

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV PRO ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ



Vliv velikosti, umístění a návštěvnosti na kvalitu ovzduší
učeben

The effect of size, location and occupancy on air quality of
classrooms

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diplomantka: Kateřina Stupková
Vedoucí práce: prof. RNDr. Martin Braniš CSc.

září 2011

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím dále uvedené literatury, a souhlasím s jejím zapůjčením s podmínkou, že veškeré použité údaje budou řádně citovány.

V Praze dne

Kateřina Stupková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala prof. RNDr. Martinu Branišovi CSc., vedoucímu této diplomové práce, za odborné vedení, praktickou pomoc, cenné rady a připomínky.

Dále bych ráda poděkovala své rodině a všem blízkým, zvláště Jitce za podporu při studiu.

ABSTRAKT

Diplomová práce byla zaměřena na sledování velikostně rozlišené hmotnostní koncentrace aerosolu ovlivněnou velikostí, polohou a návštěvností učeben. Motivací k vypracování této práce je zkoumání vlivu aerosolů na zdraví lidí, kteří tráví ve vnitřním prostředí budov většinu svého času. Částice aerosolu mohou mít toxické, alergenní a karcinogenní účinky. Ve školách může zvýšená koncentrace ovlivňovat soustředěnost a pohodu studentů během výuky.

Cílem práce bylo popsat vliv venkovního ovzduší na ovzduší uvnitř budovy podle umístění jednotlivých učeben a zjistit vliv velikosti a návštěvnosti na koncentraci aerosolu. Dále se během zpracování posuzoval vliv vybraných mikroklimatických a meteorologických faktorů jako teplota, vlhkost, apod.

Měření probíhalo ve třech různě velikých posluchárnách jedné budovy Karlovy univerzity v Benátské ulici a současně venku. Období měření bylo rozděleno na kampaně do jednoho roku, které zahrnovaly tři až čtyři dny v každém měsíci. V průběhu kampaní byla sledována obsazenost učeben a přirozené větrání. K měření 24 hodinové koncentrace velikostně rozlišeného aerosolu byly používány impaktory Sioutas. Koncentrace jsme stanovili gravimetricky.

Koncentrace jemného aerosolu uvnitř budov v jednotlivých učebnách reagovala na množství aerosolu vně budovy. Frakce jemného aerosolu byly také ovlivněny umístěním učebny v budově. Vysoké korelace hrubého aerosolu v posluchárnách s množstvím lidí naznačují závislost koncentrace na obsazenosti a charakteru poslucháren. Závislost koncentrace hrubého aerosolu na obsazenosti ukazuje i srovnání koncentrace dnů s výukou se dny bez výuky, kde je vidět, že množství hrubého aerosolu v období bez aktivity lidí je mnohem nižší než v pracovních dnech. Mikroklimatické podmínky v námi zkoumaných učebnách nebyly zcela vyhovující.

ABSTRACT

This thesis is focused on investigation of size differentiated mass concentrations of aerosol in relation with size, location and occupancy of classrooms. The motivation to write this thesis was research of aerosol effects on human health. People in developed countries spend most of their time indoors thus indoor air quality affects their performance, well-being and health. The aerosol particles could be toxic, allergenic and carcinogenic. Higher concentration of particulate matter (PM) could affect performance and well-being of students during lessons.

The aims of the study were examination of outdoor/indoor relation of PM according to classrooms locations and occupancy effect on the PM concentrations. Microclimatic and meteorological factors (e.g. temperature, humidity) were also assessed.

Measurements were performed simultaneously in three size different classrooms in a building of Charles University in Prague (Benátská 2) and outside the building. The measurements were undertaken during one year, when each campaign contained 3 or 4 days of a month. The occupancy and changes in natural ventilation were monitored in each classroom during every campaign. Cascade impactors Sioutas were used for 24-hours PM collecting. The concentrations were determined gravimetrically.

Concentrations of fine particulates (FPs) indoors responded to concentrations outdoors. FPs was also influenced by a location of particular classroom in the building. High correlations of coarse particulates (CPs) in classrooms with a lot of people indicate dependence of concentration on occupancy and character of classroom. Linkage of the CPs concentrations with the occupancy confirmed differences between days with/without lessons. The concentrations during days without lessons (no human activity was undertaken in the classrooms) were lower than during days with lessons (usually weekdays). In some cases microclimatic condition (humidity) in the classrooms were not appropriate.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1. Úvod..... | 7 |
| 1.1 Aerosol..... | 8 |
| 1.2 Vliv částic aerosolu na zdraví lidí | 9 |
| 1.3 O vzduší vnitřního prostředí | 10 |
| 1.4 O vzduší vnitřního prostředí škol | 12 |
| 1.5 Cíle práce | 13 |
| 2. Metodika | 14 |
| 2.1 Lokalita | 14 |
| 2.2 Umístění posluhářen v rámci budovy a umístění měřících přístrojů | 14 |
| 2.3 Období měření | 16 |
| 2.4 Měřicí metoda..... | 16 |
| 2.5 Zpracování dat | 19 |
| 3. Výsledky | 20 |
| 3.1 Popisná statistika hmotnostních koncentrací | 20 |
| 3.2 Korelace hodnot PM_{10} a údajů z AIM | 21 |
| 3.3 Závislost hmotnostní koncentrace částic na obsazenosti učeben | 22 |
| 3.4 Hmotnostní koncentrace částic v závislosti na velikosti a umístění učebny | 25 |
| 3.5 Fyzikální faktory..... | 32 |
| 4. Diskuse..... | 35 |
| 5. Závěr..... | 39 |
| Použité zdroje informací..... | 40 |

1. Úvod

Znečištěné ovzduší je jedním z hlavních problémů životního prostředí. Množství plyných a pevných škodlivin uvolňovaných do atmosféry má vliv na zdraví lidí, vegetaci, živočichy i klimatickou změnu země. Prokázání negativních vlivů znečištěného ovzduší na životní prostředí v řadě epidemiologických a experimentálních studií vedlo k nárůstu zájmu odborné veřejnosti o tuto problematiku, přičemž základním předpokladem nalezení vhodného řešení je získání dalších informací mimo jiné i prostřednictvím vědeckých studií.

Emise znečišťujících látek do ovzduší z jednotlivých zdrojů vytváří velmi složitou a heterogenní směs pevných a plyných látek. Její složení je výsledkem časové a prostorové distribuce vstupů, jejich velikosti, vlastností daných polutantů, meteorologických a klimatických podmínek v dané oblasti. Další vliv má dálkový transport polutantů, kdy látky z určitého zdroje mohou ovlivňovat populace i ekosystémy ve velkých vzdálenostech od tohoto zdroje (*Simonish et Hites, 1995*). Lidská populace i přírodní populace organismů jsou těmto látkám a jejich směsím vystaveny a mohou pro ně představovat významné zdravotní a případné ekologické riziko. Nejzávažněji znečištěný je v tomto směru vzduch v městských aglomeracích, kde byla již před lety prokázána přítomnost velkého množství toxických i mutagenních a karcinogenních látek (*IARC, 1983*).

Jednou z nejvíce sledovaných složek jsou suspendované částice - aerosol. Suspendované částice jsou směs částic s různými chemickými a fyzikálními účinky závislými na způsobu vzniku, které udávají jejich negativní dopad (*Schwartz, 1994*). Předmětem měření je koncentrace částic a jejich složení, jelikož i nižší koncentrace mohou vyvolat negativní účinky (*Hauck, 1998*).

Vždy se kladl důraz na kvalitu venkovního ovzduší, kde se nachází více zdrojů znečištění, ale i kvalitu vnitřního ovzduší je nezbytné sledovat. Problém znečištění se totiž netýká jen vnějšího ovzduší, ale i ovzduší v uzavřených prostorách např. uvnitř budov. Poslední dobou se klade stále větší důraz na sledování kvality vnitřního ovzduší, jelikož zde lidé tráví většinu svého času a to až v rozsahu 90 % (*Hoppe et Martinac, 1998*). Zdroje znečištění mají původ nejen přímo uvnitř staveb, například ze stavebních materiálů a z lidských aktivit, ale polutanty pocházejí významnou měrou též z vnějšího prostředí prostřednictvím ventilace (*van de Vate, 1990*). Studium kvality vnitřního ovzduší je tak důležité obzvláště v lokalitách s vysokými hodnotami znečištění venkovního ovzduší, za která lze obecně považovat centra měst, průmyslová centra, okolí tepelných elektráren, okolí dopravních komunikací s intenzivním provozem apod. (*Salma et al., 2001*).

1.1 Aerosol

Sledování koncentrace aerosolu v ovzduší je jedním z kritérií sledování atmosférického znečištění. Atmosférický aerosol se skládá z pevných a kapalných částic v plynném prostředí o velikosti 1nm - 100 μ m. Zahrnuje částice pevného a kapalného materiálu, které setrvávají po určitou dobu v ovzduší. V atmosféře se s nimi setkáváme v podobě složité heterogenní směsi z hlediska velikosti částic a jejich chemického složení. Množství, fyzikální a chemické vlastnosti částic v ovzduší jsou závislé na zdrojích a vstupech do ovzduší, mechanismu vzniku a transformacích částic v ovzduší, vzdálenosti od zdrojů a meteorologických podmínkách. S velikostí částic a jejich složením souvisí i možné účinky částic na lidské zdraví (*Lighty et al.*, 2000).

Jako indikátor aerosolového znečištění v ČR, ale i jinde ve světě, byla zvolena frakce PM₁₀, částice menší než 10 μ m. Částice PM₁₀ jsou obvykle rozdělovány do dvou hlavních skupin na základě odlišné velikosti, mechanismu vzniku, složení i chování v atmosféře. První skupinu tvoří částice o velikosti pod 2,5 μ m (jemná frakce), které vznikají v důsledku chemických reakcí, nukleací, kondenzací plynných emisí na povrch částic nebo koagulací. Jemné částice se většinou skládají ze síranů, dusičnanů, uhlíku, amonných iontů, aldehydů, organických látek a kovů. Významný je zejména vznik částic tvořených uhlíkem s na povrchu navázanými organickými látkami. Tyto částice setrvávají v atmosféře poměrně dlouhou dobu a mohou být transportovány na velké vzdálenosti.

Druhou skupinu tvoří částice o velikosti 2,5 – 10 μ m (hrubá frakce). V této frakci se vyskytují částice různého tvaru včetně vláknitých částic, které tvoří například azbest či slídy. Tyto částice vznikají zvláště mechanickou činností (drcením, mletím, otěrem povrchu) a vířením prachu. K jejich hlavním zdrojům v ovzduší patří různé průmyslové prachy, dobývání v lomech, stavební činnost, prach z vozovek a obdělávání půdy. Tato frakce také zahrnuje různé biotické částice, jako jsou bakterie, spóry, pyl a částečky rostlin. Významným zdrojem hrubých částic jsou i spalovací procesy s emisemi částeček paliva a sazí. Tyto částice se skládají z krystalického materiálu, oxidů kovů a sazí. Hrubé částice setrvávají v ovzduší kratší dobu a jejich výskyt je omezen na blízké okolí zdroje. V ovzduší se nevyskytují částice z jednoho zdroje samostatně, ale dochází k jejich promíchání z nejrůznějších zdrojů. Složení vzniklé směsi částic je však ovlivněno také dálkovým transportem a meteorologickými podmínkami (*Lighty et al.*, 2000, *EPA 1996*).

1.2 Vliv částic aerosolu na zdraví lidí

Vzhledem ke schopnosti zejména nejmenších částic pronikat do dýchací soustavy je pozornost věnována jejich možným účinkům na lidské zdraví. Zájem o tuto problematiku podporují rozsáhlé poznatky z epidemiologických studií i různých experimentů s využitím nejrůznějších testů toxicity (*Gurjar et al., 2010*).

Nebezpečnost PM nespočívá jen v jejich mechanických vlastnostech, ale i v obsahu řady rizikových organických látek a anorganických polutantů, které se na ně vážou. Částice aerosolu obsahují sírany, dusičnany, kovy a různé chemikálie absorbované na povrchu, které mohou škodit lidskému zdraví (*Schwartz et al., 1996*).

V současnosti je největší pozornost z celkového množství suspendovaných částic věnována zejména částicím o velikosti pod 10 μm (PM_{10}), které mohou pronikat nejlépe do dýchací soustavy a to až do plicních sklípků. Suspendované částice PM_{10} vykazují významné zdravotní důsledky. Ještě významnější zdravotní účinky jsou však korelovány s jemnou frakcí $\text{PM}_{2,5}$ a PM_1 (*EPA, 1996*).

Doba setrvání částice v organismu závisí na jejím tvaru, chemickém složení a místě deponice. Hrubé částice zůstávají zachycené v horních cestách dýchacích a pohybem řasinek nosní dutiny se dostanou do nosohltanu a jsou spolknuty, nebo jsou kýchním vypuzovány z organismu pryč. Menší částice pronikají hlouběji, a proto jsou ze zdravotního hlediska více nebezpečné. V plicních sklípcích deponované částice se mohou dostat až do krve.

Deponování částic u dýchacích cest se uskutečňuje pomocí difuze, sedimentace a vnitřní impakce. Malé částice okolo 0,5 μm se pohybují Brownovým pohybem a jsou unášeny k povrchu plic, kde jsou zachyceny zvláště v alveolární části plic. Gravitačním pohybem podléhají větší částice zvláště v tracheobronchiální oblasti. Případ impakce je u částic, které se nachází v blízkosti stěn dýchacích trubic. Jestliže proud vzduchu obsahující částice mění s ohledem na rozvětvení cest v plicích směr, poté setrvačnost pohybu způsobuje impakci částic na plicích.

Celková účinnost částic v dýchací soustavě závisí na mnoha faktorech i na způsobu dýchání, na frekvenci objemu vzduchu. U částic s větším průměrem než 0,5 μm platí, že čím je nižší frekvence dýchání, tím více částic se deponuje, jelikož je více času pro gravitační usazování částic. Při pauzách mezi nádechy také vzrůstá účinnost deponice částic. Při dýchání nosem je u alveolárního záchytu exponováno přibližně 20 % částic o maximální velikosti 2 μm , při dýchání ústy se účinnost zvýší na 50 % a maximální velikost částic může být 3 μm (*Hinds, 1999, Mészáros, 1999*).

Do souvislosti s vystavením zvýšeným koncentracím suspendovaných částic (zejména menších frakcí) jsou dávány obtíže při dýchání, zhoršení zdravotního stavu u astmatiků a dalších plicních onemocnění. Dlouhodobá expozice dále přetěžuje samočisticí schopnost plic, snižuje přirozenou obranyschopnost člověka a může přispět ke chronickému zánětu průdušek a dalším nemocem. Účinek dráždivých aerosolů se projevuje mechanickým drážděním sliznic dýchacích cest, spojivek očí a pokožky, u citlivějších osob i alergickými reakcemi. Jedním z nich jsou alergické reakce způsobené stykem aerosolu s pokožkou a tím způsobené její podráždění. Nezanedbatelné jsou i změny v imunitním systému člověka, vyvolané také přítomností PM v ovzduší. V důsledku toho může docházet ke změnám autoimunity a alergické reakci. (*Dockery et al. 1993, Hauck et al., 1998*) Zvláště citlivé na tyto projevy jsou starší osoby, děti a lidé trpící astmatem (*Avigo., 2008*).

Aerosoly (zvláště organické původu) jsou způsobily vyvolat přecitlivělost a projevit se průduškovým astmatem. Infekční aerosol, který obsahuje choroboplodné zárodky zachycené na částicích, může být příčinou vážných onemocnění, mezi něž patří bakteriální a plísňové infekce. Aerosol může působit na organismus i toxicky s nezanedbatelným negativním vlivem na tkáň a orgány, dojde-li k proniknutí toxických látek do krve. V neposlední řadě mohou aerosoly obsahující karcinogenní sloučeniny vyvolat nádorové onemocnění. V této souvislosti se poukazuje na kauzální spojení rakoviny plic s aerosolovým znečištěním - zvláště se spojením s oxidem siřičitým (*Pope et al., 2002, Mészáros 1999*)

Při dlouhodobé expozici zvýšeným hladinám částic byla zaznamenána zvýšená mortalita, zkrácená délka života a zvýšený výskyt kardiovaskulárních onemocnění, bronchitid a rakoviny (*Hauck et al., 1998*). Nárůst $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$ vedl ke zvýšení výskytu kardiovaskulární úmrtnosti o 8 - 18 % (*Fromme, 2008*).

Zvláštní pozornost je věnována zkoumání vlivu aerosolu na zdraví dětí jako citlivé části populace. Jejich organismus ještě není plně vyvinutý a povrch plic v poměru k tělu je v porovnání s dospělými u dětí větší, což může působit závažnější zdravotní důsledky (*Pope et al., 2006, Schwartz, 2004*).

1.3 Ovzduší vnitřního prostředí

Mikroklima vnitřního prostředí je ovlivněno více faktory. Toto prostředí je dáno průnikem látek z vnějšího prostředí, ale i vlastními zdroji. Kvalita záleží na množství různých kontaminantů jako je formaldehyd, oxid uhelnatý, oxid siřičitý, oxid dusičitý, těkavé organické polutanty, radon a aerosol (*Gurjar et al., 2010*).

Vlivem různých faktorů se dostává aerosol z vnějšího prostředí do vnitřního. Důležitá je forma větrání, která ovlivňuje vstup částic do budovy z venku a proudění vzduchu uvnitř místnosti. (Tian et al., 2006). Větrání bývá buď přirozené otevíratelnými okny, nebo za pomoci klimatizace, která může mít vybavena různými druhy filtrů. Určení vhodnější formy větrání však není jednoduché a ani jednoznačné. Při větrání pomocí oken mohou být dovnitř zaneseny částice, které by v případě využití klimatizace byly touto zachyceny. Avšak klimatizace může mít také negativní účinky (Parker et al., 2008). Uzavřená budova většinou zabrání vstupu hrubých částí z venku, ale ne už vstupu submikronových částic, které projdou například netěsnostmi v oknech nebo ve zdivu. Zde záleží na okolí budovy - na blízkých a vzdálených zdrojích částic a meteorologických podmínkách. Vnitřní prostředí zkoumané budovy celkově závisí na její lokalitě umístění (Gurjar et al., 2010).

Aerosol má také svůj vnitřní původ. Vnitřní zdroj aerosolu může záviset na přítomnosti osob, jejich aktivitách a na uvolňování ze stavebních materiálů. Důležitými zdroji v domácnostech jsou domácí zvířata, kouření, příprava jídla a jiné domácí práce jako vysávání či zametání (Fromme et al., 2008).

Měření koncentrace částic ve vnitřním prostředí se provádí různými metodami. Jednou z nich je osobní expozice. Data získaná touto metodou však byla vyšší, než by odpovídalo průměrným koncentracím měřenými jinými metodami. Tato skutečnost vedla k teorii osobního oblaku (personal cloud) týkající se větší koncentrace částic v okolí osoby. Tato teorie se týká zvláště částic pod 2,5 μm (Monn et al., 1997).

Všeobecné požadavky na kvalitu vnitřního prostředí budov jsou dány zákony, přičemž jejich podrobnější rozpracování včetně limitů pro jednotlivé faktory pak lze nalézt v podzákoných právních předpisech, tj. nařízeních vlády ČR a vyhláškách příslušných ministerstev. WHO udává pro zdravotní účinky částic bezprahový účinek. Podle WHO není možné dle současného vědeckého poznání aerosolu stanovit bezpečnou prahovou koncentraci, za které by nedocházelo k účinkům na lidské zdraví.

Pro lidské zdraví je v ČR stanoven limit 24 hodinové koncentrace PM_{10} 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dle nařízení vlády ČR č. 597/2006 Sb., o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší. Pro prašný aerosol jsou imisní limity stanoveny pro thorakální frakci PM_{10} , protože tato frakce lépe koreluje se zdravotními účinky, avšak ještě lepší korelaci se zdravotními účinky vykazuje jemná frakce $\text{PM}_{2,5}$ (WHO, 2000).

1.4 Ovzduší vnitřního prostředí škol

Jedním z vnitřních prostředí, které je zajímavé z vědeckého i praktického hlediska, jsou školy. Studenti tráví ve školách přibližně 30 % svého času (*Fromme et al., 2007*). Vnitřní prostředí škol má své zdroje znečišťujících látek vevnitř i venku stejně jako jiné vnitřní prostředí.

Většina školních budov je umístěna v městském prostředí a v blízkosti rušných ulic. Doprava je jedním hlavních zdrojů škodlivin, které se také dostávají do vnitřního ovzduší. Koncentrace částic uvnitř i ve venkovním prostředí roste s vyšší hustotou provozu a blízkostí silnice (*Janssen et al., 2001*). Do vnitřního prostředí škol pronikají z vnějšku různé alergeny plísňe, bakterie, roztoči, pyl a další částice (*Dotterud et al., 1997*).

Ačkoliv ve školách nejsou aktivity jako vaření a kouření běžné, je zde sledování koncentrace aerosolu důležité z hlediska času stráveného studenty v těchto prostorách. (*Fromme et al., 2007*). V prostředí škol jsou hlavními částmi aerosolu vlákna tkanin, vlasové fragmenty, kožní buňky, částičky s různých materiálu jako papír a jiné předměty, s kterými osoby manipulují, částice stavebního materiálu, půdní částice přinesené na botách a fragmenty nábytku. V různých pracích je poukázáno na zvýšení koncentrace v učebnách za přítomnosti žáku v důsledku jejich aktivity (*Fromme et al., 2007, Janssen et al., 1997, Diapouli et al., 2008*). Aerosolové částice různého původu mohou narušovat pohodu, soustředěnost a zdraví studentů, například alergickými reakcemi (*Parker et al., 2008*).

V několika odborných pracích je poukázáno na vyšší koncentraci PM₁₀ právě ve školách. Nedostatečné je v těchto případech větrání, kdy škodlivé částice tvořené například resuspenzí se dostávají špatně z místností ven. Dále také horší údržba ve většině škol přispívá k navýšení a usazování aerosolu, který je při přítomnosti osob opět rozvířen (*Fromme et al., 2007, Tippayawong et al., 2009*).

V České republice platí dle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb, kde jsou zahrnuty i školy, hodinový limit PM₁₀ 150 µg/m³ a pro PM_{2,5} 80 µg/m³. Podle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, se pro učebny stanoví přípustné parametry u teploty v hodnotách min 20 a max. 28 °C a v případě vlhkosti 30 až 65% .

1.5 Cíle práce

Naše studie se zabývala aerosolovým znečištěním učeben a faktory, které mohou toto znečištění ovlivňovat. Cíle této práce byly tedy následující:

- zjistit hmotnosti koncentrace aerosolu v pěti velikostních složkách PM_{10} ve třech učebnách a ve venkovním prostředí a porovnání těchto koncentrací,
- sledovat doprovodné faktory jako obsazenost poslucháren, teplotu, vlhkost a intenzitu větrání,
- statisticky zpracovat vliv obsazenosti na koncentraci aerosolu jednotlivých poslucháren,
- korelační a regresní analýzou a statistickými testy porovnat učebny v závislosti na jejich umístění v rámci budovy,
- porovnat učebny vzhledem k jejich velikosti jako kvalitativního znaku neboli charakteru jednotlivých učeben,
- analyzovat doprovodné fyzikální faktory a zhodnotit jejich vliv, zjistit, jestli se učebny liší v rámci mikroklimatu a jak je jejich prostředí vhodné pro studenty a pedagogy,
- zhodnotit vliv zkoumaných faktorů,
- případně učinit z našich poznatků praktické závěry.

2. Metodika

2.1 Lokalita

Měření vnitřních koncentrací hrubého a jemného aerosolu probíhalo ve třech učebnách na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze v budově situované v centrální oblasti Prahy v blízkosti ulice s rušným provozem. K výzkumu byly vybrány tři různé posluchárny různé velikosti a s rozdílným umístěním v rámci stavby. Budova fakulty, kde probíhalo měření, je umístěna v Praze 2 v ulici Benátská v areálu botanické zahrady. Zkoumaná budova je součástí zastavěné plochy ležící v údolí řeky Vltavy v přibližné nadmořské výšce 200 m. Vytápění v okolí je prováděno prostřednictvím plynových kotelen. Nejbližší zeď budovy je vzdálena zhruba 10 m od dopravní komunikace, na které provoz odpovídá cca 500 automobilů za hodinu. Přibližně ve vzdálenosti 200 metrů od budovy se nachází křižovatka se semafor, kde automobily zůstávají po určitou dobu stát.



Obrázek č. 1: Mapa polohy budovy fakulty (křídlo budovy umístění učeben vyznačeno červeně).

2.2 Umístění poslucháren v rámci budovy a umístění měřících přístrojů

Zkoumané posluchárny v budově jsou umístěny v jiném poschodí a liší se velikostí i orientací vůči silnici - hlavnímu zdroji jemného a ultrajemného aerosolu. První učebna B11

o velikosti 121,88 m³ se nachází v přízemí, orientována 2 okny na severozápad k silnici a je osazena 16 učebními místy. Učebna B12 o velikosti 169,42 m³ je v prvním patře orientována 2 okny na severovýchod a 3 okny na jihovýchod do dvora a je zde 33 učebních míst. Poslední největší posluchárna B14 s 84 místy pro studenty o velikosti 491,74 m³ je v druhém patře orientována 3 okny na severovýchod a 2 okny na jihovýchod do dvora. Každá posluchárna je vybavena obvyklým školním nábytkem. Stoly a židle jsou z dřevotřísky a kovu. Dále jsou zde dřevěné skříně a tabule, na které se píše lihovými fixy.

Přesné umístění měřících zařízení bylo v místnostech na vyvýšeném na místě, kde nepřekážela běžnému provozu učeben (obrázek č. 2 až 4). Při výběru místa byl brán ohled na možné poškození přístrojů nežádoucími vlivy. Za účelem měření vnější koncentrace částic bylo zvoleno místo poblíž určené budovy. Pro první kampaně bylo toto místo přibližně metr od budovy ve výšce druhého patra v areálu školy. Z důvodů rekonstrukce bylo toto místo pro druhou polovinu kampaní změněno. Přístroje byly přemístěny do protějšího areálu nemocnice do přibližně stejné vzdálenosti od silnice jako umístění předešlé.



Obrázek č. 2: Umístění odběrové soustavy v učebně B11.



Obrázek č. 3: Umístění odběrové soustavy v učebně B12.



Obrázek č. 4: Umístění odběrové soustavy v učebně B14.

2.3 Období měření

Měření proběhlo v období od 21. února 2010 do 15. července 2011 v 11 kampaních ve všech ročních obdobích po třech až čtyřech dnech, celkem ve 34 dnech. Kampaně obsahovaly dny pracovní i dny pracovního klidu s přítomností a nepřítomností studentů. Poslední kampaň byla pouze srovnávací v měsíci červenci, kdy už neprobíhala výuka.

2.4 Měřicí metoda

Pro studii množství velikostně rozlišeného aerosolu jsme používali kaskádový impaktor Sioutas PCIS (Personal Cascade Impaktor Sampler) vyrobený s povrchově upraveného hliníku s pěti stupni rozlišení aerosolu A: $>2,5 \mu\text{m}$, B: $1,0 - 2,5 \mu\text{m}$, C: $0,5 - 1,0 \mu\text{m}$, D: $0,25 - 0,5 \mu\text{m}$ a P: $< 0,25 \mu\text{m}$ vhodný pro vnitřní i venkovní prostředí. Stupně C, D, P odpovídají jemnému aerosolu, stupně A a B hrubým částicím. Impaktor se skládá ze čtyř impakčních destiček, do kterých jsou vkládány filtry o průměru 25mm, na kterých jsou velikostně rozlišené částice zachycovány a ze čtyř urychlovacích destiček se štěrbinami, které se vkládají mezi impakční destičky. Na konci je impaktor zakončen sběrným filtrem o průměru 37mm pro depozici poslední velikostní frakce. Vzduch přichází do impaktoru

vstupní destičkou a mezi impakčními destičkami jsou destičky akcelerační urychlující proud vzduchu na každém stupni díky zužujícím se šterbinám, kterými vzduch prochází. Separace částic tak probíhá díky různým rychlostem proudu. Těžší částice v jednotlivých patrech nestačí sledovat proudnicí vzduchu a dopadají na impakční destičky. Lehčí částice naopak proudnice sledují a mohou pokračovat na další stupeň impaktoru. Tento princip se opakuje v každém patře, kde dochází postupně ke zvětšování rychlosti proudu. Na konečný sběrný filtr se zachycují nejmenší částice, které prošly všemi patry impaktoru.

Průtok impaktorem je 9 l/min. (*internet 1*). Vzduch obsahující aerosol je tedy nasáván přes impaktory pumpami o průtoku přibližně 9 l/min. Pro vnitřní ovzduší se použily pumpy Air Diagnostic and Engineering sampling pump model SPE 280 P a pro venkovní koncentrace pumpa firmy Baghirra CZ Sampler SAM 50. Impaktor byl spojen s pumpou hadicí a byl připevněn stabilně na kovový držák.

Jednotlivým stupňům impaktoru náleží "cut point" 50 % pro jednotlivé stupně, kdy částice s aerodynamickým průměrem d_{50} jsou zachyceny právě s účinností 50 %. (Pro stupeň A 2,5 μm , pro B 1,0 μm , pro C 0,50 μm a pro D 0,25 μm . Menší částice se zachycují na koncovém sběrném filtru (*Misra et al., 2002*).

Impaktory byly instalovány ráno přibližně mezi 7. a 8. hodinou vždy před začátkem výuky a po 24 hodinách byly vždy vyměněny. Při studii byly použity filtry PALL, PTFE W/Lam PTFE Support, No, Support Pad, 0,5 μm , 25 mm a membránové filtry Pallflex PTFE, 37 mm s póry 25 μm . Před každou kampaní probíhala příprava 65 filtrů pro 13 impaktorů. Na každý den po třech případy 4 impaktory včetně potřebného na venkovní instalaci, poslední impaktor sloužil jako slepý. Data získaná díky filtrům ze slepého impaktoru byla použita k výpočtu detekčního limitu.

Filtry byly roztříděny do Petriho misek (Petri slides Milipore), které byly příslušně označeny a následně vloženy na 24 hodin do exsikátorů kvůli zbavení vlhkosti ve váhově. Po 24 hodinách byly zváženy na váze Mettler Toledo MX 5 s přesností na 0,001 mg, jejíž součástí je ionizační vysokonapěťový rám Haug U – electrocode ionizer, který odstraňuje elektrický náboj filtrů. Vážení u filtrů průměru 25 mm probíhalo nejméně na dvakrát, u filtrů 37 mm na třikrát na přesnost 1 μg . Zvážení filtrů následovala jejich aplikace do samotných impaktorů. Manipulace s impaktory při vkládání filtrů byla prováděna v laminárním boxu, který využívá vzduchovou bariéru proti částicové kontaminaci. Veškerá manipulace s filtry během výzkumu byla prováděna s pinzetami. Filtry byly vyndány postupně z označených krabiček a připevněny na impakční destičky plastovými opěrnými kroužky. Poslední sběrný

filtr byl podepřen kovovou mřížkou a přichycen dvěma plastovými kroužky. Jednotlivá patra impaktoru byla utěsněna pomocí gumiček. Postupně byly složeny celé impaktory a označeny štítky. Poté byly vloženy do plastových sáčků a do krabiček zabraňujících znečištění při manipulaci.

Při kampaních následovala postupná instalace impaktorů na držáky na určeném místě, kde byla připravena pumpa a potřebné stojany. Po instalaci a rozběhnutí pumpy se změnil průtok vzduchu průtokoměrem Defender Model 510 schopným zaznamenat 300 - 3000 ml za min. Přesnost objemového průtoku je 1 % z odečtu (*internet 2*). Data z průtokoměru stejně jako čas zapnutí a vypnutí pumpy byla vnášena při výměně impaktorů do protokolu. Poslední den kampaně se použil "slepý impaktor", se kterým byla provedena stejná manipulace jako s předchozími, ale nebyla spuštěna pumpa a slepý impaktor nebyl vystaven 24 hodinové expozici. Předem byl umístěn i vlhkoměr a teploměr pro záznam souběžných parametrů. Po expozici byly impaktory opět rozebrány a filtry znovu umístěny do exsikátorů na 24 hodin. Poté byly opět zváženy nejméně dvakrát na váze Mettler Toledo. Po vážení byly filtry vloženy zpět do označených krabiček a uchovány. Hodnoty při vážení byly zapisovány do protokolu. Samotné rozložené impaktory byly umyty v isopropyl alkoholu a vysušeny v laminárním boxu. Po každé třetí kampani byly všechny použité impaktory čištěny v ultrazvukové lázni. Ultrazvuk vyvolává při průtoku kapalinou jev zvaný kavitace. Ta se projevuje intenzivním kmitáním částic kapalinou a vznikem miniaturních bublinek. V jejich nejbližším okolí dochází k prudkému nárůstu teploty, tlaku a zrychlení. Tyto jevy narušují mechanickou vazbu nečistot na povrch čištěného předmětu a ve spojení s vhodnou kapalinou dochází k jejich odplavování (*internet 3*).

Při každé kampani byla současně sledována teplota a vlhkost v každé učebně. K zaznamenávání teploty a vlhkostí po celou dobu kampaně byl použit teploměr a vlhkoměr s vnitřní pamětí a externí sondou Commeter D3121. Data z těchto přístrojů byla zprůměrována, ukládána vždy v rozmezí pěti minut a po každé kampani byla nahrávána do počítače. Současně byla zaznamenávána frekvence větrání. Větrání bylo přirozené bez klimatizace, tzn. pouze okny. Záznamy byly činěny v průběhu výuky, když každou čtvrt hodinu byl zaznamenáván počet otevřených oken. V čase mimo výuku se v místnostech nevětralo. Každou čtvrt hodinu byl zaznamenáván i počet přítomných studentů v každé učebně. Pokud během kampaně probíhala nějaká neobvyklá činnost, ať už uvnitř budovy nebo vně, jako například stavební práce, byl o této události rovněž učiněn záznam.

Pro kontrolu námi naměřených dat byla použita data 24 hodinové koncentrace PM₁₀ z informační sítě ISKO automatického imisního monitoringu AIM hydrometeorologického

ústavu v Praze, který používá radiometrickou metodu. Námí zvolená nejbližší stanice AIM se nacházela v Riegrových sadech, Praha 2.

2.5 Zpracování dat

Po celou dobu kampaně byly získávaná data vnášena do protokolů a poté přepisována do počítačového programu MS Excel. Z navážky jednotlivých filtrů byl před expozicí a po expozici zvlášť udělaný průměr a následně od sebe odečten. Tím se získala hmotnost samotného zachyceného aerosolu. Tato hmotnost byla převedena na příslušné jednotky a vydělena určitým průtokem vzduchu, který byl konkrétní po každou místnost a den. Z těchto hodnot byla vypočtena 24 hodinová hmotnostní koncentrace aerosolu jednotlivých frakcí.

Získané hodnoty hmotnostních koncentrací byly dále statisticky zpracovány pomocí programů MS Excel a R. MS Excel byl použit pro popisnou statistiku jako průměr, směrodatnou odchylku, medián, maximum a minimum a také pro regresní analýzu. Statistický program R byl použit na posouzení normality rozdělení dat, statistické testy a korelace. Koncentraci PM_{10} jsme získali sečtením všech stupňů impaktoru a hrubou frakci (HF) sečtením stupňů A a B ($10\ \mu\text{m} - 2,5\ \mu\text{m}$).

Během všech kampaní bylo získáno 44 slepých filtrů velikosti 25 mm a 11 “slepých filtrů“ o velikosti 37 mm, ze kterých byl vypočten detekční limit. Detekční limit byl vypočten jako trojnásobek směrodatné odchylky průměrné navážky ze slepých filtrů. Pro malé filtry byl detekční limit $1,72\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ a pro velké filtry $2,50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Polovinou detekčního limitu byly nahrazeny pouze záporné hodnoty navážek. Tedy bylo nahrazeno 11 hodnot u filtrů o velikosti 25 mm.

Během kampaní zaznamenaný počet přítomných studentů na hodinách (viz výše) byl převeden na tzv. osobohodiny vynásobením počtu studentů a počtu hodin, při kterých byli studenti přítomni. Hodnoty osobohodin byly dále používány pro statistické zpracování dat jako indikátor počtu osob.

3. Výsledky

3.1 Popisná statistika hmotnostních koncentrací

Výsledky popisné statistiky venkovního prostředí a jednotlivých učeben (B11, B12, B14) ukazují tabulky 1 až 4. Koncentrace částic PM₁₀ je součtem všech stupňů impaktoru A až P (A >2,5 μm, B 1,0-2,5 μm, C 0,5-1,0 μm, D 0,25-0,5 μm, P < 0,25 μm). Koncentraci PM₁₀ jsme zvolili jako ukazatel i pro další analýzu z toho důvodu, že srovnávací data z AIM jsou též ve formě PM₁₀. Označení HF odpovídá hrubé frakci tedy součtu stupňů A a B.

Průměrná 24 hodinová koncentrace PM₁₀ venku je 34,98 μg/m³ ± 18,2 μg/m³, v učebně B11 18,36 μg/m³ ± 9,67 μg/m³, v učebně B12 17,52 μg/m³ ± 9,93 μg/m³ a v učebně B14 18,08 μg/m³ ± 9,03 μg/m³. Celkově je koncentrace částic větší ve venkovním prostředí.

Tabulka č. 1: Charakteristika hmotnostní koncentrace velikostně rozlišeného aerosolu ve venkovním prostředí (hodnoty v μg/m³, n=34).

| Venkovní prostředí | | | | | |
|----------------------------|--------------------|---------------------|--------|---------|---------|
| velikostní frakce aerosolu | aritmetický průměr | směrodatná odchylka | medián | maximum | minimum |
| A | 6,64 | 4,53 | 5,13 | 19,36 | 2,12 |
| B | 3,45 | 2,49 | 2,84 | 12,08 | 0,73 |
| C | 2,32 | 1,72 | 1,71 | 8,66 | 0,18 |
| D | 10,29 | 6,97 | 9,06 | 31,38 | 0,86 |
| P | 12,28 | 7,26 | 10,58 | 36,83 | 3,43 |
| PM 10 | 34,98 | 18,26 | 30,52 | 94,81 | 11,26 |
| HF | 10,09 | 6,60 | 8,41 | 28,91 | 3,00 |

Tabulka č. 2: Charakteristika hmotnostní koncentrace velikostně rozlišeného aerosolu v učebně B11 (hodnoty v μg/m³, n=34).

| Učebna B11 | | | | | |
|----------------------------|--------------------|---------------------|--------|---------|---------|
| velikostní frakce aerosolu | aritmetický průměr | směrodatná odchylka | medián | maximum | minimum |
| A | 1,64 | 1,52 | 1,16 | 8,36 | 0,18 |
| B | 1,18 | 0,80 | 1,09 | 4,83 | 0,19 |
| C | 1,05 | 0,61 | 1,00 | 2,79 | 0,15 |
| D | 4,37 | 3,64 | 3,15 | 14,72 | 0,34 |
| P | 10,12 | 5,57 | 9,11 | 29,34 | 2,97 |
| PM 10 | 18,36 | 9,67 | 15,95 | 49,85 | 5,68 |
| HF | 2,81 | 2,28 | 2,14 | 13,19 | 0,47 |

Tabulka č. 3: Charakteristika hmotnostní koncentrace velikostně rozlišeného aerosolu v učebně B12 (hodnoty v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=34).

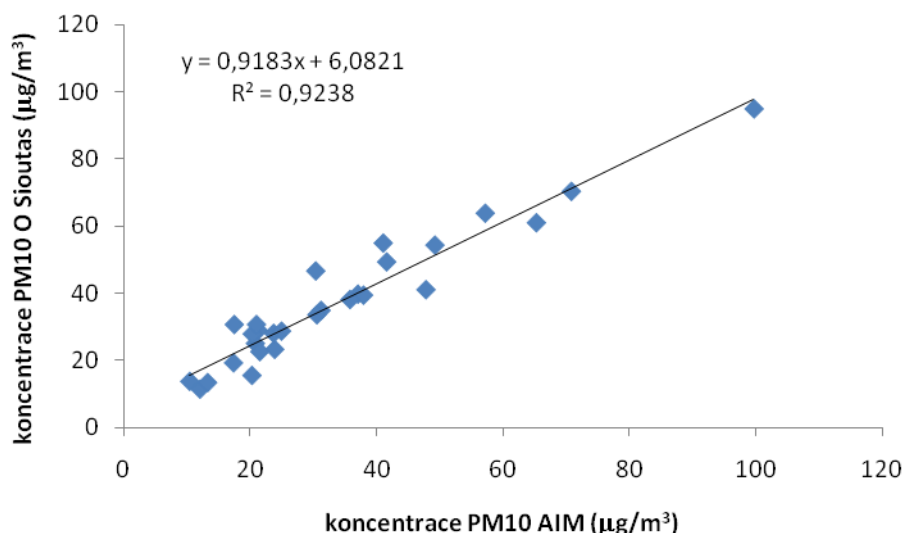
| Učebna B12 | | | | | |
|----------------------------|--------------------|---------------------|--------|---------|---------|
| velikostní frakce aerosolu | aritmetický průměr | směrodatná odchylka | medián | maximum | minimum |
| A | 1,95 | 1,65 | 1,33 | 5,30 | 0,08 |
| B | 1,10 | 0,69 | 0,86 | 2,85 | 0,11 |
| C | 0,89 | 0,52 | 0,84 | 2,20 | 0,04 |
| D | 4,65 | 3,86 | 3,43 | 16,62 | 0,85 |
| P | 8,93 | 5,10 | 8,15 | 24,71 | 1,76 |
| PM 10 | 17,52 | 9,93 | 14,50 | 46,15 | 5,12 |
| HF | 3,05 | 2,22 | 2,16 | 7,46 | 0,27 |

Tabulka č. 4: Charakteristika hmotnostní koncentrace velikostně rozlišeného aerosolu v učebně B14 (hodnoty v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=34).

| Učebna B14 | | | | | |
|----------------------------|--------------------|---------------------|--------|---------|---------|
| velikostní frakce aerosolu | aritmetický průměr | směrodatná odchylka | medián | maximum | minimum |
| A | 2,18 | 1,83 | 1,46 | 8,51 | 0,04 |
| B | 1,25 | 0,72 | 1,03 | 2,83 | 0,11 |
| C | 1,01 | 0,54 | 0,93 | 2,40 | 0,20 |
| D | 4,31 | 3,31 | 3,36 | 16,63 | 0,94 |
| P | 9,32 | 5,09 | 8,63 | 22,62 | 0,74 |
| PM 10 | 18,08 | 9,03 | 16,28 | 47,56 | 5,78 |
| HF | 3,44 | 2,20 | 3,20 | 9,40 | 0,15 |

3.2 Korelace hodnot PM_{10} a údajů z AIM

Pro srovnání a kontrolu 24 hodinových hmotnostních koncentrací PM_{10} venkovního ovzduší získaných gravimetrickou metodou a koncentrací z informační sítě automatického imisního monitoringu AIM hydrometeorologického ústavu byla použita regresní analýza PM_{10} O a PM_{10} AIM. (obrázek č. 5). Korelační Spearmanův koeficient těchto koncentrací 0,93 ukazuje vysokou přímo úměrnou korelaci.



Obrázek č. 5: Regresní analýza venkovní koncentrace PM₁₀ impaktoru Sioutas a stanice AIM (Riegrový sady, Praha 2).

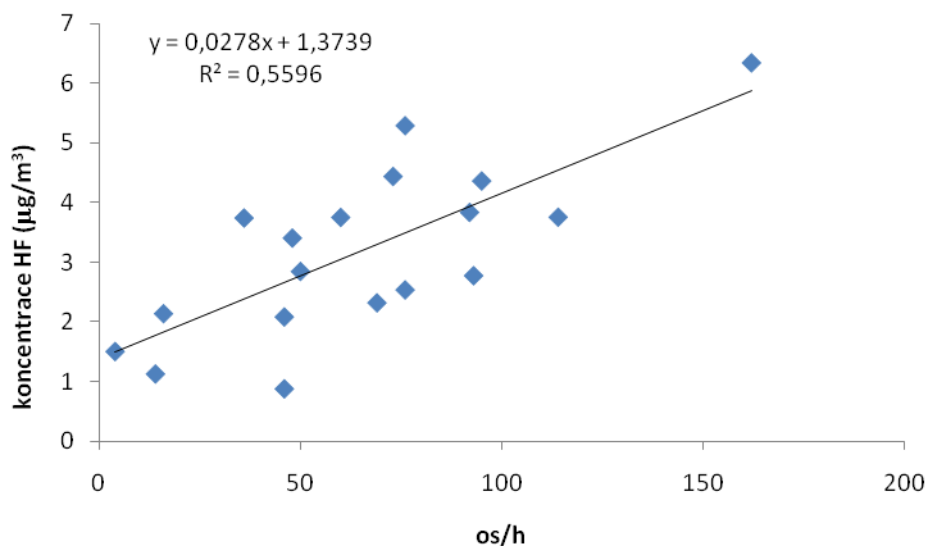
3.3 Závislost hmotnostní koncentrace částic na obsazenosti učeben

Ve všech třech učebnách byl sledován počet přítomných studentů na přednáškách během všech kampaní. Jako vhodný ukazatel zastoupení obsazenosti učeben byly zvoleny osobohodiny. Naměřená data byla rozdělena na dvě skupiny podle toho, zda byli studenti během dne přítomni nebo ne. V období bez přítomnosti jsou víkendy a poslední kampaň uskutečněná o prázdninách, kdy neprobíhala žádná výuka. Přítomnost studentů má vliv na koncentraci částic nejvíce na stupeň A a B a tedy i na jejich součet označovaný jako hrubá frakce (HF). Všechny hodnoty koncentrace v dny bez přítomnosti osob jsou nižší. Rozdíly HF v dny s přítomností a bez přítomnosti studentů jsou patrné ve všech třech učebnách, jak je vidět v tabulce č. 5. Zároveň byly tyto rozdíly dokázány na hladině $\alpha < 0,05$ neparametrickým Wilcoxonovým testem.

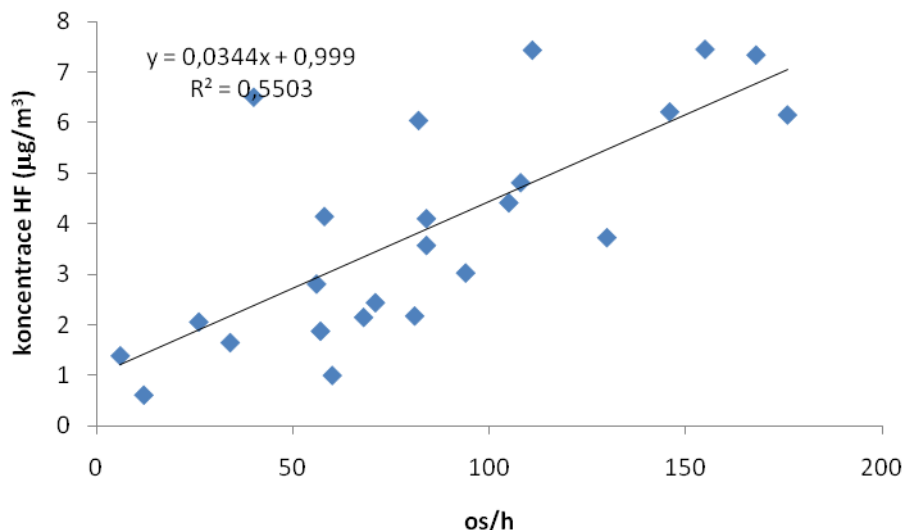
Tabulka č. 5: Průměry hmotnostních koncentrací velikostně rozlišených částic v závislosti na obsazenosti učeben (hodnoty v $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

| velikostní frakce aerosolu | B11 | | B12 | | B14 | |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | obsazeno | neobsazeno | obsazeno | neobsazeno | obsazeno | neobsazeno |
| A | 1,85±1,02 | 0,78±0,35 | 2,56±1,57 | 0,49±0,32 | 2,88±1,73 | 0,50±0,41 |
| B | 1,33±0,42 | 0,66±0,26 | 1,32±0,68 | 0,56±0,25 | 1,45±0,68 | 0,78±0,55 |
| C | 1,05±0,61 | 1,01±0,51 | 1,01±0,51 | 0,61±0,37 | 1,07±0,52 | 0,88±0,56 |
| D | 4,75±3,32 | 4,03±3,96 | 5,13±3,67 | 3,50±3,89 | 4,24±3,26 | 4,49±3,41 |
| P | 10,36±5,53 | 10,02±5,54 | 10,06±5,07 | 6,22±3,71 | 9,96±4,92 | 7,79±5,16 |
| PM ₁₀ | 18,30±9,27 | 15,78±9,81 | 20,08±9,44 | 11,38±7,72 | 20,03±8,48 | 11,77±9,28 |
| HF | 3,18±1,36 | 1,44±0,53 | 3,88±2,08 | 1,05±0,53 | 4,33±1,95 | 1,29±0,86 |

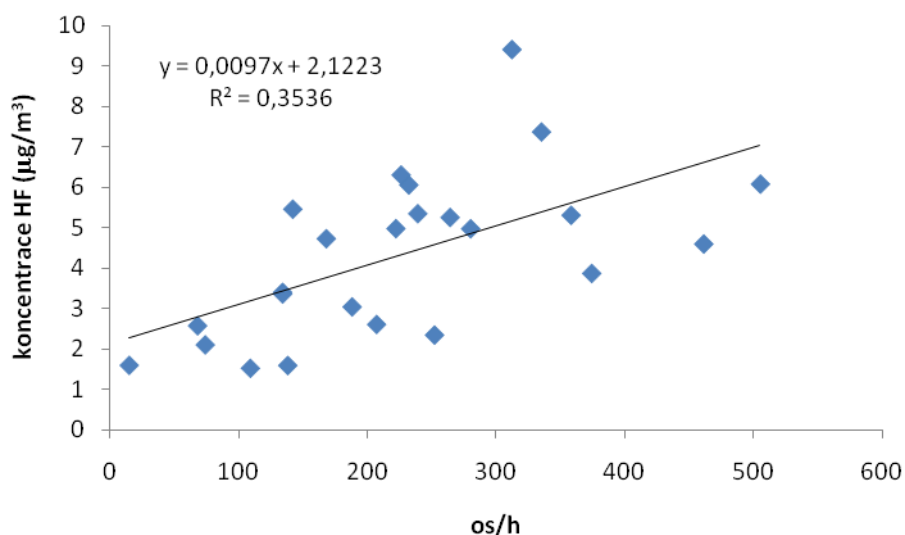
Regresní analýzu osobohodin a HF ve všech třech učebnách znázorňují obrázky 6 až 8. Pro korelaci osobohodin a hrubé frakce jsme mohli použít Pearsonův korelační koeficient, jelikož osobohodiny i koncentrace hrubé frakce za přítomnosti osob odpovídají normálnímu rozdělení. Nejvyšší byl Pearsonův korelační koeficient osobohodin a koncentrace hrubé frakce v učebně B12 0,87, dále v učebně B11 0,70 a v učebně B14 0,61. Hrubá frakce tedy ve všech případech s osobohodinami na hladině $\alpha < 0,05$ koreluje.



Obrázek č. 6: Regresní analýza osobohodin a koncentrace HF v učebně B11.



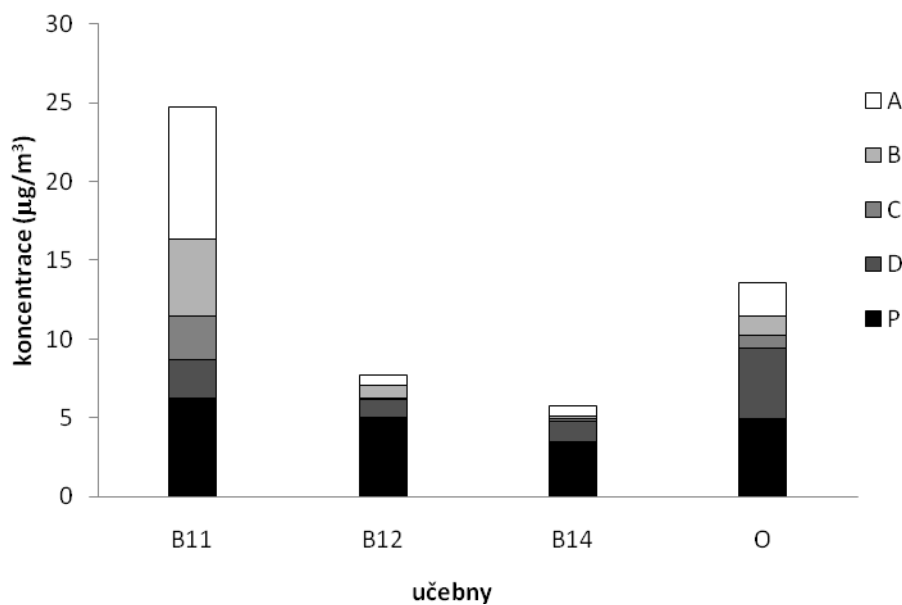
Obrázek č. 7: Regresní analýza osobohodin a koncentrace HF v učebně B12.



Obrázek č. 8: Regresní analýza osobohodin a koncentrace HF v učebně B14.

Při této i dalších analýzách byly vynechány hodnoty jednoho dne druhé kampaně a to soboty 13. března 2010 v učebně B11, jelikož by pravděpodobně ovlivnily negativně naše výsledky. V tento den v této učebně byla naměřena velmi vysoká koncentrace hrubé frakce zvláště stupně A. Na obrázku č. 9 si lze všimnout, že koncentrace stupně A je v porovnání s ostatními učebnami, kde nebyl nikdo přítomen, a dokonce i venkovním prostředím neporovnatelně vyšší. Vysoká hodnota stupně A byla způsobena nejspíše přítomností

a pedagoga v těchto prostorách a proběhlou manipulací se starými znečištěnými výukovými archy.



Obrázek č. 9: Velikostně rozlišené hmotnostní koncentrace v učebnách a ve venkovním prostředí v druhé kampani v sobotu 13.3. 2010 (A až P: stupně impaktoru).

3.4 Hmotnostní koncentrace částic v závislosti na velikosti a umístění učebny

Pro posouzení vlivu koncentrace částic venkovního prostředí na koncentraci částic ve vnitřním prostředí s ohledem na umístění učebny zvláště vůči komunikaci (tedy hlavnímu zdroji jemného aerosolu) jsme použili regresní analýzu a korelaci. Všechna naměřená data nemají normální rozdělení, proto jsme pro korelaci mezi hmotnostními vnitřními a venkovními koncentracemi zvolili Spearmanův korelační koeficient. U vlivu venkovní koncentrace částic na vnitřní koncentraci částic jsme posuzovali zvláště hodnoty venkovní a vnitřní koncentrace za přítomnosti a zvláště za nepřítomnosti studentů. U jemné frakce stupně P je lepší korelace u učeben B11 a B12 za přítomnosti studentů, to je nespíš způsobeno větráním v této době a tak snažším průnikem jemných částic do vnitřního prostředí. Osobohodiny s četností větrání spolu korelují v učebně B11 Spearmanovým korelačním koeficientem 0,72, v učebně B12 Spearmanovým korelačním koeficientem 0,54 a v B14 0,74.

Regresní analýzy koncentrace PM 10 vnitřního a vnějšího prostředí ukazují u všech třech učeben lepší závislost v případě nepřítomnosti studentů (obrázek č. 10 až č. 15). U učebny B12 s přítomností osob jsme vyřadili u regresní analýzy a korelace jednu vzdálenou hodnotu ze dne, kdy bylo v učebně přítomno velké množství osob a vůbec se nevětralo. Vyřazení této jedné hodnoty změnilo Spearmanův korelační koeficient PM_{10} z 0,79 na 0,89. V grafu je nezahrnutá odlehlá hodnota vyznačena červeně (obrázek č. 12).

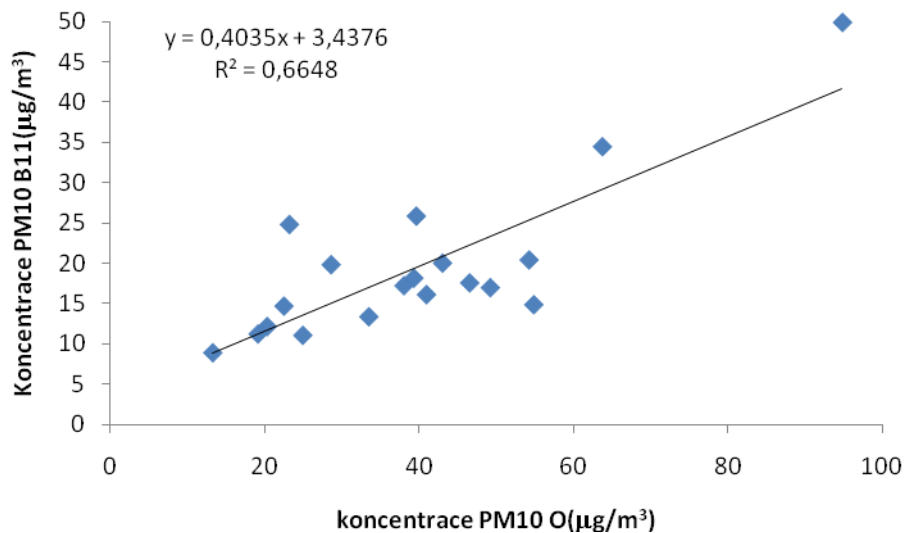
Ve všech případech je vidět, že venkovní koncentrace ovlivňuje koncentrace uvnitř všech místností a že k tomu nejvíce dochází v případě jemné frakce stupně D a P. Závislost narůstá od stupně A postupně k jemnějším frakcím (tabulka č. 6 až č. 11).

Tabulka č. 6: Spearmanovy korelační koeficienty jednotlivých velikostních frakcí učebny B11 a venkovního prostředí za přítomnosti studentů, n=19.

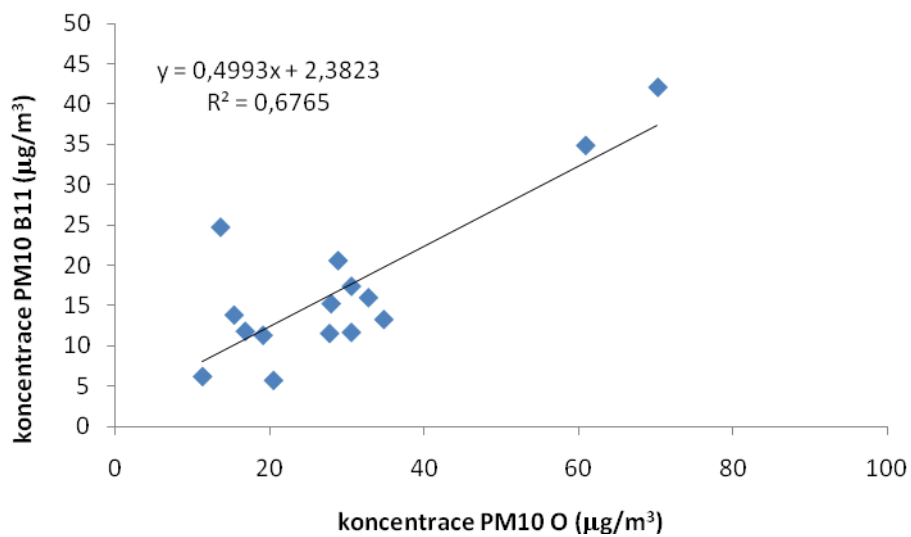
| velikostní frakce aerosolu | A out | B out | C out | D out | P out |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A in | 0.19 | 0.06 | 0.24 | 0.21 | -0.04 |
| B in | 0.58 | 0.48 | -0.08 | -0.05 | 0.21 |
| C in | 0.26 | 0.16 | 0.28 | 0.29 | 0.29 |
| D in | -0.13 | -0.17 | 0.74 | 0.71 | 0.49 |
| P in | 0.12 | 0.16 | 0.54 | 0.62 | 0.84 |

Tabulka č. 7: Spearmanovy korelační koeficienty jednotlivých velikostních frakcí učebny B11 a venkovního prostředí bez přítomnosti studentů, n=14.

| velikostní frakce aerosolu | A out | B out | C out | D out | P out |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A in | -0.41 | -0.18 | -0.02 | 0.03 | -0.14 |
| B in | 0.02 | 0.34 | 0.48 | 0.33 | 0.43 |
| C in | -0.07 | 0.17 | 0.27 | 0.30 | 0.61 |
| D in | 0.53 | 0.15 | 0.50 | 0.50 | 0.62 |
| P in | 0.46 | 0.34 | 0.55 | 0.52 | 0.75 |



Obrázek č. 10: Regresní analýza koncentrace PM₁₀ ve venkovním prostředí a v učebně B11 za přítomnosti studentů.



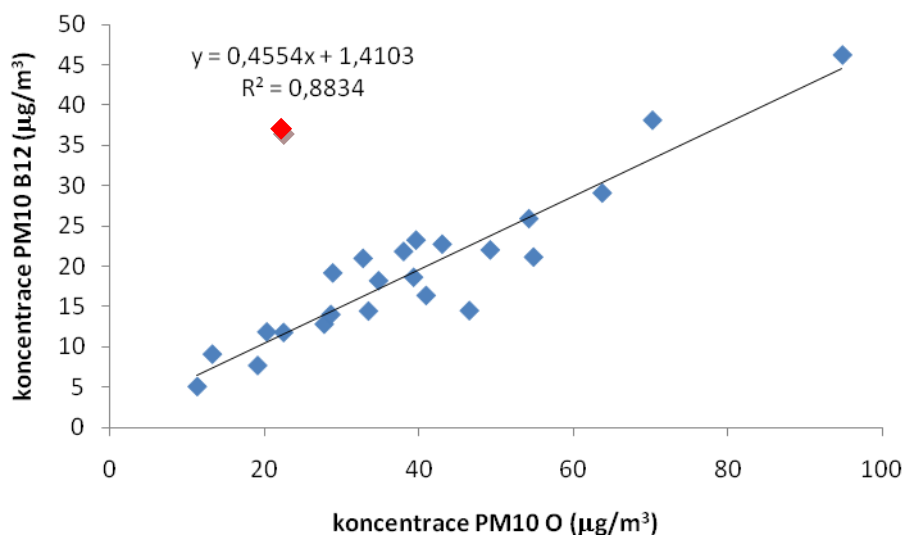
Obrázek č. 11: Regresní analýza koncentrace PM₁₀ ve venkovním prostředí a v učebně B11 bez přítomnosti studentů.

Tabulka č. 8: Spearmanovy korelační koeficienty jednotlivých velikostních frakcí učebny B12 a venkovního prostředí za přítomnosti studentů, n=23.

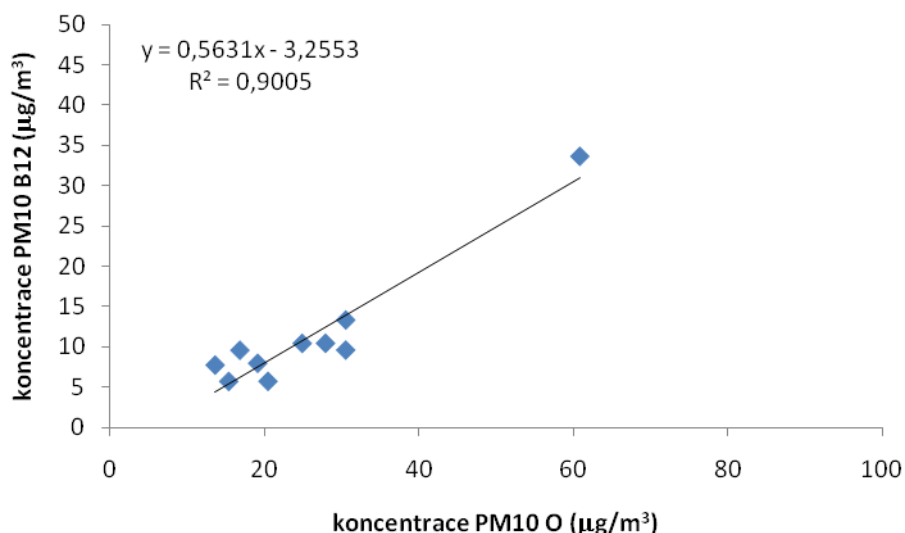
| velikostní frakce aerosolu | A out | B out | C out | D out | P out |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A in | 0.50 | 0.41 | -0.08 | -0.13 | 0.18 |
| B in | 0.55 | 0.53 | 0.09 | 0.05 | 0.36 |
| C in | 0.13 | 0.25 | 0.21 | 0.24 | 0.28 |
| D in | 0.44 | 0.34 | 0.51 | 0.55 | 0.70 |
| P in | 0.42 | 0.45 | 0.44 | 0.50 | 0.87 |

Tabulka č. 9: Spearmanovy korelační koeficienty jednotlivých velikostních frakcí učebny B12 a venkovního prostředí bez přítomnosti studentů, n=10.

| velikostní frakce aerosolu | A out | B out | C out | D out | P out |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A in | 0.30 | 0.42 | 0.28 | 0.21 | 0.01 |
| B in | 0.07 | 0.19 | 0.01 | 0.01 | -0.22 |
| C in | 0.10 | 0.42 | 0.08 | 0.26 | 0.28 |
| D in | 0.54 | 0.08 | 0.70 | 0.87 | 0.66 |
| P in | 0.04 | 0.19 | 0.44 | 0.53 | 0.81 |



Obrázek č. 12: Regresní analýza koncentrace PM₁₀ ve venkovním prostředí a v učebně B12 za přítomnosti studentů (červeně vyznačena odlehlá hodnota nezahrnutá do analýzy).



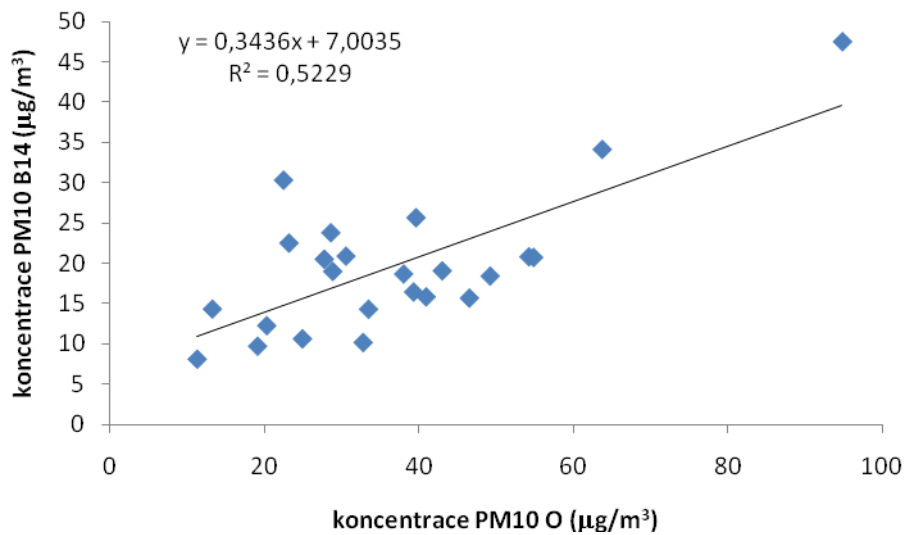
Obrázek č. 13: Regresní analýza koncentrace PM_{10} ve venkovním prostředí a v učebně B12 bez přítomnosti studentů.

Tabulka č. 10: Spearmanovy korelační koeficienty jednotlivých velikostních frakcí učebny B14 a venkovního prostředí za přítomnosti studentů, n=24.

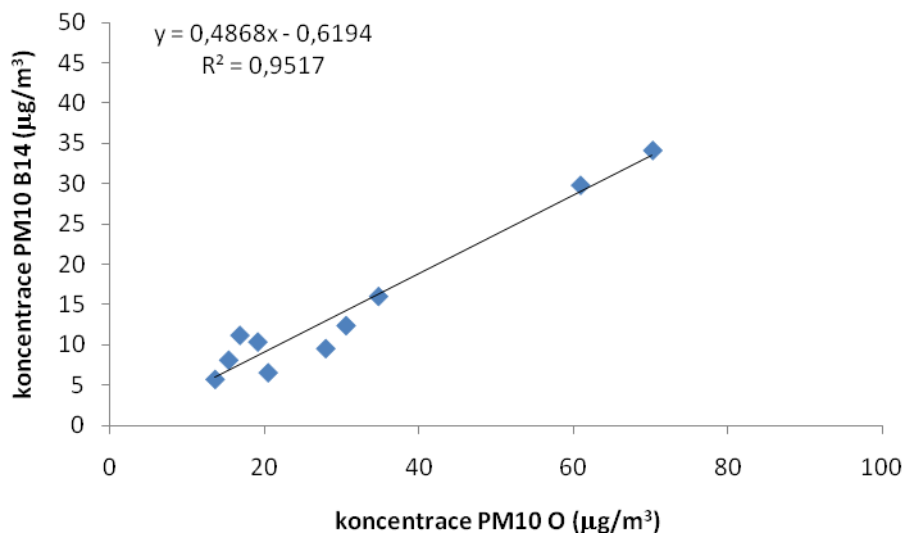
| velikostní frakce aerosolu | A out | B out | C out | D out | P out |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A in | -0.03 | -0.10 | 0.14 | 0.15 | -0.08 |
| B in | 0.11 | 0.18 | 0.19 | 0.05 | 0.01 |
| C in | -0.22 | -0.01 | 0.35 | 0.20 | 0.06 |
| D in | 0.50 | 0.36 | 0.62 | 0.66 | 0.50 |
| P in | 0.11 | 0.05 | 0.43 | 0.60 | 0.58 |

Tabulka č. 11: Spearmanovy korelační koeficienty jednotlivých velikostních frakcí učebny B14 a venkovního prostředí bez přítomnosti studentů, n=10.

| velikostní frakce aerosolu | A out | B out | C out | D out | P out |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A in | 0.04 | 0.20 | -0.05 | -0.16 | -0.07 |
| B in | 0.65 | 0.33 | 0.71 | 0.73 | 0.64 |
| C in | 0.48 | 0.32 | 0.55 | 0.68 | 0.85 |
| D in | 0.35 | 0.09 | 0.75 | 0.88 | 0.77 |
| P in | 0.45 | 0.49 | 0.50 | 0.52 | 0.81 |

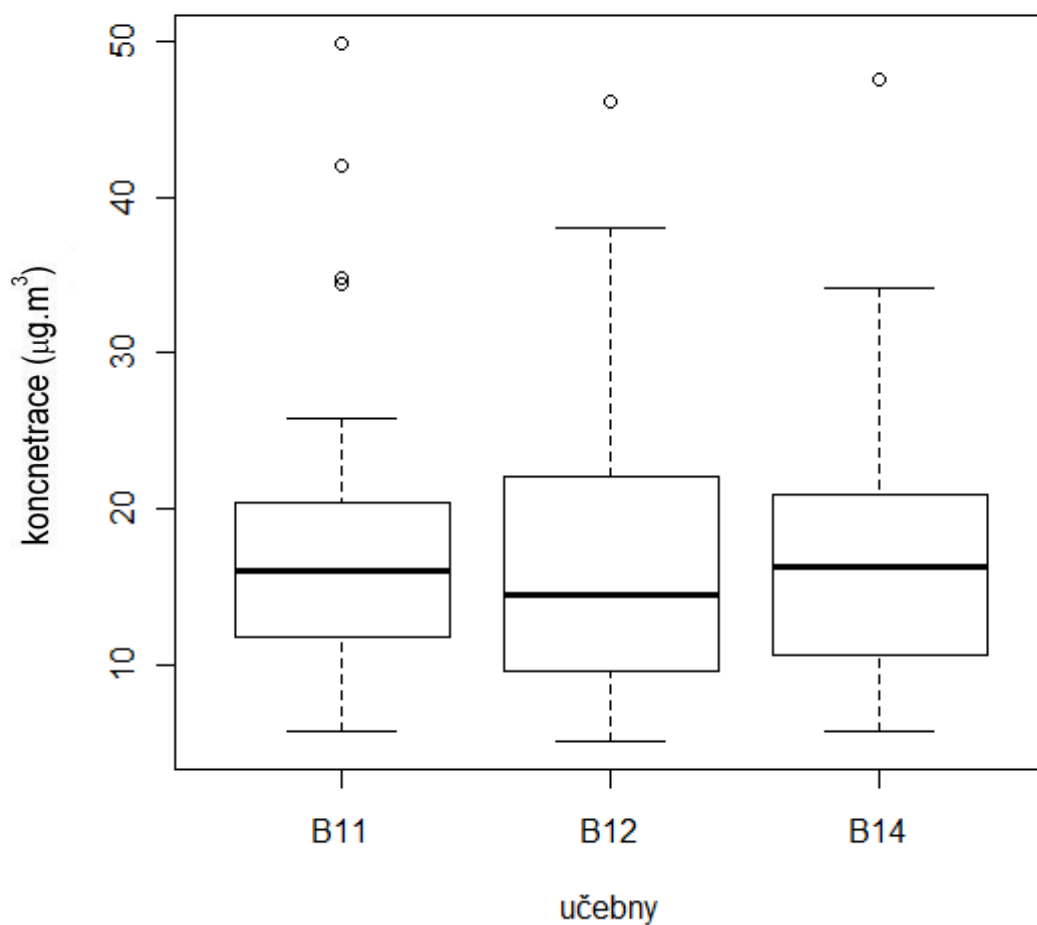


Obrázek č. 14: Regresní analýza koncentrace PM₁₀ ve venkovním prostředí a v učebně B14 za přítomnosti studentů.

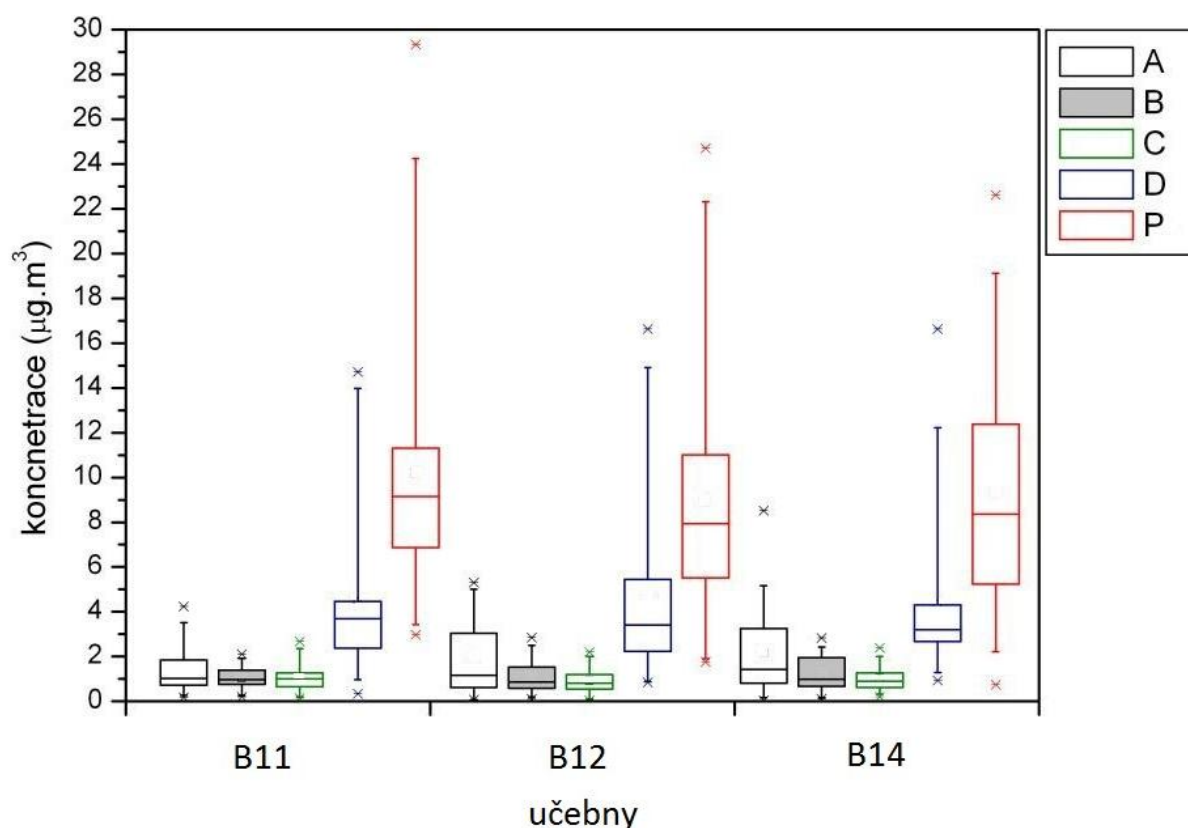


Obrázek č. 15: Regresní analýza koncentrace PM₁₀ ve venkovním prostředí a v učebně B14 bez přítomnosti studentů.

V případě různé koncentrace v závislosti na velikosti učeben nebyl u PM_{10} prokázán neparametrickým Wilcoxonovým testem na hladině $\alpha < 0,05$ významný rozdíl. Porovnání koncentrace PM_{10} učeben je vidět na obrázku č. 16. Rozdíl byl také testován tím samým způsobem u jednotlivých frakcí aerosolu A až P, kdy vyšel statistický rozdíl mezi učebnami pouze u frakcí A a P (obrázek č. 17).



Obrázek č. 16: Krabičkové grafy vyjadřující mediány, kvartily, minima a maxima PM_{10} podle jednotlivých učeben.



Obrázek č. 17: Krabičkové grafy vyjadřující mediány, kvartily, minima a maxima koncentrace frakcí A ž P podle jednotlivých učeben (A, B, C, D, P – jednotlivé frakce aerosolu).

3.5 Fyzikální faktory

Popisná statistika fyzikálních faktorů ukazuje, že v učebně B14 bylo v průměru největší množství osob a větrání probíhalo nejintenzivnějším způsobem. Teplota a vlhkost je u všech učeben podobná.

Tabulka č. 12: Charakteristika fyzikálních faktorů učebny B11, n=34.

| Učebna B11 | | | | | |
|-------------------|--------|---------------------|--------|---------|---------|
| fyzikální faktory | průměr | směrodatná odchylka | medián | maximum | minimum |
| teplota | 23,87 | 1,31 | 23,58 | 27,34 | 21,61 |
| vlhkost | 27,32 | 8,64 | 27,66 | 42,52 | 11,76 |
| os/h | 34,47 | 42,37 | 9 | 162 | 0 |
| větrání | 2,26 | 5,14 | 0 | 24 | 0 |

Tabulka č. 13: Charakteristika fyzikálních faktorů učebny B12, n=34.

| Učebna B12 | | | | | |
|-------------------|--------|---------------------|--------|---------|---------|
| fyzikální faktory | průměr | směrodatná odchylka | medián | maximum | minimum |
| teplota | 22,20 | 1,78 | 22,19 | 27,26 | 19,89 |
| vlhkost | 33,48 | 9,03 | 33,25 | 49,22 | 16,89 |
| os/h | 59,18 | 54,30 | 57,5 | 176 | 0 |
| větrání | 6,26 | 11,51 | 0 | 48 | 0 |

Tabulka č. 14: Charakteristika fyzikálních faktorů učebny B14, n=34.

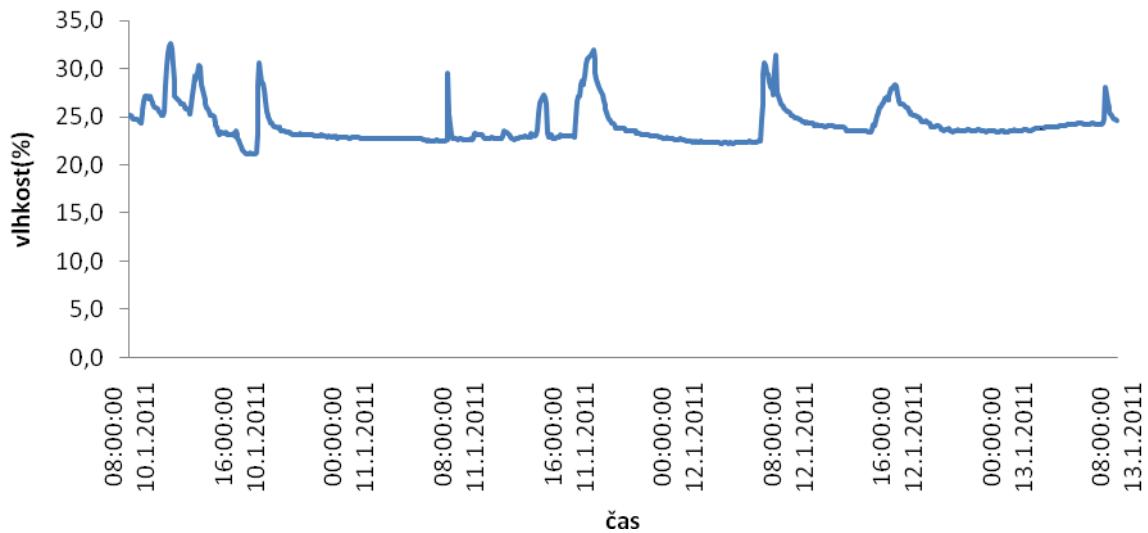
| Učebna B14 | | | | | |
|-------------------|--------|---------------------|--------|---------|---------|
| fyzikální faktory | průměr | směrodatná odchylka | medián | maximum | minimum |
| teplota | 22,37 | 2,41 | 21,89 | 29,24 | 18,23 |
| vlhkost | 31,05 | 7,06 | 30,13 | 43,19 | 19,77 |
| os/h | 159,91 | 143,73 | 140,00 | 505,00 | 0,00 |
| větrání | 8,06 | 13,24 | 0,50 | 60,00 | 0,00 |

Tabulka č. 15 znázorňuje ovlivnění jednotlivých frakcí aerosolu teplotou a vlhkostí na příkladu Spearmanovy korelace těchto fyzikálních faktorů a jednotlivých frakcí ve vnějším prostředí. Jemná frakce stupně C a D záporně koreluje s teplotou a hrubá frakce, stupeň P i PM₁₀ záporně koreluje s vlhkostí.

Tabulka č. 15: Spearmanova korelace fyzikálních faktorů a jednotlivých frakcí aerosolu venkovního prostředí, n= 34.

| fyzikální faktory | A | B | C | D | P | PM ₁₀ | HF |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------|
| teplota | 0.14 | 0.28 | -0.52 | -0.60 | -0.34 | -0.32 | 0,24 |
| vlhkost | -0.56 | -0.78 | -0.02 | 0.02 | -0.44 | -0.46 | -0,66 |

Po celou dobu kampaní vychází v průměru nízká vlhkost vzhledem k předpisům a procentuální vlhkosti v prostředí vhodné pro zdraví organismu. Z tohoto důvodu byla vybrána lednová kampaň pro ukázkou dynamiky vlhkosti v učebně B11, kde vycházela naměřená vlhkost právě nejnižší. Píky v grafu odpovídají mírnému zvýšení vlhkosti v důsledku přítomnosti osob (obrázek č. 18).



Obrázek č. 18: Dynamika vlhkosti v průběhu sedmé lednové kampaně v učebně B11.

4. Diskuse

Naše studie se zabývala měřením koncentrací velikostně rozlišeného aerosolu pomocí impaktoru v závislosti na obsazenosti, umístění a velikosti učebny. Většina studií zabývajících se podobným tématem měření koncentrací ve školách nezahrnuje tyto všechny faktory najednou (*Fromme et al., 2007, Diapouli et al., 2007, Janssen et al., 1997, Janssen et al., 2001*).

Průměrná koncentrace aerosolu PM₁₀ tedy frakce, která zahrnuje všechny námi měřené frakce, byla ve srovnání s učebnami průměrně nejvyšší venku $34,98 \pm 18,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koncentrace hrubé frakce byla průměrně nejvyšší ve venkovním prostředí $10,09 \pm 6,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ve venkovním prostředí je tedy zřejmě mnohem více potenciálních zdrojů jemného i hrubého aerosolu. Průměrné koncentrace PM₁₀ se mezi učebnami příliš neliší. Nejvyšší je ovšem v B11, jenž je umístěna nejbližší komunikaci a je zde netěsnící okno, kterým mohou pronikat částice jednodušším způsobem. Silnice je pravděpodobně nejvýznamnějším zdrojem jemného aerosolu v okolí a stupeň P představuje nejjemnější frakci námi měřeného aerosolu, která se nejvíce podílí na koncentraci PM₁₀. V případě učebny B11 tvoří přibližně průměrně frakce P 55 % z frakce PM₁₀. Tato frakce však ve všech učebnách tvořila nejvyšší podíl PM₁₀. Ve všech učebnách po ní následovala frakce D. Jemný aerosol tedy ve všech učebnách převládá. Předpokládáme, že se jemné částice dostávají do budovy při větrání, ale i štěrbinami přes zavřená okna. Braniš et al. (2009) podobně ukázali v jiných pražských školních budovách, že nejvyšší podíl má na koncentraci PM₁₀ právě frakce P a poté D, tzn. aerosol PM_{0,5}. Tato jemná frakce pod 0,25 mikrometrů je nejvíce škodlivá zdraví, jelikož proniká nejhluběji do plic a bývá příčinou různých nemocí jako bronchitida nebo astma a mnohem více a také nepříznivě působí na kardiovaskulární systém. (*Pope et al. 2007*).

Srovnání koncentrací PM₁₀ námi naměřených ve venkovním prostředí a stanice AIM mají vysokou korelaci 0,93, která ukazuje na slušnou věrohodnost námi naměřených dat. Data ze stanice AIM jsou používána pro oficiální hodnocení kvality ovzduší. Rovnice regresní přímky také ukazuje dobrou srovnatelnost. Podle poměru PM₁₀ AIM a PM₁₀ Sioutas 0,91 naše metoda nadhodnocuje přibližně o 9%. Tento minimální rozdíl může být způsoben např. různou polohou měřících míst či systematickou chybou impaktoru. Přesto nadhodnocení našich dat pouze o 9 % poukazuje na téměř srovnatelnou koncentraci aerosolu obou míst a správnost měření našich dat. Díky jisté shodě v měření můžeme říct, že aerosolové znečištění je ve městě (v tomto případě v Praze) promícháno téměř rovnoměrně.

Při rozdělení naměřených dat podle přítomnosti a nepřítomnosti studentů v učebnách odpovídá dle našeho měření a statistického zpracování zvýšení hrubé frakce počtu osobohodin. Ve všech třech učebnách se koncentrace za přítomnosti studentů téměř třikrát zvýšila oproti koncentraci v jejich nepřítomnosti. Rozdíl mezi koncentrací hrubé frakce při obsazenosti a neobsazenosti byl dokázán neparametrickým Wilcoxonovým testem. Vyšší podíl na hrubé frakci má koncentrace frakce A než B a to zvláště v přítomnosti studentů. Celkový podíl hrubé frakce na PM₁₀ je za přítomnosti studentů vyšší. Přítomnost studentů ovlivňuje tedy celkovou koncentraci aerosolu PM₁₀. Ve všech případech hrubá frakce s osobohodinami koreluje, což dokazuje závislost hrubé frakce na počtu přítomných osob. Nižší korelace učebny B14 může být vysvětlena různou aktivitou při přednáškách, což souvisí i s charakterem učebny. V určitých hodinách mohlo být v této učebně méně studentů, ale ti se mohli v rámci během semináře více pohybovat a více vířit prach. Naopak při hodinách, kdy v učebně bylo více neaktivních posluchačů, byla naměřena koncentrace nižší než při aktivních hodinách s méně studenty. Koncentrace hrubé frakce tak pravděpodobně není závislá jen na počtu osob, ale i na jejich aktivitě.

U hrubé frakce zvláště u stupně A (obrázek č. 9) si můžeme všimnout, jak její koncentraci může ovlivnit i činnost pouze jednoho člověka. V tomto případě vnější koncentrace pravděpodobně neovlivňuje vnitřní koncentraci hrubého aerosolu, jelikož je koncentrace uvnitř mnohem vyšší než venku. Vysoká hodnota stupně A byla způsobena nejspíše přítomností a činností pedagoga v těchto prostorách a to manipulací se starými znečištěnými výukovými archy.

Korelace mezi množstvím osob a hrubou frakcí v pracovní dny ukazují, že přítomnost lidí je důležitým zdrojem hrubých částic v budovách stejně jako v jiných studiích (*Diapouli et al., 2008, Fromme et al., 2008, Poupard et al., 2005*).

Při korelační a regresní analýze hmotnostních koncentrací učeben a vnějšího prostředí, pro posouzení vlivu umístění učebny v rámci budovy a vzhledem k silnici byla data oddělena podle toho, zda byly učebny obsazeny nebo ne, z důvodu eliminace vlivu osobohodin. Pro srovnání jsme analyzovali obě skupiny dat s přítomností i nepřítomností studentů. U jemné frakce je nejmenší rozdíl průměrné koncentrace v dny, kdy jsou studenti v učebnách a kdy ne, v učebně B11 u frakce D a P (viz výše). V ostatních učebnách takto malý rozdíl není. Koncentrace frakce P je vyšší za přítomnosti studentů a to pravděpodobně z důvodu častějšího přirozeného větrání, tzn. lepšího průniku jemného aerosolu do učeben. Osobohodiny s intenzitou větrání ve všech učebnách korelují (viz výše).

Při analýze dat bez přítomnosti studentů jsme mohli lépe posoudit vliv umístění učeben v rámci budovy na jednotlivé frakce aerosolu. To lze posoudit z lepších výsledků regresních analýz PM₁₀ vnitřního prostředí učeben a venkovního prostředí za nepřítomnosti osob. Nejlépe do vnitřního prostředí z vnějšího pronikají jemné částice stupně D a P, které v učebnách bez přítomnosti studentů a bez větrání korelují mezi vnitřkem a vnějškem ze všech frakcí nejlépe. U učebny B11, která je nejbližší silnici, se nejspíše korelační koeficienty za přítomnosti studentů zvýšily v důsledku větrání za přítomnosti osob, kdy aerosol snáze proniká do budovy, a zvýšené venkovní koncentrace aerosolu přes den, kdy studenti byli přítomni. Do dní, kdy studenti nebyli přítomni, jsou většinou zahrnuty dny pracovního klidu, ve kterých není tak velký automobilový provoz ovlivňující koncentraci jemného aerosolu.

Vztah hrubé frakce vnějšího a vnitřního ovzduší nemá žádné jednoduché vysvětlení. Výsledky korelací se podle učeben dosti různí. Nemůžeme říci tedy, že by hrubé frakce venkovního ovzduší měly vliv na koncentrace hrubé frakce uvnitř. Koncentrace částic hrubého módu učeben je tak spíše výsledkem přítomnosti osob a jejich aktivitou.

Regresní analýza PM₁₀ ve všech třech učebnách ukazuje lepší závislost PM₁₀ venkovního a vnitřního ovzduší bez přítomnosti osob, jelikož se na koncentraci PM 10 nejvíce podílí frakce D a P (pocházející z vnějšího prostředí), které mohou pronikat do budovy i při zavřených oknech. V případě PM₁₀ za přítomnosti studentů ovlivňuje celkovou koncentraci jejich aktivita a korelace s venkovním prostředím je tak nižší.

U PM₁₀ je ve dny s přítomností lepší korelace jemnější frakce bez přítomnosti lidí v nepracovní dny, stejně jako v jiné práci, kde byla ve stejné budově v Praze též prokázána lepší korelace PM₁₀ o víkendech. (*Braniš et al, 2005*). Naměřené vnitřní frakce PM₁₀ souvisí s venkovní koncentrací PM₁₀, což také potvrzují i jiné práce (*Diapouli et al., 2008, Avigo et al., 2008, Fromme et al., 2008*).

Po zhodnocení vlivu velikosti učebny, které jsme v naší studii vnímali jako kvalitativní znak charakteru učeben, jsme porovnali průměrnou koncentraci celkově PM₁₀ a také průměrnou koncentraci jednotlivých pěti frakcí A až P. Statistický rozdíl byl prokázán pouze u stupňů A a P. U nejjemnější frakce P je tento rozdíl způsoben nejspíše právě polohou učebny, kdy nejjemnější podíl aerosolu nejlépe proniká do učebny umístěné neblíže dopravní komunikaci, tj. do učebny B11 (viz výše). U frakce A, která náleží hrubému módu aerosolu, může být tento rozdíl způsoben právě rozdílným charakterem či velikostí učeben. Učebna B11, kde vychází průměrně koncentrace frakce A nejnižší, je používána pro praktika. Při praktikách se studenti u mikroskopů méně pohybují než v učebně B12 nebo v učebně B14,

kde bývá naopak aktivita studentů při hodinách nejvyšší. V učebně B14 je také průměrná koncentrace frakce A nejvyšší. Jiným důvodem může být rychlost sedimentace částic. V největší učebně B14 částice mohou sedimentovat pomaleji a sedimentace částic se zmenšující se učebnou se může urychlovat. Tyto vlivy by bylo vhodné pro upřesnění analyzovat v dalších studiích.

V průměru se teplota ani vlhkost v učebnách velmi nelišily. Naměřená teplota odpovídala normálu. Přesto nejnižší průměrná vlhkost byla naměřena v učebně B11 s minimem 11,76 %. Vhodnou vlhkostí pro učební prostředí se dle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, rozumí hodnota 30 až 65 %.

Lidé kvůli nedostatku smyslových orgánů nevnímají změny relativní vlhkosti tak jako teplotu (*Nagda et Rector, 2003*). Přesto je vnímání suchého vzduchu spojováno s kvalitou vnitřního prostředí. U vlhkosti vzduchu 5 až 30 % bylo zaznamenáno u epidemiologických studií dráždění očí a horních cest dýchacích a to zvláště při teplotách nad 22 °C. Delší vystavení nízké relativní vlhkosti může vést k větší náchylnosti k výskytu ekzému (*Wolkoff et al., 2007*). Dle našeho měření, kdy se teplota pohybuje průměrně okolo 22 °C a vlhkost kolem 30 %, podmínky mikroklimatu v učebnách nemusí být pro pohodu výuky nejvhodnější.

Podle korelace koncentrace venkovních frakcí aerosolu s venkovní teplotou a vlhkostí má na částice vliv spíše vlhkost. Vlhkost koreluje záporně se stupni A a B, tedy hrubou frakcí, a také se stupněm P. Koncentrace aerosolu je tak pravděpodobně ovlivněna i vlhkostí. Vyšší vlhkost vzduchu ovlivňuje resuspenzi částic a tak snižuje jejich koncentraci v prostředí. Vliv vlhkosti na koncentraci hrubé frakce byl prokázán také v jiných studiích (*Fromme et al., 2007*).

5. Závěr

Námi měřené aerosolové znečištění v učebnách není ve srovnání s limity nařízení vlády ČR č. 597/2006 Sb., o sledování a vyhodnocení kvality ovzduší, které udává vhodnou 24 hodinovou koncentraci PM_{10} nižší než $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vysoké. Nicméně, v koncentraci PM_{10} převládala koncentrace pod $2,5 \mu\text{m}$. Tyto částice mohou pronikat nejvíce do plic, a proto jsou považované za více nebezpečné. Nemůžeme posoudit vliv aerosolu závisící na chemickém složení, který by se ovšem mohl vzhledem k použité měřicí metodě dále vypracovat.

Koncentrace aerosolu zejména hrubé frakce jsou ovlivňovány přítomností osob při výuce. Resuspenze částic je pravděpodobně způsobována i mírou aktivity studentů. Množství koncentrace hrubé frakce stupně A se ukázalo závislé i na charakteru učebny. Charakter učeben je dán jejich velikostí a jejich rozdělením dle formy výuky, k jaké jsou převážně využívány. V lednové kampani bylo znát, že i přítomnost pouze jedné osoby může velice zvýšit koncentraci aerosolu. Množství částic v ovzduší je tedy zvláště závislé na vykonávané činnosti. Bylo by možné zvážit specifický úklid učeben podle jejich zaměření.

Frakce jemného aerosolu jsou ovlivněny průnikem částic z venkovního prostředí. U srovnání učeben dle umístění můžeme říci, že čím blíže je učebna k pravděpodobně hlavnímu zdroji jemného aerosolu - silnici, tím více aerosol proniká do vnitřního prostředí. Koncentrace jemných částic se snižovala se vzdáleností posluchárny od silnice. Vzhledem k pronikání jemných částic do budovy by bylo možné vyzkoušet jinou formu větrání, například nepřímo dveřmi do chodby.

Naměřená vlhkost v učebnách nepřispívá k optimálnímu prostředí vhodnému k výuce a soustředěnosti studentů. Vzhledem k naměřeným nepříznivým podmínkám mikroklimatu můžeme doporučit další studie týkající se tohoto tématu. V praktických souvislostech by stálo za úvahu umělé zvlhčování vzduchu v takových prostorech.

Použité zdroje informací

1. Avigo, D., Godoi, A.F. L., Janissek, P. R., Makarovska, Y. et al. (2008) Particulate matter analysis at elementary schools in Curitiba, Brazil. *Anal Bioanal Chem* 39 : 1459-1468
2. Braniš, M., Řezáčová, P., Domasova, M. (2005) The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom. *Environmental Research* 99: 143–149
3. Braniš, M., Šafránek, J., Hytychová, A. (2009) Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. *Building and Environment* 44: 1246-1252
4. Diapouli, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N., Spyrellis, N. (2008) Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area. *Environ Monit Assess* 136: 13–20
5. Dotterud, L.K., Van, T.D., Kvammen, B. et al. (1997) Allergen content in dust from homes and schools in northern Norway in relation to sensitization and allergy symptoms in schoolchildren. *Clinical and Experimental Allergy* 27: 252-261
6. EPA (1996) Review of national ambient air quality standards for particulate matter: Policy assessment of scientific and technical information: AOQPS staff paper. EPA-452/R-96-013. U.S. EPA, Research Triangle Park, NC
7. Fromme, H., Diemer, J., Dietrich, S., Cyrus, J., Heinrich, J., Lang, W., Kiranoglu, M., Twardella, D. (2008) Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air. *Atmospheric Environment* 42: 6597–6605

8. Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., Ruden, H. (2007) Particulate matter in the indoor air of classrooms - exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment* 41: 854–866

9. Gurjar, R.B., Molina, T.L., Ojha, Ch.S.P. (2010) Air pollution: Health and environmental impacts. *Environmental engineering*. CRC Press Boca Raton. 532 str.

10. Hauck, H. (1998) Revision of ambient air quality standards for PM. *Toxicol. Lett.*, 96,97: 269 – 276

11. Hinds, C. W. (1999) Aerosol technology – properties, behavior and measurement of airborne particles. John Wiley and sons. New York. 484 str.

12. Hoppe, P., Martinac, I. (1998) Indoor climate and air quality. *Int. J. Biometeorol.* 42: 1-7

13. IARC (1983) Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks of Chemicals to Humans. IARC Lyon. 32

14. Janssen, N. A. H., Hoek, G., Harssema, H., Brunekreef, B. (1997) Childhood exposure to PM10: Relation between personal, classroom and outdoor concentration. *Occupational and Environmental Medicine* 54: 888-894

15. Janssen, N.A.H., van Vliet, P.H.N., Aarts, F., Harssema, H., Brunekreef, B. (2001) Assessment of exposure to traffic related air pollution of children attending schools near motorways. *Atmospheric Environment* 35: 3875-3884

16. Lighty, J.S., Veranth, J.M., Sarofim, A.F. (2000) Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health. *Journal of The Air and Waste Management Association* 50: 1565-1618

17. Mészáros, E. (1999) Fundamentals of atmospheric aerosol chemistry. Akadémiai Kiadó Budapest. 308 str.

18. Misra, C., Singh, M., Shen, S. et al. (2002) Development and evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS) *Journal of Aerosol Science* 33: 1027-1047
19. Monn, C., Fuchs, A., Hogger, D. et al. (1997) Particulate matter less than 10 μm (PM10) and fine particles less than 2.5 μm (PM2.5): relationships between indoor, outdoor and personal concentrations. *Science of The Total Environment* 208: 15-21
20. Nagda, N.L., Rector, H.E. (2003) A critical review of reported air concentrations of organic compounds in aircraft cabins. *Indoor Air* 13: 292-301
21. Parker, J. L., Larson, R. R., Eskelson, E., Wood, E. M., Veranth, J. M. (2008): Particle size distribution and composition in a mechanically ventilated school building during air pollution episodes. *Indoor Air* 2008. 18: 386–393
22. Pope, A.C., Burnett, R.T., Thun, M.i., Cykle, E.E., Knevski, D.K. (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama Journal of The American Medical Association* 287: 1132-1141
23. Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the air and Waste management association* 56: 709-742
24. Poupard, O., Blondeau, P., Iordache, V. et al. (2005) Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools. *Atmospheric Environment* 39: 2071-2080
25. Salma, I., Maenhaut, W., Zemplén-Papp, E. et al. (2001) Comprehensive characterisation of atmospheric aerosols in Budapest, Hungary: physicochemical properties of inorganic species. *Atmospheric Environment* 35: 4367-4378
26. Schwartz, J. (1994) Air pollution and daily mortality: a review and meta analysis. *Environmental Research*. 64: 36 – 52
27. Schwartz, J. (2004) Air pollution and children's health. *Pediatrics* 113:1037-1043

28. Schwartz, J., Dockery, D. W., Neas, L. M. (1996) Is daily mortality associated specifically with fine particles?. *Journal Air Waste Management Association* 46: 927-939
29. Simonish, S.L., Hites, R.A. (1995) Global distribution of persistent organochlorine compounds. *Nature*, 269:1851 – 1854
30. Tian, Z.F., Tua, J.Y. Yeoh, G.H., Yuen, R.K.K. (2006) On the numerical study of contaminant particle concentration in indoor airflow *Building and Environment*. 41: 1504–1514
31. Tippayawong, N., Khuntong, P., Nitatwichit, Ch., Khunatorn, Y., Tantakitti, Ch. (2009) Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations innaturally ventilated school environments. *Building and Environment* 44: 188–197
32. van de Vate, J. F. (1990) *Aerosols in changing world*. International Institute for Applied Systems Analysis 90: 521-530
33. WHO (2000) *Guidelines for air quality*. World Health Organization, Geneve, 2000
34. Wolkoff, P., Kjærgaard, S. K. (2007) The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International* 33: 850–857

internet 1: <http://www.skinc.com/prod/225-370.asp> [červenec. 2011]

internet 2: <http://www.skinc.com/prod/717-510.asp> [červenec. 2011]

internet 3: <http://www.tovatech.com> [červenec. 2011]