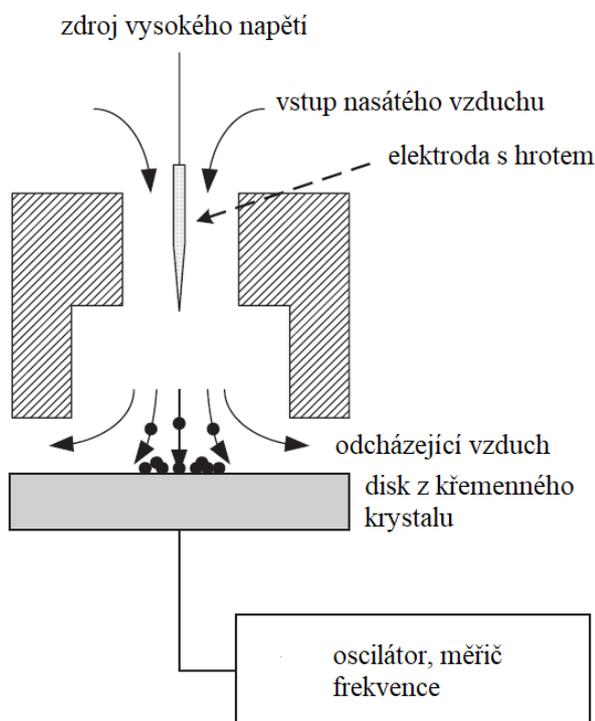
2.2.4 QCM

Zkratka QCM představuje metodu, která je svým principem lehce příbuzná metodě oscilačních mikrovah. Zkratka QCM – „*quartz crystal microbalance*“ znamená ve volném překladu „mikrováha z křemenného krystalu“. Jde o techniku běžně používanou již v 70. a 80. letech 20. století, v současnosti však nepatří mezi nejpoužívanější. V měřicích přístrojích používajících tuto metodu vzduch s obsaženými částicemi proudí do komory přes úzký otvor. Při vstupu do otvoru se aerosolové částice ve vzduchu nabíjí ionty, které jsou vytvořeny tzv. koronovým výbojem⁴. Takto nabitě částice pak proudí do komory, kde je jejich proud směřován na disk z křemenného krystalu o velikosti od několika jednotek mm do 20 mm, jak lze vidět na obr. 2.4. Tento disk je připojen na elektrodu a zároveň na přístroj, který ho udržuje v oscilačním pohybu.

⁴ Koronový výboj = výboj plazmatu, který je vytvořen přivedením vysokého napětí na elektrody s ostrými hroty. Koronový výboj se používá ke změně povrchové energie materiálů.

Částice v proudícím vzduchu se poté principem elektrostatické reakce usazují na nabitý rezonující disk. Proces usazování je také podporován setrvačnými silami, které při proudění směřují částice k disku. Usazené částice následně ovlivňují rezonanční frekvenci disku, která je měřena a porovnáním s frekvencí čistého disku je průběžně určována hmotnost částic. Z této hmotnosti se opět na základě informací o průtoku vzduchu určí výsledná hmotnostní koncentrace. Využití setrvačnosti částic a také použití slabé vrstvy maziva na křemenný disk jsou faktory, které má metoda společné s metodou odběru částic ze vzduchu pomocí tzv. impaktoru (viz. kapitola 3) [22, 23].

Mezi výhody této metody patří možnost měření hmotnosti části velice přesně za vhodných podmínek. Vzhledem k vysoké citlivosti krystalu se musí eliminovat účinky změn vlhkosti a teploty na výslednou hmotnost, proto se pro účel kompenzace těchto vstupních podmínek používá referenční krystal. Hlavní nevýhodou metody je fakt, že vysoká frekvence povrchu elektrody (5–10 MHz) může způsobovat špatné vazbení částic na disk, což se zhoršuje s rostoucí velikostí částic. Dále je nevýhodné, že maximální hmotnostní kapacita uložených částic na disku je relativně nízká. Při uložení většího množství není již hmotnost přesně měřitelná, proto je nutné časté čištění a přemazání plochy. Také proto není tato metoda úplně vhodná pro využití v automatických měřicích stanicích, protože by vyžadovala automatizaci procesu čištění a přemazání. Dále je běžné, že je tato metoda používána s různými typy modifikace a že se tento princip využívá i k jiným činnostem, než měření koncentrace částic v ovzduší. V souvislosti s touto metodou je možné také zmínit tzv. „*Dekati mass monitor*“, což je měřicí přístroj využívající také koronový náboj, ale princip jeho fungování je odlišný. Tento přístroj se však využívá k měření emisí, což není předmětem zájmu této práce [22].



Obr. 2.4 Schéma běžného složení přístroje využívající metodu QCM pro měření hmotnostní koncentrace částic v ovzduší [22].

2.2.5 CAMM

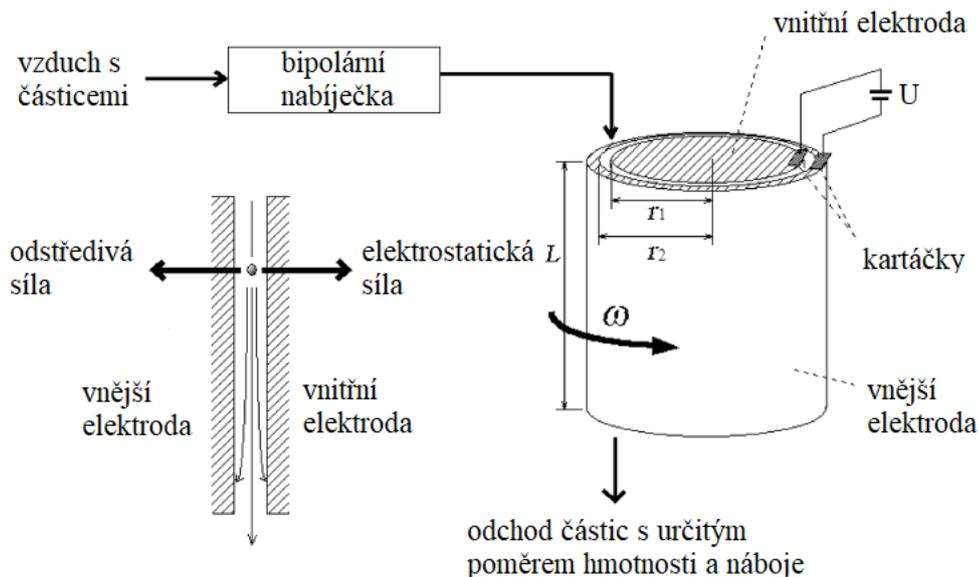
Metoda vyvinutá na Harvardově univerzitě v letech 2000–2005 nese název „*continuous ambient air mass monitor*“, což lze volně přeložit jako „kontinuální monitor hmoty okolního vzduchu“. Jak částečně vyplývá z názvu, jedná se o přístroj monitorující hmotnostní koncentraci částic obsažených ve vzduchu kontinuálně, tudíž je možné jeho využití v automatických měřicích stanicích, přestože nepatří mezi hlavní používané metody pro imisní monitoring. Přístroj využívá ke sledování hmotnostní koncentrace aerosolových částic změny tlaku na membránovém filtru. Vzduch je nasáván přes filtr, na kterém se usazují částice. Tyto usazené částice snižují monitorovaný tlak ve filtru a v trubici za filtrem, kterou proudí vzduch. Z tlakového rozdílu mezi prouděním vzduchu v referenčním kanálu a prouděním vzduchu v kanálu s filtrem, na kterém se usazují částice, se následně určí hmotnost usazených částic. Součástí mechanismu je také $PM_{2,5}$ impaktor, který je umístěn před filtr a nasávaný vzduch je vysoušen difúzní sušičkou tak, aby vzduch procházející filtrem neměl hodnotu relativní vlhkosti nad 40 % a naměřená hmotnost byla co nejméně ovlivněna hmotností vody obsažené ve vzduchu [22].

Při měření se používá páskový filtr, který se cca každou hodinu posouvá. Pokles tlaku přes filtr je ovlivněn nejen hmotností uložených částic, ale také velikostí těchto částic a jejich složením. Menší částice způsobují při stejné hmotnosti uložených částic větší pokles tlaku. Velikostní závislost je částečně kompenzována právě impaktorem, který zachytává částice menší než $2,5 \mu m$. Takto nastavený přístroj by měl měřit hmotnost nezávisle na velikosti pro velikost částic pod 1 mm. Při vzorkovací době 1 h (doba mezi posunutími filtrační pásky) a průtoku vzduchu $0,3 \text{ l/min}$ platí pro přístroj horní detekční limit 5 mg/m^3 . Metoda lze tedy použít pro automatizovaný monitoring hmotnostní koncentrace částic, ale využití nachází také v emisním monitoringu [22].

2.2.6 APM

Dalším typem přístroje, který nepatří mezi nejrozšířenější, ale lze jej použít pro měření hmotnostní koncentrace částic v ovzduší, je tzv. „*aerosol particle mass analyzer*“, zkráceně APM. Jak napovídá název, v přístroji probíhá analýza částic obsažených ve vzduchu dle poměru hmotnosti a elektrického náboje. Vzduch s aerosolovými částicemi nejprve prochází bipolární nabíječkou, pomocí níž částice dosáhnou rovnovážného rozložení náboje. Dále vzduch s částicemi pokračuje do prstencového prostoru mezi dvě rotující sousední prstencové elektrody o průměrech r_1 (vnitřní) a r_2 (vnější) [22].

Obě zmíněné elektrody rotují stejnou úhlovou rychlostí ω kolem společné osy a jsou pod stálým elektrickým napětím U , které je na rotující elektrody přiváděno ze zdroje napětí pomocí kartáčků, které jsou v neustálém kontaktu s elektrodami i při rotačním pohybu (viz. obr. 2.5). Částice se pohybují v prostoru mezi elektrodami vlivem odstředivé a elektrostatické síly, které působí přesně proti sobě. Pouze ty částice, u nichž se působení těchto dvou sil vzájemně rovná, tedy mají určitý konkrétní poměr hmotnosti a náboje, projdou celou délkou prstenců a opouštějí prstencový prostor. V případě, že je znám elektrický náboj částic Q , dokáže přístroj klasifikovat hmotnost průchozích částic, z čehož lze následně určit hmotnostní koncentraci [22].



Obr. 2.5 Schématické znázornění a princip fungování metody APM [22].

2.2.7 Optické měřicí metody

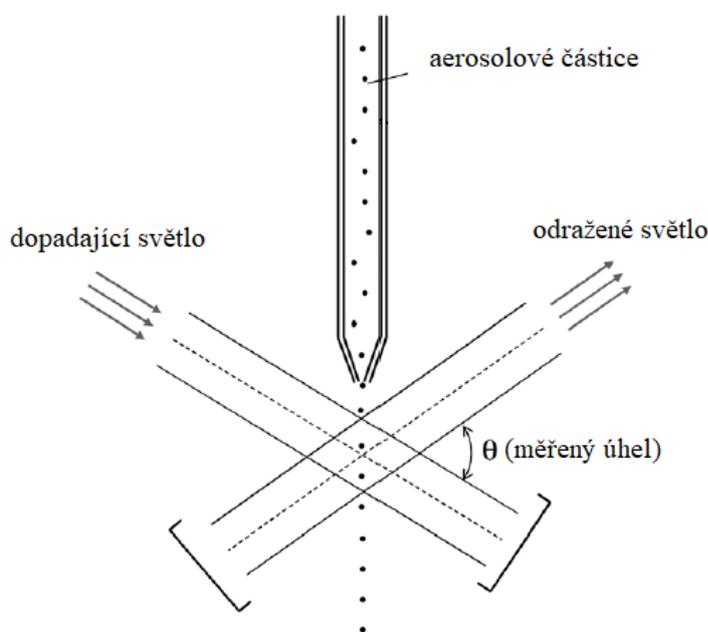
Jak již bylo zmíněno v podkapitole o působení aerosolových částic na klima a životní prostředí, aerosolové částice dokáží svojí přítomností v atmosféře rozptylovat, odrážet nebo absorbovat světelné paprsky. Těchto schopností částic využívají optické metody měření koncentrace aerosolových částic, ale také metody, které jsou využívány k určování velikostní distribuce. Velikostní distribuce částic početně, hmotnostně nebo objemově vyjadřuje množství částic, které v určitém vzorku připadá jednotlivým velikostním skupinám (PM_{10} , $PM_{2,5}$, atd.) [1, 22].

Metody, které využívají optických vlastností částic, se dělí na dva základní typy: metody *ex situ* a *in situ*. „*In situ*“, což v překladu z latiny znamená „na místě“, označuje techniky měření, které jsou prováděny přímo v místě odběru vzorku. Technologie „*ex situ*“ potom znamenají přesný opak. Jedná se tedy o proces, při kterém je vzorek vzduchu s částicemi odebrán na určitém místě a následně převezen na jiné místo, kde je provedeno měření částic. Dále se dají optické měřicí metody rozdělit dle využívaného principu na metody využívající rozptyl světla a na metody využívající absorpci a zánik světla. Specifičtější rozdělením je dále např. dělení metod na způsob rozptylu a zániku světla při jednotlivých metodách. Existují dvě varianty, jedna z nich využívá rozptyl a zánik světla jednotlivými částicemi a druhá rozptyl a zánik světla skupinou částic [20, 22].

Mezi jedny z nejpoužívanějších přístrojů založených na optickém způsobu měření koncentrace aerosolových částic patří optické čítače částic, které jsou často označovány zkratkou OPC vzniklou z anglického spojení „*optical particle counter*“. Optické čítače využívají zmíněných optických vlastností částic, především však rozptylu a odrazu světla. Vzorek vzduchu s obsaženými částicemi je nasáván úzkým otvorem, aby se částice oddělily a individuálně přistupovaly do prostoru, který je prosvícen světelným paprskem (dříve se používal úzký paprsek světla z žárovky nebo zářivky procházející přes soustavu čoček, v současnosti jsou používány laserové paprsky). Vzorkování se běžně provádí čerpadlem, při němž je běžné použití již dříve zmíněných třídících PM hlavic. Světelný paprsek se odráží od aerosolových částic pod určitým

úhlem, jak lze vidět na obr. 2.6. Tento úhel a intenzita odraženého paprsku jsou měřeny fotodetektořem, jenž funguje jako světelný senzor a převádí světelné záblesky na elektrický signál, který je zesílen a zaznamenáván [20, 22, 26].

Přístroj tedy dokáže okamžitě určit početní koncentraci aerosolových částic a také na základě informací o úhlu a intenzitě odraženého paprsku určit i velikost těchto částic. Za předpokladu sférického tvaru částic a jejich známé hustoty lze následně určit i hmotnostní koncentrace naměřených částic. Hmotnostní koncentrace je většinou vypočítána algoritmem, který zahrnuje zmíněné parametry a jeho přesnost je průběžně kontrolována referenčním gravimetrickým stanovením hmotnostní koncentrace. Různé druhy optických čítačů jsou široce využívány v automatických měřicích stanicích, kde monitorují hmotnostní koncentrace aerosolových částic v reálném čase. Vzhledem k povaze této metody a podobě výstupních dat jsou přístroje optických čítačů vhodné pro účel „*real-time*“ sledování hmotnostní koncentrace [20, 22, 26].



Obr. 2.6 Jednoduché schéma měřicí buňky optického čítače [26].

Optické čítače částic a další optické metody jsou široce využívány právě v automatizovaných sítích imisního monitoringu, což dokazuje i fakt, že ČHMÚ v posledních letech přechází právě na optoelektronickou technologii měření především aerosolových částic ve svých měřicích stanicích (více o této problematice v podkapitole 2.2.8).

Metoda velice podobná optickým čítačům je metoda fotometrická, která na rozdíl od optických čítačů patří do skupiny metod využívající rozptyl světla shlukem (soustavou) částic. Stejně jako optické čítače, fotometrie pracuje na principu odrazu světla. Fotometry měří světlo rozptýlené shlukem aerosolových částic, které pronikají buď samovolným pohybem vzduchu do otevřené měřicí komůrky, kde jsou měřeny v zóně optického snímání nebo jsou poháněny vzdušným čerpadlem a procházejí systémem odběru vzorků. Součástí měřicího aparátu je také filtr umístěný před fotodetektořem, který případně absorbuje okolní viditelné světlo. Metoda je vhodná pro měření vyšších koncentrací a také je možné její využití pro automatické

měřicí stanice. Přesnost měření je stejně jako u optických čítačů ověřována průběžně referenčním gravimetrickým měřením. Nevýhodou této metody je možnost ovlivnění přesnosti měření změnami velikostní distribuce aerosolových částic. Jemnější částice při stejné koncentraci způsobují zvýšení odrazivosti a jejich výsledná koncentrace díky tomu nemusí být vyhodnocena přesně. Proto se fotometrické přístroje nastavují na konkrétní frakce prachových částic a pro měření rozdílného typu částic se musí recalibrovat [20, 26].

Dalším příkladem optické metody určování koncentrace aerosolových částic pomocí odrazu a rozptylu světla jsou tzv. kondenzační optické čítače, označované také jako CPC, z anglického slovního spojení „*condensation particle counters*“. Tyto přístroje jsou využívány k měření koncentrace velmi malých částic. Tyto malé částice neodrážejí světlo tolik, jako částice větší, což znamená, že běžné optické čítače by nemohly jejich koncentraci měřit. Proto jsou využívány CPC přístroje, které jsou většinou schopné měřit částice až o velikosti $0,01 \mu\text{m}$ i menší. V CPC přístrojích se tyto malé částice zvětšují díky kondenzaci par z pracovní kapaliny. Po tom, co jsou částice zvětšeny, je princip měření podobný jako u klasických optických čítačů [20].

Existuje mnoho dalších optických metod využívajících odraz a rozptyl světla částicemi, které jsou založené na různých principech. Některé z nich mohou být založeny na stejných principech jako optické čítače nebo fotometry, ale liší se například jen použitím jiných typů paprsků, úhlem nasvícení a částic atd. Mezi raritnější optické přístroje měřící koncentraci atmosférického aerosolu patří například tzv. FSSP sondy. Zkratka FSSP znamená „*forward-scattering spectrometer probe*“ a označuje sondu využívající systém spektrometru (popsáno níže) s odrazem světla směrem dopředu. Tyto sondy mohou být buď pozemní, nebo mohou také být připevněny na letadla. Jak vyplývá z názvu, sonda detekuje aerosolové částice a určuje jejich velikost pomocí snímání intenzity dopředu odraženého světla. Přesněji řečeno, vzorkový objem vzduchu vstupuje do prostoru mezi dva hroty, kde je prosvětlován paprskem heliovo-neonového laseru vycházejícího z jednoho z hrotů. Když se částice dostane do prostoru paprsku, rozptýlí ho a toto rozptýlené světlo dopadá na druhý z hrotů, kde je zaostřeno na dva fotodetektory. Dle intenzity rozptýleného světla dopadajícího na fotodetektory se následně určí velikost částice. Přístroj tak zaznamenává početní koncentraci a zároveň slouží k určování velikostní distribuce částic. Často řešeným problémem této metody je však vyšší nepřesnost (např. kolem 0,5 %), které vyplývají z více dalších problémů s odběrem přesného objemu vzduchu atd. Proto se případně používají korekční algoritmy. Princip odrazu heliovo-neonového paprsku směrem dopředu je však využíván i u dalších metod jako např. u PCSV čítačů a dalších [22].

Dalším odvětvím optických metod jsou měřicí přístroje využívající schopnost některých aerosolových částic absorbovat světlo. Skupina aerosolových částic s výraznou absorpční schopností je černý uhlík (BC), který často tvoří značnou část aerosolových částic. Přestože je světelná absorpce velice obtížně měřitelný parametr, existuje několik způsobů, jak je měřena. Používané techniky jsou např. rozdílová metoda, založená na rozdílech mezi odraženým a zaniklým světlem, z čehož je vyvozena informace o množství absorbovaného světla. Další používanou technikou je metoda využívající filtry, kde je měřen světelný útlum způsobený částicemi zachycenými na filtru, dále metody tzv. fotoakustické spektroskopie a metoda založená na tzv. laserem indukovaném žhavení (LII). Poslední dvě zmíněné metody měří částice BC pomocí ohřevu těchto částic, což je způsobeno právě vstřebáváním světla [20].

Prvním za zmínku stojícím typem přístrojů využívajícím absorpci světla aerosolovými částicemi je tzv. spektrometr. S tímto přístrojem se lze setkat také pod označením reflektometr nebo kouřový filtr. Jde o zařízení, které je využíváno pro monitoring výfukových plynů a pracuje na principu vyhodnocování poměru mezi odraženým světlem nad exponovaným a neexponovaným papírovým filtrem, z čehož je následně určena koncentrace zachycených částic [20].

Další ze zařízení, které slouží primárně k vyhodnocování koncentrace BC a částic absorbujících světlo, jsou aethalometry. Tato zařízení pracují na podobném principu jako spektrometry, ale využívají filtr z křemíkových vláken. Zařízení měří útlum světla po průchodu filtrem s obsaženými částicemi, podobně jako u spektrometru. Aethalometry nepatří mezi nejrozšířenější metody měření koncentrace aerosolových částic, ale dle záznamů jsou využívány např. pro laboratorní účely [20].

Velice specifickou, ojedinělou metodu je metoda zvaná zkráceně jako PASS. Zkratka, která ve volném překladu z angličtiny znamená „fotoakustický senzor sazí“ označuje přístroj, který využívá schopnosti především uhlíkatých a dalších světlo pohlcujících částic absorbovat světelné paprsky. Tyhle částice jsou obsaženy ve vzorcích vzduchu, které jsou následně vystavovány světlu, které je absorbováno částicemi. Částice se absorpcí světla zahřívají a teplo, které je následně vedeno z částic do okolního vzduchu vytváří akustické tlakové vlny, které jsou rozpoznávány mikrofonom. Z registrovaného signálu se následně určuje koncentrace částic [20].

Základním principem metody LII je žhavení uhlíkatých aerosolových částic laserem, který částice zahřívá pod teplotu sublimace uhlíku, což zjednodušeně způsobuje jejich rozklad. Rozklad částic je monitorován speciálním zařízením a následně je opět určena výsledná početní koncentrace a odhadovaná velikost částic [20].

2.2.8 Metody využívané ČHMÚ k měření částic PM₁₀ a PM_{2,5}

ČHMÚ používá k měření aerosolových částic různé metody. Konkrétní měřicí lokality mohou obecně pokrývat různé měřicí programy, například může stanice spadat k AIM, ale zároveň se zde může provádět i manuální měření. Tato podkapitola obsahuje výčet metod používaných stanicemi automatizovaného měřicího programu k měření částic PM₁₀ a PM_{2,5}. Jak bylo zmíněno v podkapitole týkající se legislativy, pro tyto velikostní frakce platí imisní limity, a proto je jim také věnována největší pozornost.

Na území ČR se v současné době nachází 140 aktivních měřicích stanic automatického měřicího programu a další 4 stanice kombinovaného měření, jejichž data spravuje ČHMÚ. Dle informací uvedených na webu ČHMÚ je na 139 stanicích z celkového počtu 144 stanic měřena frakce PM₁₀. Z toho je na 40 z nich využívána metoda optoelektronická, na 97 metoda radiometrická a na pouhých dvou měřicích stanicích je využívána metoda oscilačních mikrovah TEOM. Částice PM_{2,5} jsou měřeny na 99 stanicích z celkového počtu 144 stanic. Na 59 z těchto stanic se měří PM_{2,5} metodou radiometrickou a na 40 metodou optoelektronickou. Dle záznamů dochází průběžně na stanicích v posledních několika letech k nahrazování radiometrické metody metodou optoelektronickou nejspíše na základě nižší technické náročnosti a vyšší přesnosti metody [27].

3 Praktická část

Závěrečnou částí této práce je experimentální praktická část, která je tvořena měřením koncentrace aerosolových částic v oblasti budovy A3 areálu VUT FSI v Brně pomocí impaktoru a následným gravimetrickým stanovením, analýzou dat naměřených automatizovanou měřicí stanicí ČHMÚ Brno-Arboretum a finálním vyhodnocením naměřených a sledovaných dat. Mezi sledovaná data patřily hodinové záznamy hmotnostní koncentrace částic frakcí PM₁₀ a PM_{2,5}, teploty ve výšce 2 m nad zemí, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku. Data ze stanice v Arboretu byly sledovány jednak za účelem potvrzení relevance dat naměřených vlastním měřením, jednak také z důvodu nutnosti uvést hodnoty teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku mezi vstupní parametry ve výstupním softwaru k měřicímu zařízení.

3.1 Popis měřicí aparatury impaktoru a postup měření

K měření hmotnostní koncentrace aerosolových částic byl využíván přístroj zvaný impaktor, konkrétně model Dekati® Low Pressure Impactor DLPI+. Tento přístroj slouží k vzorkování vzduchu s obsaženými aerosolovými částicemi a určení velikostní distribuce částic. Velikostní rozsah měřitelných částic je 9,79 až 0,0147 μm . DLPI+ je impaktor kaskádového typu, protože vzduch, který je nasáván vývěvou a prochází přes vstupní trubici do impaktoru dále prochází postupně 14 měřicími patry, na kterých jsou usazovány částice sestupně dle aerodynamického průměru⁵. V tab. 3.1 lze vidět průměr částic, které projdou jednotlivými patry a tlak v jednotlivých patrech. Z tabulky vyplývá, že na patře 15, tedy nejvyšším patře následujícím po vstupu

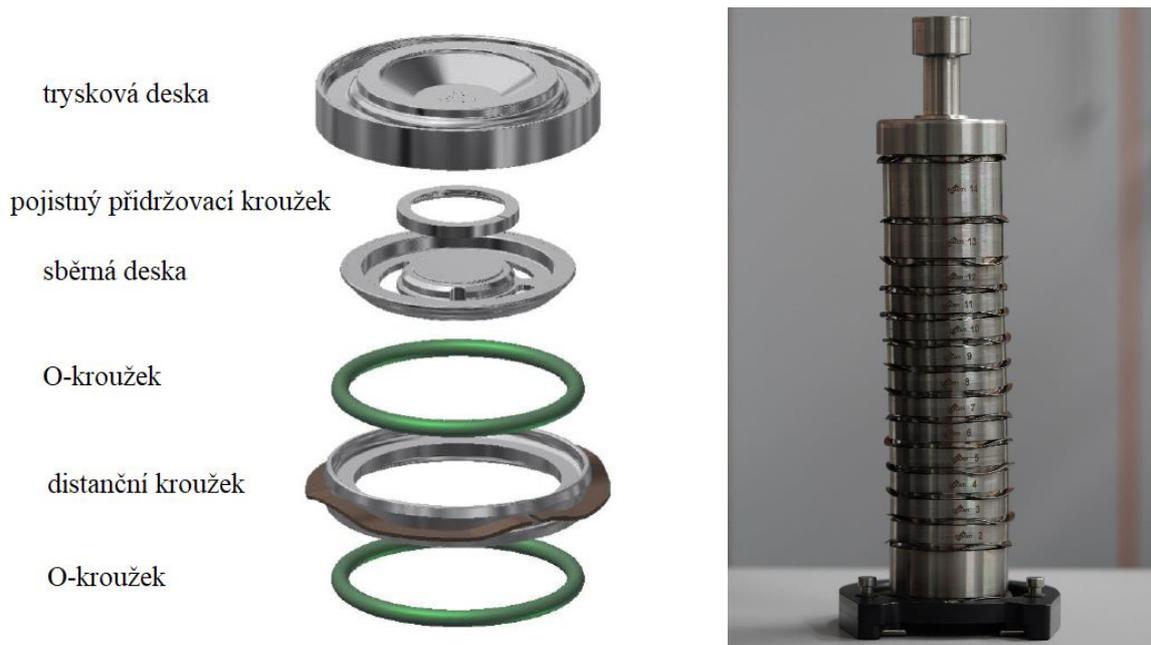
Tab. 3.1 Technická specifikace pater impaktoru.

patro	D50% (μm)	tlak (kPa)
2	0,0147	4,00
3	0,0306	9,78
4	0,0552	22,85
5	0,0941	39,45
6	0,152	68,30
7	0,252	88,48
8	0,377	97,03
9	0,596	99,56
10	0,938	100,45
11	1,62	101,00
12	2,45	101,18
13	3,62	101,25
14	5,32	101,30
15	9,79	101,32
vstup		101,33

⁵ Aerodynamický průměr je definován jako průměr koule o hustotě 1 kg/m³ za běžných podmínek. Používá se z důvodu nemožného určení průměru částic vzhledem k jejich velice nepravidelnému tvaru.

jsou zachyceny částice o středním průměru 9,79–5,32 μm . Střední průměr vyjadřuje průměrnou velikost částice z celého velikostního rozmezí částic, které mohou být usazeny v daném patře. Částice, obsažené ve vzduchu, proudí přes vstup a postupně procházejí patry impaktoru. Nominální průtok vzduchu tímto impaktorem je 10,15 l/min [30].

Každé patro (viz. obr. 3.1) je složeno z tzv. tryskové desky, což je nejvýše umístěný díl patra. Tato deska má ve svém středu jednu až několik děr o takovém průměru, aby v závislosti na průtoku vzduchu bylo dosaženo zachycení částic o požadovaném aerodynamickém průměru pro dané patro. V nejvyšším, patnáctém patře je trysková deska s jedním otvorem a zachytí se zde částice o aerodynamickém průměru 9,79–50 μm . S klesajícími patry klesá průměr děr, protože postupně klesá i požadovaná velikost zachycených částic. Počet děr na patře se však zvyšuje se snižujícími se patry, protože je to nutné pro dosažení daného průtoku. Vzduch s částicemi proudí těmito otvory a vstupuje do prostoru mezi tryskovou desku a sběrnou desku. Sběrná deska je tvarována tak, aby se přímo před otvory, kterými proudí vzduch, nacházela kruhová stěna, na které je připevněna aluminiová folie upevněná pojistným kroužkem. Kolem kruhové stěny je volný prostor, kudy prochází proudící vzduch. Poslední dominantní součástí každého patra je distanční kroužek, který tvoří spodní část patra a jsou v něm usazeny obě desky. Po obvodu kroužku se nachází zvlněný plech, který je po naskládání všech pater na sebe stlačen a zajišťuje zpevnění a těsnění každého patra. Pro dokonalé utěsnění jsou umístěny gumové těsnící tzv. O-kroužky mezi jednotlivá patra a také mezi desky a distanční kroužek na každém patře [30].



Obr. 3.1 Model jednotlivých součástí patra impaktoru DLPI+ a fotografie poskládaných pater impaktoru [30].

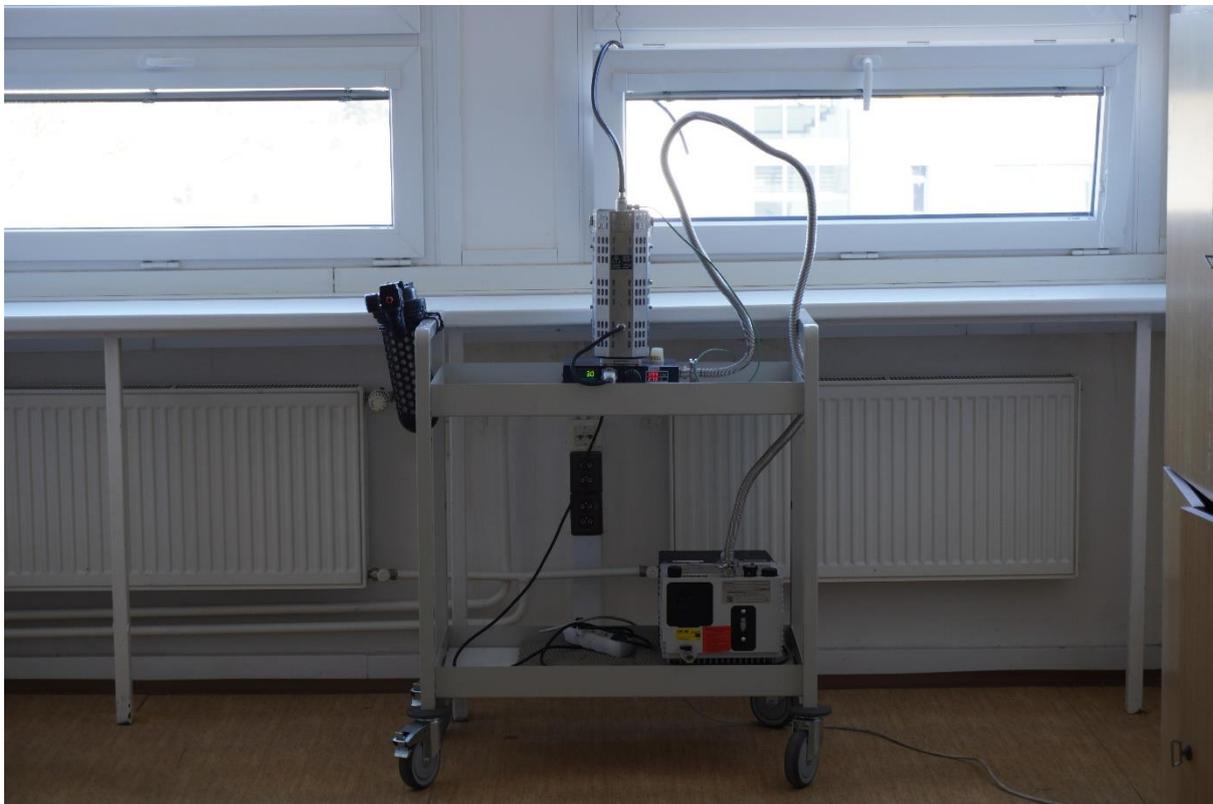
Způsob, jakým se částice obsažené ve vzduchu usazují v patře, je založen na setrvačnosti částic v proudícím vzduchu. Vzhledem k tomu, že je vzduch do impaktoru vsáván vysokým podtlakem (jak lze vidět v tab. 3.1, v nejnižším patře nacházejícím se těsně za vývěvou je hodnota tlaku 4 kPa, což je velmi blízko vakuu), dosahují částice obsažené v proudícím vzduchu vysokých rychlostí. Když vzduch s částicemi vstoupí do patra, jeho rychlost se ještě zvýší, protože protéká přes velmi úzké otvory. Pod těmito otvory je umístěna kruhová stěna sběrné

desky, na které je umístěna aluminiová folie, na níž je nanesena velmi tenká vrstva vazelíny. Vzduch tedy vysokou rychlostí vtéká do prostoru patra, ale je ihned nucen změnit směr a obtéct desku s folií. Při procesu obtékání se částice ve vzduchu obsažené svojí setrvačností vychylují z trajektorie proudění vzduchu, protože jsou těžší než molekuly vzduchu. Vychýlené částice narážejí na kruhovou stěnu s aluminiovou folií, kde jsou zachyceny na lepkavou vrstvu vazelíny. Tímto způsobem se postupně oddělují největší a nejtěžší částice v horních patrech až po nejmenší částice v patrech nejspodnějších. Rozložení otvorů v každém patře lze pozorovat na obr. 3.3.

Vzorkování pomocí impaktoru v oblasti budovy A3, konkrétně v místnosti 731 odpovídající výšce 23,1 metru nad zemí, bylo prováděno od 8. 4. 2021 17:00 do 26. 4. 2021 10:00. Přístroj se nacházel u otevřeného okna a ke vstupu byla připojena hadice, která vedla ven z okna (viz. obr 3.2). K nasávání vzduchu do přístroje byla použita vývěva Soegvac® SV25 D. Impaktor byl místo běžného svrchního krytu nahrazen speciálním vyhřívacím krytem, který lze nastavit tak, aby udržoval při měření v přístroji stálou teplotu. Nastavená pracovní teplota v impaktoru byla 30 °C. Důvodem je možnost ovlivnění přesnosti měření vlhkostí vzduchu, kterou částice mohou absorbovat, a tím zvýšit dočasně svojí hmotnost. Při 30 °C by měl být zajištěno odpařování veškeré vlhkosti v dostatečném měřítku, aby měření nebylo tímto faktorem ovlivněno. Na obr. 3.2 lze vidět měřicí sestavenou měřicí aparaturu při měření.

3.2 Gravimetrické stanovení hmotnostní koncentrace naměřených částic

Po tom, co byly částice vzorkovány impaktorem, se gravimetricky určí hmotnost každé folie. Folie se zváží a její hmotnost se porovná s její hmotností před měřením, z čehož je následně odečtena hmotnost částic zachycených na daném patře. K měření hmotnosti folie před vzorko-



Obr. 3.2 Fotografie měřicí aparatury.

váním i po něm se používají velmi přesné analytické váhy, které měří hmotnost s přesností na setiny miligramu. Naměřené hodnoty se potom spolu s dalšími vstupními parametry, mezi které patří hlavně zmíněné sledované hodnoty teploty, tlaku a relativní vlhkosti ze stanice Brno-Arboretum, zadají do výpočetního souboru k impaktoru. Tento soubor následně vyhodnotí zadané parametry a naměřené hodnoty a na základě toho určí výslednou hmotnostní koncentraci, aproximuje početní koncentraci a vytvoří další výstupy měření.

Samotný proces vážení folií probíhá v co nejčistším prostředí, protože i prach a aerosolové částice, které by se mohly zachytit na folie při vážení, mohou ovlivnit výsledky měření. Pro manipulaci s foliemi byla použita pinzeta, protože lidský otisk prstu by i na malé části filtru mohl způsobit změnu hmotnosti. Během první fáze vážení, tedy před měřením, byly folie nejprve natřeny vazelínou, která slouží pro zachycování částic v impaktoru. Pro nanesení tenké, souvislé vrstvy byla využita směs vazelíny s xylenem. Xylen je organické rozpouštědlo, které spolu s vazelínou v hmotnostním poměru 1:20 (vazelína:xylen) vytvoří méně viskózní směs, kterou lze již štětcem jednodušeji nanést v tenké vrstvě na folie. Vzhledem k tomu, že xylen je velice těkavá látka, nechají se folie několik minut v klidu, aby se všechen xylen odpařil. Tímto způsobem zůstane na folii slabá vrstva vazelíny, která je dostačující pro zachycování částic.

Po nanesení vazelíny se folie postupně zvaží na analytických vahách. Jak bylo zmíněno, použité analytické váhy měřily hmotnost s přesností na setiny miligramu. Protože přesnost těchto vah může ovlivnit mnoho faktorů a váha při několika váženích může naměřit různé hodnoty, je nutné počítat s tzv. směrodatnou odchylkou, která je pro váhu uvedena výrobcem. Pro tuto váhu je směrodatná odchylka σ rovna 0,02 mg. Směrodatná odchylka vyjadřuje statisticky možnou nepřesnost přístroje. Znamená to, že v 68,27 % měření se naměřená hmotnost liší od skutečné o $\pm\sigma$, tedy o $\pm 0,02$ mg. Pro 2σ platí, že v 95,45 % měření se hodnoty liší o $\pm 0,04$ mg a pro 3σ toto pravidlo platí v 99,73 % případů. Proto je pro maximální přesnost nutné vážení



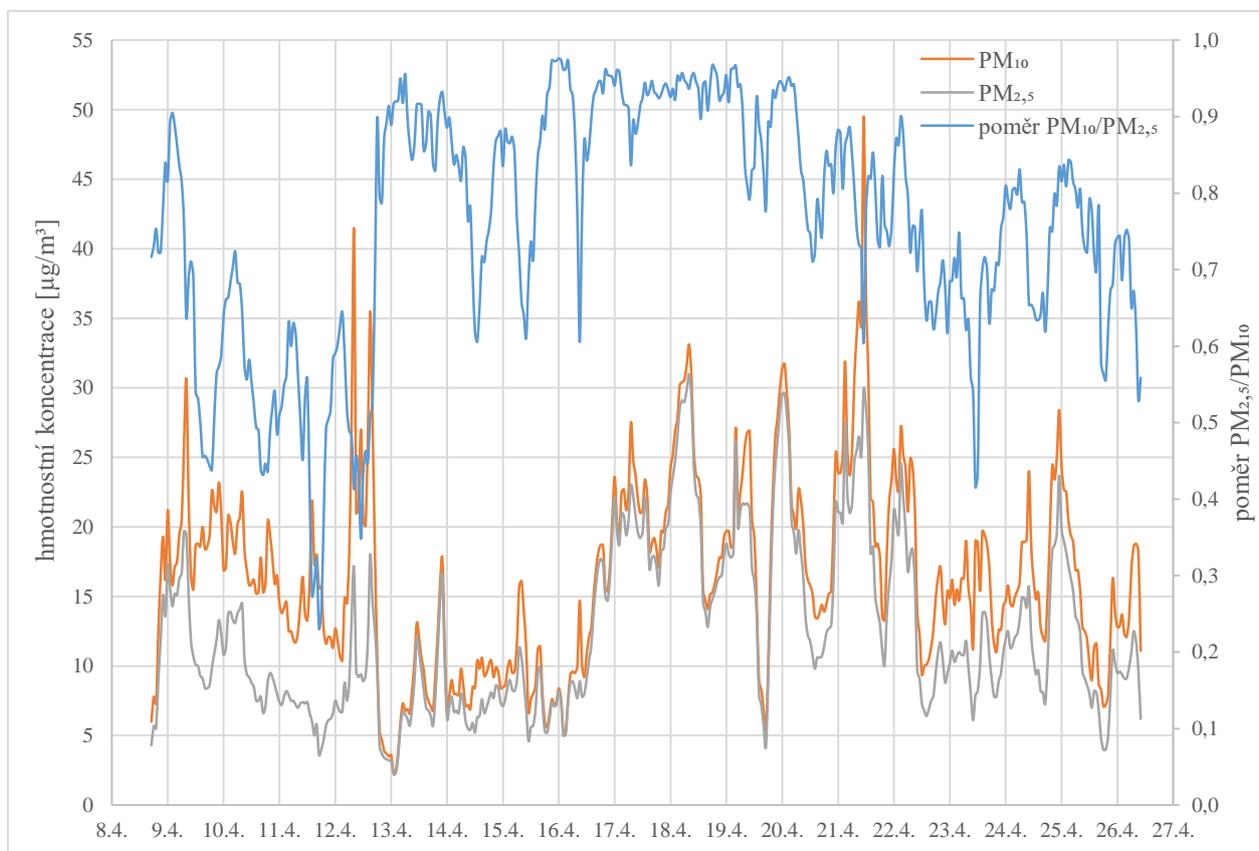
Obr. 3.3 Fotografie jednotlivých pater impaktoru.

každé folie opakovat. Pro optimální přesnost tohoto experimentu bylo zvoleno provést minimálně 4 vážení každé folie. Z těchto 4 naměřených hodnot byla následně vytvořena průměrná hodnota, která je považována za výslednou. Stejný postup byl aplikován i při vážení filtrů po měření [29].

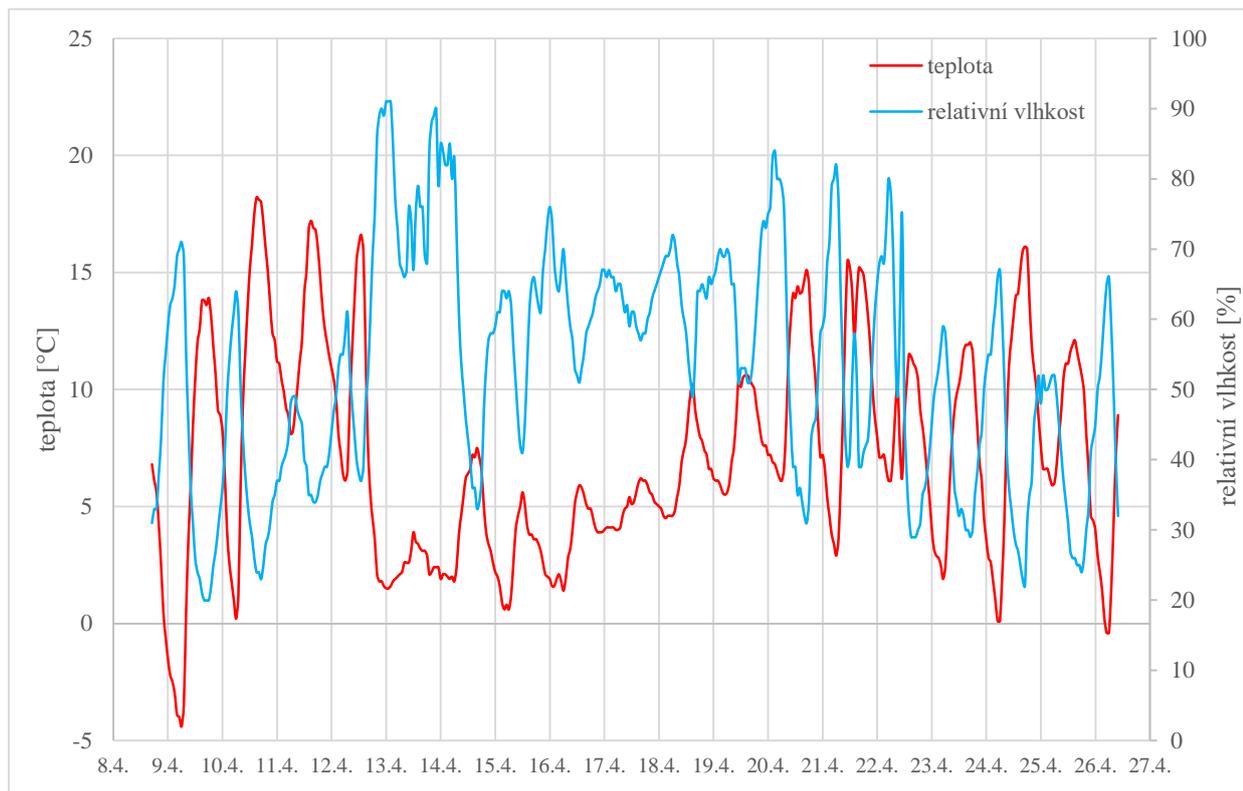
3.3 Výsledky a vyhodnocení měření

Po úspěšném měření a vzorkování aerosolových částic impaktorem, které trvalo necelých 18 dní, přesně 425 hodin, následovalo zmiňované měření hmotnosti folií a vyhodnocování výsledné koncentrace, velikostní distribuce zachycených částic a vyvození dalších výsledků. Stejnou dobu probíhalo také sledování dat na stanici ČHMÚ Brno-Arboretum. Vzhledem k nedostupnosti dat atmosférického tlaku na stanici v Arboretu byla tato data zaznamenávána ze stanice v Tuřanech. Jak bylo uvedeno, zaznamenávané meteorologické hodnoty sloužily pro zpřesnění výsledků určených pomocí výpočetního souboru k impaktoru. Přestože na výsledné koncentrace a velikostní distribuce měly pouze nepatrný vliv, bylo nutné je zakomponovat do výsledných výpočtů. Za celé měřicí období byly zaznamenány hodnoty vykreslené v grafech na obr. 3.4 až 3.6.

Začátek sledovaného období představoval z hlediska koncentrací částic velice mírnou část. Jak lze vyčíst z grafu 3.4, koncentrace PM_{10} se pohybovaly poměrně stabilně několik dní mezi hodnotami 10 až 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Koncentrace $PM_{2,5}$, které se v tomtéž období pohybovaly mezi 5 a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, způsobily ustálení poměru koncentrací $PM_{2,5}/PM_{10}$ kolem 0,5–0,7. Do 13. 4. bylo tedy běžné, že koncentrace PM_{10} byly někdy až dvojnásobně vyšší oproti koncentracím $PM_{2,5}$.



Obr. 3.4 Graf časové závislosti sledované hmotnostní koncentrace frakcí PM_{10} a $PM_{2,5}$ naměřených na stanici Brno-Arboretum a poměru $PM_{2,5}/PM_{10}$.



Obr. 3.5 Graf časové závislosti sledovaných hodnot teploty a relativní vlhkosti naměřených na stanici Brno-Arboretum.

Příčinu můžeme hledat například u stavu počasí v tomto období. Mezi 10. a 13. dubnem nastalo výrazné oteplení, jak lze pozorovat na grafu 3.5. Na nárůst teplot mohly reagovat například rostliny, které začaly kvést, čímž se do ovzduší dostával pyl, který jakožto zástupce větších částic mohl přispět ke zvýšení koncentrace PM_{10} , a tím i ke snížení poměru $PM_{2,5}/PM_{10}$.

Je možné, že i snížení vlhkosti spojené se zvýšením teploty způsobilo vyšší prašnost, protože vítr mohl snadněji rozvířit částice půdy z polí apod. Tento proces mohl opět napomoci zvýšení koncentrace větších částic.

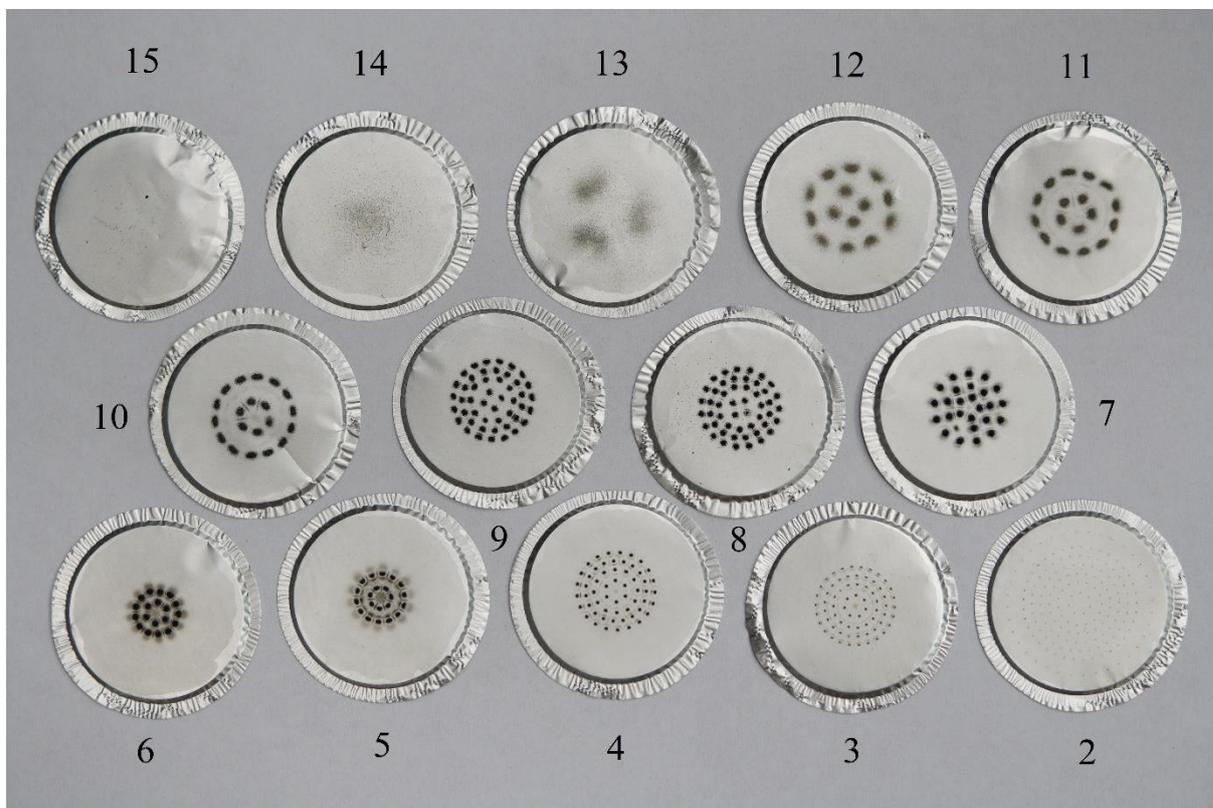
Důkazem, že se z úvodu jednalo o velice čisté období, je výrazný pokles koncentrací obou frakcí v období kolem 13. 4., kde obě frakce dosáhly svého minima za celé sledované období. Dne 13. 4. v 1:00 klesla koncentrace PM_{10} až na $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $PM_{2,5}$ na $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Takhle nízké hodnoty jsou obecně, natož v městských lokalitách, považovány za velmi neobvyklé. Výraznost tohoto propadu zvyšuje opačný extrém, tedy skokový nárůst koncentrace především PM_{10} , který tomuto propadu předcházel. O důvodu lze opět pouze polemizovat, je možné, že roli sehrál vítr, který mohl dosahovat velmi nízkých rychlostí, čímž usnadnil měřicí proces, protože částice nebyly unášeny větrem a vzorkovací přístroje je mohly snadněji odebírat. Vítr také způsobuje víření půdních částic, což naopak koncentraci zvyšuje. Tyto domněnky zakládám i na poznatcích, které jsem získal během sledování. Vyskytlo se několik případů, kdy se při výrazných změnách rychlosti a směru větru změnily i koncentrace částic.

Interval s nízkými koncentracemi trval cca 3 dny, do 16. 4. Tento interval nastal v souladu s výrazným poklesem teploty a s nárůstem vlhkosti. Zmíněného 13. 4. v Brně přšelo, což se projevilo i na křivce vlhkosti a také především na tom, že déšť zachytil část aerosolových částic a vzduch na určitou dobu vyčistil. V tomto čistším tří denním období s přeháňkami a nižšími teplotami se také výrazně změnil poměr $PM_{2,5}/PM_{10}$. Jak lze vidět v grafu na obr. 3.4, poměr frakcí se toto období drží nad hodnotou 0,8, místy až k 0,9. Výrazně převažující výskyt

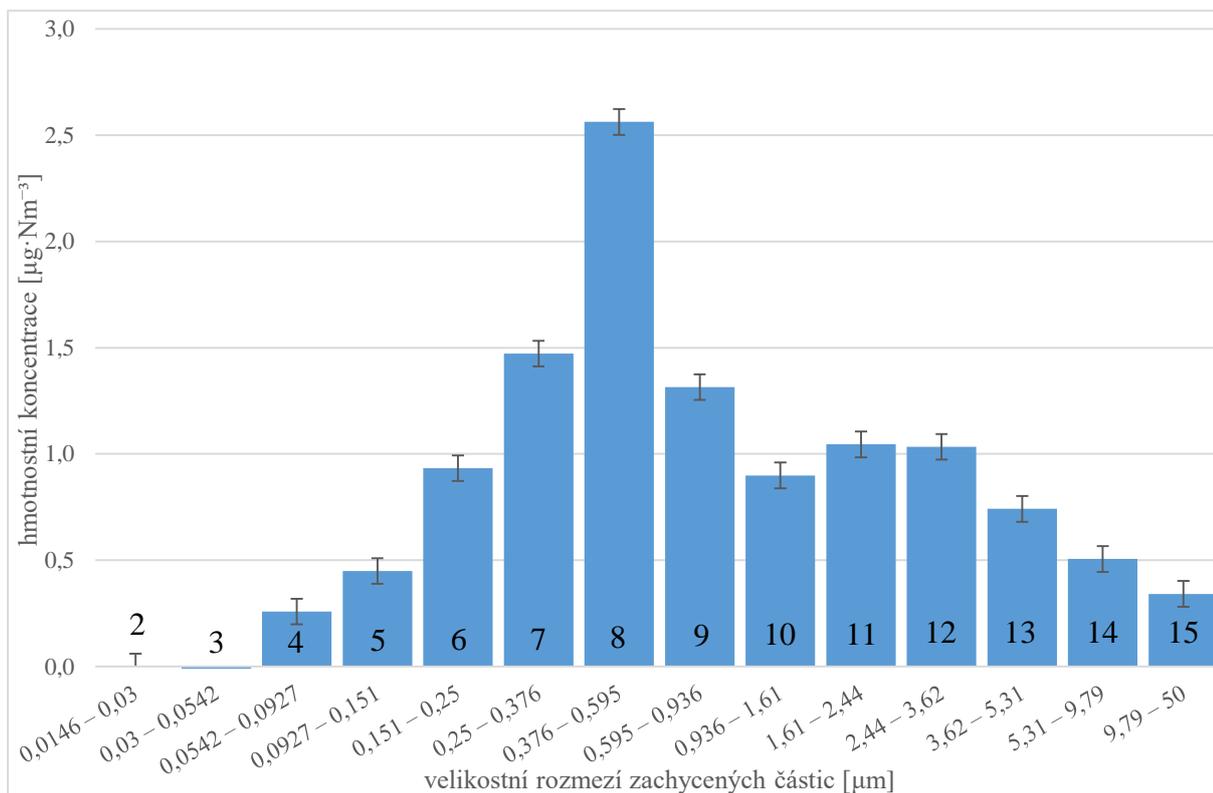
menších částic může být vysvětlován například nižšími teplotami, na základě kterých se začalo v domácnostech opět více topit. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.4.2, částice vzniklé spalováním fosilních paliv, ale i dřeva, patří převážně k menším částicím. Zvýšení poměru mohlo přispět také přerušení kvetení rostlin, tím pádem snížení výskytu pylových a dalších rostlinných částic.

Zbývající sledované dny již docházelo k postupnému oteplování, i když noci byly stále chladné. S rostoucími teplotami postupně opět klesal poměr $PM_{2,5}/PM_{10}$ a pohyb obou koncentrací byl vcelku nepravidelný. Obě koncentrace po zbytek měření kolísaly mezi 5 a $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Maximum pro koncentraci částic $PM_{2,5}$ nastalo dne 18. 4., kdy se hodnota vyšplhala na $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dne 21. 4. nastalo maximum pro koncentraci frakce PM_{10} , a to $49,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Záznam atmosférického tlaku nenasvědčuje tomu, že by výkyvy v rozmezí cca 12 hPa, které nastaly v průběhu sledovaného období, nějak výrazně ovlivňovaly koncentraci aerosolových částic.

Ze zaznamenaných meteorologických hodnot byly vytvořeny průměrné hodnoty, které byly zadány do výstupního souboru k impaktoru. Jak bylo již zmíněno, hodnoty ovlivní výslednou koncentraci opravdu velmi nepatrně, data slouží spíše pro zpřesnění informací o vzduchu vstupujícím do impaktoru. Po gravimetrickém stanovení hmotnosti byly odečtené hmotnosti naměřených částic (viz. obr. 3.7) také zadány do výpočetního souboru. Primárním výstup z měření představuje obr. 3. 8., kde se nachází graf vyobrazující příspěvky jednotlivých pater k celkové naměřené hmotnostní koncentraci. Na nejzatíženější patře (8) se nacházelo $0,57 \text{ mg}$ částic, které tvořily 22,14 % z celkové naměřené hmotnostní koncentrace, a to $2,56 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ z celkových $11,56 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Pro porovnání: průměrná váha lidského vlasu se pohybuje cca mezi 0,15 a 0,23 mg na 1 cm délky. V grafu lze u každé hodnoty vidět chybové úsečky, které vyjadřují rozmezí, ve kterém se může nacházet reálná hodnota vzhledem k nepřesnostem způsobeným vážením na analytických vahách. Relativní chyba vyjádřená chybovými úsečkami je určena jako $\pm 0,23 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Na folii prvního patra bylo z hmotnostního hlediska tak málo částic,



Obr. 3.7 Fotografie folií se zachycenými částicemi.



Obr. 3.8 Graf vyjadřující příspěvek jednotlivých pater k celkové hmotnostní koncentraci.

že gravimetrickým stanovením byla určena hmotnost rovna 0. Pro přesnější určení jejich hmotnosti by bylo potřeba použití přesnějších analytických vah. Je však možné, že reálná hmotnost by byla měřitelná i použitými vahami, ale možné odchylky při vážení způsobily, že výsledná hmotnost vyšla nulová. Podobný případ nastal i u druhého nejmenšího patra, kde naměřená hmotnost vyšla dokonce $-0,02$ mg. Důvodem mohlo být opět sečtení odchylek takovým způsobem, že hmotnost filtru po expozici byla nižší, přestože obsahoval zachycené částice. Je také možné, že se na těchto foliích i během expozice ještě odpařil nějaký malý zbytek xylenu, což by způsobilo pokles hmotnosti [31].

V tab. 3.2 lze vidět porovnání průměrných sledovaných a naměřených hodnot. U naměřených hmotnostních koncentrací se, vzhledem k parametrům impaktoru, nejedná přesně o frakci PM_{10} a $PM_{2,5}$, ale o $PM_{9,79}$ a $PM_{2,42}$. Rozdíl v jednotkách koncentrace je způsoben tím, že pro naměřené hodnoty je koncentrace přepočítána pro tzv. normální podmínky (p_{atm} a $t = 0$ °C), zatímco sledované hodnoty jsou vztaženy k určitým uváděným meteorologickým hodnotám. Rozdíl mezi naměřenými a sledovanými koncentracemi může být z určité části způsoben použitým typem měřicí metody. Větší vliv na rozdílnost koncentrací mají však lokální zdroje znečištění. Vyšší hodnoty naměřené stanicí v Arboretu mohou být způsobeny např. znečištěním z nedaleké čtyřproudové silnice, oproti čemuž klidnější lokalita areálu FSI představuje oblast méně znečištěnou.

Tab. 3.2 Tabulka průměrných sledovaných a naměřených hodnot.

	Arboretum	vlastní měření
hmotnostní koncentrace PM_{10}	16,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11,12 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$
hmotnostní koncentrace $PM_{2,5}$	12,54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8,83 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$
poměr $PM_{2,5}/PM_{10}$	0,76	0,80

ZÁVĚR

Vzhledem k uvedeným dopadům aerosolových částic na lidské zdraví, životní prostředí a klima je jasné, že problematika těchto částic je čím dál více aktuální a že by se lidstvo mělo zaměřovat na monitoring částic, které jsou produkovány nejen lidskou činností. Množství metod sloužících k měření imisí aerosolových částic dokazuje, že problémy způsobené jemnými částicemi v ovzduší nejsou přehlédnutelné a že se lidstvo aktivně zabývá jejich řešením. Všechny měřicí metody různých typů, jež jsou popsány ve druhé kapitole, jsou nebo byly využívány pro monitoring čistoty ovzduší. Mnoho dalších metod je však vyvíjeno a testováno v laboratorním prostředí, aby v budoucnu případně mohly nahradit stávající metody.

Také by mělo být v obecném zájmu snažit se co nejméně zatěžovat ovzduší emisemi znečišťujících látek, přestože v mnoha případech je obtížné hledat alternativu za určité průmyslové a další procesy, které často zapříčiňují vznik těchto částic. Hledání alternativních postupů v průmyslu by však mohl být užitečný nástroj pro snižování produkce aerosolových částic. Jak vyplývá z první kapitoly, vzniku velké části aerosolových částic přítomných v atmosféře však nelze zabránit, protože pochází z přírodních zdrojů, které nejsou regulovatelné. Ovšem co se týče vlivu aerosolových částic na zdraví a životní prostředí, patří antropogenně vzniklé částice mezi výrazně nebezpečnější.

Experimentální část práce dokazuje, že měřit koncentraci částic v ovzduší vyžaduje nejen specifickou výbavu, ale také v případě měření impaktorem i delší časový úsek. Metoda je vhodná pro přesné měření koncentrace a také pro poměrně detailní určení velikostní distribuce zachycených částic, ale vzhledem k především časové náročnosti je nepoužitelná pro imisní monitoring v reálném čase. Přesnost naměřených dat a velmi malý prostor pro vznik odchylky však dokazuje, proč je tato metoda považována za referenční.

Z porovnání naměřených a sledovaných hodnot lze usoudit, že lokální zdroje přítomné v oblastech měřicích stanic přímo ovlivňují naměřené koncentrace a výrazně se promítají do čistoty ovzduší daných lokalit. Je zřejmé, že čím hustší bude monitorovací síť, tím kvalitnější a přesnější informace o čistotě ovzduší budeme mít, a tím přesněji bude možné například určit i původ určitého znečištění. Zvyšování kvality, efektivity a přesnosti imisního monitoringu může pomoci např. při překročení limitů nebo také při řešení smogových situací a s tím spojenou ochranou obyvatelstva.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BRANIŠ, Martin, Iva HŮNOVÁ a Univerzita Karlova. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1. Dostupné také z : <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:0f1cb170-30b5-11e4-90aa-005056825209>
- [2] US Environmental Protection Agency. *Particulate Matter (PM) Pollution* [online]. [citováno 3. 02. 2021]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [3] CENIA a Ministerstvo životního prostředí. *Integrovaný registr znečišťování - IRZ* [online]. [cit. 28.02.2021]. Kapitola Polétavý prach. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/85>
- [4] PAVEL MIKUŠKA. *Atmosférické aerosoly*. 2.11.2015. [cit.11.02.2021] Dostupné z WWW: <https://is.muni.cz/el/sci/podzim2015/C5150/um/Mikuska.pdf>
- [5] BUZÍK, J. *Mechanismy atomizace kapalných paliv*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. – 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Broukal.
- [6] GRIFFIN, R. J. (2013) *The Sources and Impacts of Tropospheric Particulate Matter*. *Nature Education Knowledge* 4(5):1 [citováno 24.02.2021]. Dostupné z: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-sources-and-impacts-of-tropospheric-particulate-102760478/>
- [7] *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*, First Edition. Edited by Claudio Tomasi, Sandro Fuzzi, and Alexander Kokhanovsky. © 2017 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Published 2017 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. [cit. 28.02.2021]. Dostupné z: https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527336451_c01.pdf
- [8] KOROSEC Marko. *Skies and snow turn orange as massive Saharan Dust load spreads across south-central Europe this weekend*. Severe Weather Europe [online]. 6.02.2021. [cit. 28.02.2021]. Dostupné z: https://www.severe-weather.eu/europe-weather/saharan-dust-orange-snow-mk/?fbclid=IwAR2thBUIDoI_jvCFDUAIIAIIQN8_rNSxOhHnk-bpyuVxIsjhQWP-BBnEzjeQM
- [9] Werner Joel, Suzannah Lyons. *The size of Australia's bushfire crisis captured in five big numbers*. ABC science [online]. 4.03.2020. [cit. 05.03.2021]. Dostupné z: <https://www.abc.net.au/news/science/2020-03-05/bushfire-crisis-five-big-numbers/12007716>
- [10] Mgr. Antonín Balnar. *Meteorologie* [online]. 2001. [cit. 06.03.2021]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/index.htm>
- [11] M. KING, Hobart. *Volcanic Ash*. Geology.com [online]. [cit. 06.03.2021]. Dostupné z: <https://geology.com/articles/volcanic-ash.shtml>
- [12] ECK, Allison. *In the Past 24 Hours, 60 Tons of Cosmic Dust Have Fallen to Earth*. NOVA PBS [online]. 13.03.2015. [cit. 08.03.2021]. Dostupné z: <https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/in-the-past-24-hours-60-tons-of-cosmic-dust-have-fallen-to-earth/>
- [13] Zhang Ren-Jian, Ho Kin-Fai & Shen Zhen-Xing. *The Role of Aerosol in Climate Change, the Environment, and Human Health*, *Atmospheric and Oceanic Science Letters* [online]. 2012. [cit. 16.03.2021]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/16742834.2012.11446983>
- [14] Redakce North Carolina Climate Office. *Energy Transfer* [online]. [cit. 16.03.2021]. Dostupné z: <https://climate.ncsu.edu/edu/EnergyTransfer>

- [15] Redakce The Earth Observatory. *Aerosols: Tiny Particles, Big Impact* [online]. 2.11.2010. [cit. 17.03.2021]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page1.php>
- [16] Český hydrometeorologický ústav, Úsek kvality ovzduší. *Znečištění ovzduší na území České Republiky v roce 2018* [online]. V Praze, 2019. ISBN 978-80-87577-95-0. [cit. 20.03.2021]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/18groc/gr18cz/Obsah_CZ.html
- [17] WHO Working group. *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide* [online]. 13.01.2015. [cit. 20.3.2021] Dostupné z: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf
- [18] ČESKO. Zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021. [cit. 26. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonypro-lidi.cz/cs/2012-201>
- [19] BRZEZINA, Jáchym. *Imisní limity – co znamenají a jak je interpretovat* [online]. 23.8.2018. [cit. 27.03.2021]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/08/23/imisni-limity-co-znamenaji-a-jak-je-interpretovat/>
- [20] AMARAL, Simone, João DE CARVALHO, Maria COSTA a Cleverson PINHEIRO. An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere* [online]. 2015, roč. 6, č. 9, s. 1327–1345. ISSN 2073-4433. Dostupné z: doi:10.3390/atmos6091327
- [21] MIDWEST RESEARCH INSTITUTE. *Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/625/R-96/010a, 1999. Dostupné z: <https://www.epa.gov/amtic/compendium-methods-determination-inorganic-compounds-ambient-air>
- [22] KULKARNI, Pramod, Paul A. BARON a Klaus WILLEKE. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. Third Edition. Hoboken: Wiley, [2011]. ISBN isbn978-0-470-38741-2.
- [23] SAMLAC. *Atmospheric Aerosol Physics, Physical Measurements, and Sampling. Particle Mass Concentration Measurements* [online]. November 2018. [cit. 04.04.2021] Dostupné z: <http://samlac.uprrp.edu/wp-content/uploads/2018/12/Particle-Mass-Concentration-Measurements.pdf>
- [24] Thermo Scientific, 2013, PDM3700 Personal Dust Monitor and TEOM Technology, YouTube video. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=cQXHATeJlh4>
- [25] *Střední atmosféra, stratosféra a ozon*. KFA [online]. 10.10.1970. [cit. 06.03.2021] Dostupné z: <https://kfa.mff.cuni.cz/?p=155>
- [26] GORNER P., SIMON X., BÉMER D., a LINDÉN G. Workplace aerosol mass concentration measurement using optical particle counters [online]. *Journal of Environmental Monitoring*. 2012, 14, 420 – 428. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C1EM10558B>
- [27] Český hydrometeorologický ústav, Úsek kvality ovzduší. *Aktuální hodinový přehled dat z automatizovaných stanic* [online]. V Praze, 2019. ISBN 978-80-87577-95-0. [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web-generator/actual_hour_data_CZ.html
- [28] BRZEZINA, Jáchym. *Suspendované částice (PM) – otázky a odpovědi* [online]. 1.12.2018. [cit. 29.04.2021]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/01/suspendovane-castice-pm-otazky-a-odpovedi/>
- [29] Doc. Ing. URBAN Tomáš, Ph.D., *Základní statistiky v genetice kvantitativních znaků* [online]. 03.02.2015. [cit. 08.05.2021] Dostupné z: <http://user.mendelu.cz/urban/vsg3/kvantita/kvant1.html>

- [30] Dekati Ltd.. *DLPI+ User manual ver 1.4: Citace manuálu*. Uživatelský manual. Kangasala, Finsko. Dekati Ltd.. 2016. [cit. 08.05.2021]. 42 s.
- [31] Healthline Media a Red Ventures Company. *How much does your hair weigh?* [online]. 18.06.2020. [cit. 13.05.2021] Dostupné z: <https://www.healthline.com/health/how-much-does-hair-weigh#hair-weight>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
ρ	Hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
p	Tlak	Pa
T	Teplota	K, °C
c	Hmotnostní koncentrace	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
I	Intenzita záření	$\text{W} \cdot \text{m}^2$
μ	Hmotnostní absorpční koeficient	$\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
q	Plošná hustota	$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
V	Objem	m^3
S	Plocha	m^2
N	Četnost impulsů	s^{-1}
m	Hmotnost	kg
f	Frekvence	Hz
ϕ	Relativní vlhkost	%
r	Poloměr	m
ω	Úhlová rychlost	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
U	Elektrické napětí	V
Q	Elektrický náboj	C
-	Aerodynamický průměr	m
Q_V	Objemový průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Velikost částic $PM_{2,5}$ a PM_{10} v porovnání s lidským vlasem a se zrnkem písku [2]

Obr. 1.2 Schéma vzniku tryskových a filmových kapek při prasknutí vzduchové bubliny [7]

Obr. 1.3 Snímek částice vulkanického prachu z elektronového mikroskopu, zachycující výraznou členitost povrchu těchto částic [11]

Obr. 1.4 Schéma fyzikálně-chemických procesů, které mohou nastat při spalování částice práškového uhlí [7]

Obr. 1.5 Částice vzniklé spalováním fosilních paliv nasnímané elektronovým mikroskopem [7].

Obr. 1.6 „Cloud albedo effect“ nebo-li „efekt oblačného albeda“ se schématickým znázorněním množstvím průchozího a odraženého světla [15].

Obr. 2.1 Fotografie a stručný popis vzorkovacího zařízení DIGITEL DHA-80 [23].

Obr. 2.2 Schéma radiometrického měřicího přístroje Thermo Scientific FH 62 I-R [1].

Obr. 2.3 Schématický model hlavní části oscilačních mikrovah firmy Thermo Fisher Scientific [24].

Obr. 2.4 Schéma běžného složení přístroje využívající metodu QCM pro měření hmotnostní koncentrace částic v ovzduší [22].

Obr. 2.5 Schématické znázornění a princip fungování metody APM [22].

Obr. 2.6 Jednoduché schéma měřicí buňky optického čítače [26].

Obr. 3.1 Model jednotlivých součástí patra impaktoru DLPI+ a fotografie poskládaných pater impaktoru [30].

Obr. 3.2 Fotografie měřicí aparatury.

Obr. 3.3 Fotografie jednotlivých pater impaktoru.

Obr. 3.4 Graf časové závislosti sledované hmotnostní koncentrace frakcí PM_{10} a $PM_{2,5}$ ze stanice Brno-Arboretum a poměru $PM_{2,5}/PM_{10}$.

Obr. 3.5 Graf časové závislosti sledovaných hodnot teploty a relativní vlhkosti naměřených na stanici Brno-Arboretum.

Obr. 3.6 Graf časové závislosti sledovaných hodnot atmosférického tlaku naměřených na stanici Brno-Tuřany.

Obr. 3.7 Fotografie folií se zachycenými částicemi.

Obr. 3.8 Graf vyjadřující příspěvek jednotlivých pater k celkové hmotnostní koncentraci.

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Technická specifikace pater impaktoru

Tab. 3.2 Tabulka průměrných sledovaných a naměřených hodnot.