

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Ústav pro životní prostředí**

**Ekologie a ochrana prostředí
Ochrana životního prostředí**



Jiří Hromádka

**Kvalita ovzduší ve školách
Air quality in schools**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Prof. RNDr. Martin Braniš, CSc.

Praha, srpen 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přejaté) informace budou řádně citovány. Rovněž prohlašuji, že předložená diplomová práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze, dne 15. 8. 2013

Jiří Hromádka

Poděkování:

Děkuji vedoucímu práce prof. RNDr. Martinu Branišovi, CSc. za pomoc, trpělivost a poskytnuté rady při sepisování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Jitce Štolcpartové za pomoc spolupráci během prováděných kampaní a také všem pracovníkům ZŠ Kladská za jejich pomoc během měření.

Obsah

Seznam tabulek	5
Seznam obrázků	5
Abstrakt (CZE)	6
Abstract (EN)	7
1. Úvod	8
2. Literární rešerše	10
2.1 Ventilace a oxid uhličitý	10
2.2 Zápach a těkavé aromatické látky	14
2.3 Teplota a relativní vlhkost	16
2.4 Aerosolové částice	18
2.5 Shrnutí a cíle práce	21
3. Metodika práce	24
4. Výsledky	26
5. Diskuse	36
6. Závěr	39
7. Seznam použité literatury	42

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Srovnání limitní koncentrace vybraných VOC's v ČR a ve světě	16
Tabulka č. 2: Limitní hodnoty fyzikálních parametrů mikroklimatu ve školách	18
Tabulka č. 3: Přehled sledovaných učeben v ZŠ Kladská	24
Tabulka č. 4: Popisné charakteristiky PM ₁₀ v době výuky	29
Tabulka č. 5: Popisné charakteristiky CO ₂ v době výuky	30
Tabulka č. 6: Popisné charakteristiky relativní vlhkosti během výuky	31
Tabulka č. 7: Popisné charakteristiky teploty během výuky	32
Tabulka č. 8: Poměr koncentrace PM ₁₀ uvnitř a venku během výuky	33
Tabulka č. 9: Koncentrace PM ₁₀ během přestávek	34
Tabulka č. 10: Poměr koncentrace PM ₁₀ během přestávek a po celou dobu výuky	34

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Koncentrace PM ₁₀ ve vybraných učebnách dne 7.11. 2011	35
Obrázek č. 2: Koncentrace CO ₂ ve vybraných učebnách dne 6.12. 2011	35

Abstrakt (CZE)

Diplomová práce popisuje kvalitu ovzduší ve školách, hlavní faktory, které ji ovlivňují, a na základě provedené longitudinální studie navrhuje možná řešení vedoucí ke zlepšení situace. Opírá se o literární rešerši odborné literatury, na jejímž základě pak byla provedena longitudinální studie v ZŠ Kladská, Praha, Česká Republika. Ačkoliv je kvalité vnitřního prostředí věnována stále větší pozornost v odborné literatuře, jedná se v drtivé většině o krátkodobé studie, kde chybí komplexní pohled na danou problematiku. Školní budova byla vybrána, protože děti patří mezi jednu z rizikových skupin z hlediska zdravotních dopadů způsobených špatnou kvalitou prostředí a zároveň tráví ve škole podstatnou část dne. Důležitými faktory ovlivňujícími zdraví a komfort obyvatel všech vnitřních prostor jsou teplota, relativní vlhkost, koncentrace aerosolových částic a oxidu uhličitého, které byly měřeny v rámci provedené studie. V průběhu celého školního roku bylo provedeno 8 týdenních měřících kampaní s cílem maximálně postihnout variabilitu sledovaných faktorů v rámci vyučovacího dne, roční doby, venkovní situace či v rámci různých učeben ve školní budově. Koncentrace aerosolových částic (PM_{10}) nepřekročila limit daný vyhláškou, přičemž průměrné hodnoty byly ve většině kampaní nižší než $70\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, přičemž vliv aktivity žáků během přestávky byl vyhodnocen jako nejvýznamnější faktor. Venkovní koncentrace ovlivnila významně vnitřní pouze při zvýšených hodnotách a tento trend byl pozorován pouze v rámci jedné kampaně. Průměrná naměření koncentrace CO_2 překročila ve všech případech hranici 1000ppm, v pěti případech pak hranici 1500ppm danou českou legislativou. V zimních měsících byly pozorovány nízké průměrné hodnoty relativní vlhkosti, přičemž průměrná hodnota poklesla v jednom případě pod hranici 30%, která je stanovena jako spodní hranice určená legislativou. Všechny naměřené hodnoty teploty byly v normě a žádná výrazná fluktuace hodnot nebyla pozorována. Výsledky ukazují na nedostatečnou ventilaci v učebnách v průběhu celého roku, v zimních měsících pak i na nedostatečnou vlhkost vzduchu. Vysoká míra variability koncentrace PM_{10} a CO_2 byla pozorována v jednotlivých učebnách i během školního roku, což vede k závěru, že spíše než provádění většího množství krátkodobých studií by bylo vhodnější se zaměřit na dlouhodobější projekty a zejména pak na vysvětlení dané problematiky zástupcům škol a jejich zřizovatelům ze státní správy.

Klíčová slova: Školy, ovzduší, mikroklima

Abstract (EN)

This thesis describes air quality in schools, its main factors of interest and according to the longitudinal study it suggests possible solutions for improvement. The study had been done in Kladská elementary school, Prague, Czech Republic, based on the findings obtained from the initial literature review. Although many scientific papers have been published mainly during last decade, there is a very limited amount of information concerning this issue within a longer timescale and a complex point of view is missing. The school environment was chosen because children are one of the groups at higher risk when adverse health effects caused by inadequate indoor air quality are evaluated. Aerosol particles and carbon dioxide concentration, temperature and relative humidity levels are important factors of interest in this case and all of them were included in the study. 8 measuring campaigns, each of them took 1 week, had been done throughout the whole school year. The main aim of these campaigns was monitoring and describing the variability of all selected factors during the day or year as well as between different classrooms. Average aerosol particles concentration (PM_{10}) didn't exceed $70\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ during most of the campaigns and the pupil's activity was evaluated as the main influencing factor. The outdoor concentration affects the indoor one only at higher levels and this trend was observed only once. Average CO_2 level exceeded 1000ppm at all times and the 1500ppm legislation limit was exceeded 5 times. Low average relative humidity concentrations were observed during winter and the legislation limit of 30% wasn't fulfilled once. All the temperature values measured were within the correct levels. Results show the inadequate ventilation in the classrooms throughout the whole year and also show the inadequate relative humidity during the winter. High variability was observed within concentration of PM_{10} and CO_2 between different classrooms and throughout the year. These findings lead to a conclusion that a higher concern on the further longitudinal studies should be made in the future instead of the huge amount of the short ones. The main solution of the whole issue seems to be explanation of the situation to the school management and teachers as well as the governmental bodies involved.

Key words: schools, air quality, microclimate

1. Úvod

Ačkoliv znečištění ovzduší a z něj plynoucí dopady na zdraví obyvatel je jakožto jeden z klíčových problémů zmiňováno v posledních letech stále častěji, nicméně větší publicita zatím neznamená jeho vyřešení. Tento problém doznal největší mezinárodní pozornosti během olympijských her v Pekingu v roce 2008, kdy byla monitorována situace vzhledem k provedeným opatřením v dopravě a jejich efektivitě vůči koncentraci aerosolových částic, oxidu uhelnatého a oxidů dusíku (Wang a Xie, 2009), ozónu a dalších polutantů (Wang et al., 2009) či možná rizika zvýšené expozice hrubého aerosolu (částice o průměru menším než 10 μ m) pro sportovce (Braniš a Větvička, 2010).

Celkově je problém kvality ovzduší spojován právě s rozvíjejícími se ekonomikami, které zažívají hospodářský a s ním spojený i emisní boom. Špatná kvalita ovzduší pak má dopad zdraví celé populace a zvláště pak dětí (Guidotti a Gitterman, 2007). V rámci Evropské Unie, USA a dalších ekonomicky rozvinutých zemí došlo k určité stabilizaci situace, kdy kombinace regulací a využití nových „čistších“ technologií doprovázená omezením těžkého průmyslu v západní a posléze i ve střední Evropě přinesla zlepšení kvality ovzduší (např. WHO, 2000; Parrish et al., 2011).

Roli největšího znečišťovatele přebrala po průmyslu doprava a i prognózy do budoucna ukazují, že minimální příznivé efekty dosažené snižováním emisí budou více než kompenzovány nárůstem zejména osobní automobilové dopravy. V Praze byl pozorován pokles koncentrace oxidů dusíku v průběhu devadesátých let v souvislosti s poklesem používání tuhých paliv, ale od roku 2000 byl pozorován mírný růst způsobený právě dopravou (Braniš, 2009), naproti tomu koncentrace SO₂ v prostředí poklesla v ČR mezi roky 1993-2001 o 80% (Hůnová et al., 2004).

I při pohledu do historie, zvláště ve srovnání s nejvíce zmiňovanou smogovou událostí, která v roce 1952 postihla Londýn, by se zdálo, že problémy a zdravotní rizika spojená se znečištěním ovzduší jsou již vyřešeny (Bell a Davis, 2001). Také kvalita ovzduší v České Republice se výrazně zlepšila od roku 1990, nicméně smogové situace z Ostravska jsou stálou připomínkou, že kvalitou ovzduší se je třeba zabývat (Tomášková et al., 2011).

Všechny výše zmíněné události a jevy se však týkají venkovního prostředí, nicméně počet lidí a čas strávený uvnitř budov i nadále narůstá, jak se zvyšuje míra urbanizace ve světě, mění se i životní styl (Ekmekcioglu a Keskin, 2007). Pokud máme

posuzovat potenciální negativní dopad na lidské zdraví, je třeba zohlednit fakt, že drtivá většina občanů tráví okolo 90% času uvnitř budov, přičemž zájem vědecké i laické veřejnosti o tuto problematiku narůstá až v posledních deseti letech (Leech et al., 2002).

V souvislosti s mikroklimatem uvnitř budov je často zmiňován vzrůstající podíl astmatiků v populaci. Děti jsou jednou z ohrožených skupin a zlepšení kvality vnitřního ovzduší se zdá být vhodným opatřením pro omezení výskytu astmatu u dětí (Breyse et al., 2010).

Sledovat kvalitu ovzduší je důležité s ohledem na lidské zdraví, které nepřímo ovlivňuje i pracovní docházku, výkon a tím i ekonomiku. Zhoršená kvalita ovzduší má negativní dopad na lidské zdraví a v krajním případě může způsobit i úmrtí (Pope a Dockery, 2006), nicméně zřejmě vhodnější je vyjadřovat negativní dopady jakožto „zhoršení kvality života“ nebo vyjádření pomocí let ztracených díky zdravotnímu riziku („disability adjusted life year“ (DALY)) (WHO, 2013).

Zdraví a vzdělání by měli být prioritami každé země i samosprávy všude na světě. Tudíž pokud spojíme dohromady tato dvě základní kritéria pro řešení problému, kde je nejlépe začít se sledováním kvality vnitřního prostředí, pak jsou školy jasnou první volbou. Výsledkem by mělo být zajištění co nejlepších mikroklimatických podmínek ve školách a omezení expozice polutantům na minimum.

Děti jsou rizikovou skupinou ze zdravotního hlediska. Jejich organismus je více náchylný k patologickým vlivům a zejména pak jejich respirační systém a plíce, které vzhledem k velikosti těla mají větší povrch a tím pádem i vdechují poměrně větší množství vzduchu než je tomu u dospělých (Schwartz, 2004). Jelikož děti tráví ve školních budovách nemalou část dne, je více než vhodné zjistit, v jakých mikroklimatických podmínkách pobývají. Bylo totiž mnohokrát ukázáno, že kvalita ovzduší nemálo ovlivňuje například soustředěnost, výkon, únavu a u citlivých jedinců i zdraví žáků. Kvalita ovzduší ve třídách tedy představuje klíčový faktor pro kvalitní výuku ve školách (Daisey et al., 2003).

Tato práce zachycuje vzrůstající poptávku vědecké i laické veřejnosti a zabývá se problematikou kvality ovzduší ve školách. Na základě následujícího souhrnu odborné literatury jsou definovány klíčové otázky a faktory jejichž uplatnění v praxi bylo testováno během měřících kampaní v Základní Škole Kladská, s výsledky a diskusí prezentovanými v samostatných kapitolách.

2. Literární rešerše

Kvalitu vnitřního ovzduší lze posuzovat podle několika faktorů, přičemž nejčastější využívanými jsou koncentrace aerosolových částic (běžně označovaných za polévatý prach, anglicky pak “particulate matter“ (PM)) a míra ventilace. Dále je možné monitorovat fyzikální faktory jako je teplota, relativní vlhkost, míra intenzity světla a hluk či chemické polutanty, přičemž nejrozšířenější je měření celkové koncentrace těkavých organických látek (“volatile organic compounds“ (VOC’s)). Bohužel většinu prací můžeme rozdělit do dvou linií, jedna sledující míru ventilace uvnitř budov a potažmo koncentraci CO₂ nebo VOC’s a druhá skupina prací se zabývá koncentrací PM, takže komplexní studie zabývající se mikroklimatem ve školách chybí.

2.1 Ventilace a oxid uhličitý

Nepřiměřená míra ventilace se projevuje zvyšující se koncentrací oxidu uhličitého v učebně a zvýšením koncentrace všech polutantů s převažujícím vnitřním zdrojem (zejména hrubá složka aerosolu). Problémy s neadekvátní mírou ventilace nastávají především v zimních měsících a jsou leckdy způsobeny i ekonomickým faktorem, kdy provozovatelé škol chtějí šetřit za energie. Při poměru ceny energie za topení na jednoho studenta se ukázalo, že všechny školy, které měly výborné ventilační podmínky, patřily rovněž mezi školy s největšími náklady za topení (Grimsurd et al., 2006).

Bylo prokázáno, že míra ventilace ve třídách je ve většině případů neadekvátní. V souvislosti se sledováním ventilace byly zaznamenány také alergeny a vzduchem unášené bakterie. Závěrem lze konstatovat, že nízká míra ventilace se podílí na negativních dopadech na zdraví žáků (Daisey et al., 2003).

Špatné větrání vede k akumulaci látek vznikajících lidskou činností i případných dalších polutantů, které se mohou ve školním prostředí objevit, zejména pak při zvýšené fyzické aktivitě dětí nebo při úklidu (Corsi et al., 2002).

Zvýšení míry ventilace a dodržování doporučených limitů mohou výrazně přispět ke snížení negativních zdravotních dopadů způsobených špatnou kvalitou vnitřního prostředí (Sundell et al., 2011).

Vyhláška č. 343/2009 sb. je prováděcím předpisem zákona č.258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví, která upravuje mj. míru ventilace v zařízeních pro výchovu a

vzdělávání dětí a mladistvých. Stanoveny jsou minimální ventilační limity ve výši $20\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ na žáka pro šatny a tělocvičny a $20\text{-}30\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ na žáka pro učebny.

V USA je tento limit stanovený standardem ASHRAE 62.1 který určuje míru ventilace v závislosti na typu učebny a velikosti třídy mezi $4\text{-}20\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ na žáka ($14,4\text{-}72\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ na žáka), přičemž nejvyšší hodnota se vztahuje k výtvarné dílně, nejnižší pro vysokoškolská auditoria, hodnoty kolem $8\text{-}8,5\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ na žáka odpovídají požadavkům na učebny základních škol ($28,8\text{-}30,6\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ na žáka).

V současné době není v platnosti žádná jednotná směrnice daná Evropskou Unií ohledně ventilačních limitů. Nicméně jelikož stávající rok 2013 byl vyhlášen rokem O vzduší a cílem projektu HealthVent je vytvořit směrnici týkající se ventilačních limitů a jejich zdravotních dopadů za účelem ochrany obyvatel v místech jako jsou školy, nemocnice, kanceláře a domácnosti před negativními dopady způsobenými špatnou kvalitou vnitřního prostředí. Je pravděpodobné, že v budoucnu bude i ventilační limit určen jednotně v rámci EU. Směrnice má také pomoci efektivnější spotřebě energií (HealthVent, 2013).

Ventilace jako taková je však pouhým ukazatelem, u kterého nelze stanovit konkrétní zdravotní dopady, ty jsou spojeny s jednotlivými látkami přítomnými v mikroklimatu uvnitř budov. Pro určení míry ventilace může být využito několika různých přístupů. Nejjednodušším se jeví použít nastavení ventilačních zařízení v budovách s mechanickou ventilací, nicméně nepravidelná a nedostatečná údržba těchto zařízení mnohdy způsobí, že výsledná ventilační míra je nižší než je nastavení ventilace a tudíž nedostatečná vzhledem k potřebám jedinců uvnitř (Morse et al., 2009) Dalším negativním faktorem tohoto přístupu je fakt, že drtivá většina škol v učebnách využívá přirozené ventilace.

Celková propustnost pláště budovy může být posuzována pomocí pozorování sledování koncentrace přenosného plynu, která je předem známá a jejího poklesu v čase, pro tento způsob je hojně využíván především fluorid sírový (SF_6) nebo per-floro-uhlíkový ukazatel ("perfluorocarbon tracer" (PFT)) (Hanninen, 2013).

Nicméně podstatná nevýhoda toho přístupu tkví v zanedbání faktoru jedinců uvnitř budovy a jejich metabolismu při ovlivnění vnitřního prostředí. Právě z tohoto důvodu se zdá být nejvhodnějším způsobem posuzování míry ventilace právě sledování koncentrace oxidu uhličitého uvnitř budov, resp. rozdílu hodnot naměřených uvnitř a venku. Hlavním zdrojem oxidu uhličitého je metabolismus jedinců uvnitř, tudíž v zaplněné místnosti s nedostatečnou ventilací jeho koncentrace strmě roste, během ventilace pak klesá.

Koncentraci CO₂ jakožto indikátoru je zejména vhodné použít v budovách s vysokým počtem jedinců uvnitř, kde celková koncentrace je mnohem vyšší než venkovní koncentrace v ovzduší (Hanninen, 2013).

Navíc již v roce 1858 se objevilo tvrzení, že koncentrace oxidu uhličitého jako takového není důležitá, ale že je to indikátor pro další látky produkované člověkem. Zároveň Von Pettenhofer ve stejném roce určil hranici 1000ppm, jakožto míru kvality vzduchu vhodného k dýchání uvnitř (Pettenkofer, 1858 ex Geelen et al., 2008).

Zkratka ppm pochází z anglického termínu „parts per milion“ a který se používá pro popis velmi malých koncentrací látek v prostředí. Jedná se vlastně o poměr dané látky vůči tomuto prostředí. Tento poměr může být hmotnostní nebo objemový, pak je někdy značen jako ppm vol (od „volume“). V této práci je vždy míněn právě objemový poměr ppm vol, nicméně pro větší jednoduchost značení je uveden jen jako ppm. V případě CO₂ je využito vtahu, že 1000ppm vol odpovídá 1938 mg v 1 m³ vzduchu (Výpočet je založen na objemu dané látky, který závislý na molární hmotnosti a množství).

Koncentrace oxidu uhličitého byla předmětem dalšího zkoumání. Již průzkum z roku 1880 ukázal, že v učebnách ve švédských školách často překračovala hranici 1000ppm (Heyman, 1880 ex Walinder et al., 1998).

Z koncentrace lze tak odvodit míru ventilace a naopak, což je výhodné zejména u budov s přirozenou ventilací. Poprvé bylo této závislosti využito již v roce 1836 a ventilační limit byl stanoven na 2dm³.s⁻¹ (Tredgold, 1836 ex Sundell et al., 2011), aby pak v roce 1893 byla tato hranice posunuta na 15dm³.s⁻¹ (Billings 1893 ex Sundell et al., 2011). Za první regulace danou státní správou pak lze považovat rozhodnutí Newyorské Státní Komise pro Ventilaci (New York State commission on Ventilation), která na základě literární rešerše a vlastního výzkumu stanovila limit 5-7dm³.s⁻¹ na osobu pro školní budovy (New York State Commission on Ventilation, 1931 ex Sundell et al., 2011).

V současnosti je pro vnitřní prostředí ve školách doporučena norma 1000ppm (ASHRAE-American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers), stejný limit platí ve Skandinávii, avšak u nás je oficiální hranice stanovena na 1500ppm, ovšem i tak je tento limit pravděpodobně překračován, zejména pak v zimních měsících.

Nicméně koncentrace kolem 1000ppm je hodnotou kdy mohou být pozorovány dopady na zdraví způsobené nedostatečnou mírou ventilace (špatnou kvalitou ovzduší jako celku), neříká tedy, že koncentrace CO₂ může mít vliv na zdraví po jejím překročení. Dále pak bylo doporučeno používat vztahu mezi vnější a vnitřní koncentrací, přičemž doporučený rozdíl by měl být nižší než 700ppm. V současnosti však ASHRAE standard

(ANSI/ASHRAE Standard 62.1 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality) již zcela vypustil hodnotu pro CO₂ a uvádí rozdíl 700ppm pouze jako doporučení, které je součástí Apendixu C, přesto je běžně používána v praxi při posuzování kvality vnitřního ovzduší.

V České Republice situace ohledně limitní hodnoty CO₂ uvnitř budov, resp. ve školách, není jednoznačná. Státní Zdravotní Ústav uvádí jako doporučenou hodnotu 1500ppm (Mikešová a Kotlík, 2008), stejná hodnota je zmiňována v projektu pro MŽP o využití nucené ventilace ve školách, ČSN EN 13779 stanovuje 4 kategorie kvality vnitřního ovzduší vztažené na rozdíl vnitřní a venkovní koncentrace a to vysokou kvalitou vzduchu ($\Delta\text{CO}_2 < 350$), střední ($\Delta\text{CO}_2 < 500$), středně nízkou ($\Delta\text{CO}_2 < 800$) a nízkou ($\Delta\text{CO}_2 < 1200$) (MŽP, 2010).

Samotný oxid uhličitý negativně ovlivňuje komfort při překročení hranice 2000ppm, avšak je nutno vzít v úvahu velké rozdíly v senzitivitě jedinců. Vážený osmihodinový průměr 5000ppm je brán jakožto maximum přípustné pracovní expozice dle mezinárodně uznávané americké instituce „Occupational Safety and Health Administration“ (OSHA).

Při překročení 1500ppm lze pozorovat snížení pozornosti žáků, se vzrůstající koncentrací se pak může objevit zvýšená únava (Coley et al., 2007). Zvýšení koncentrace CO₂ o 1000ppm se také projeví ve zvýšeném počtu průměrně zameškaných dní o 10-20% (Shendel et al., 2004). Dle srovnání výsledků provedených studií dochází k překročení 1500ppm v téměř třetině škol (Chatzidiakou, 2012). Při použití komplexních schopností, paměti a mluveného projevu pro zadané úkoly zvyšuje míra negativního dopadu na žáky (Bako'-Biro' et al., 2012).

Nepřímá úměrnost byla pozorována mezi pozorností žáků (množstvím vykonané práce) a mírou ventilace během experimentu v Dánsku, kdy byli žáci podrobeni různým ventilačním podmínkám, přičemž bylo posuzováno množství vykonané práce. Výsledky byly potvrzeny u dvou skupin různě starých žáků a také v různých ročních obdobích. Mírné zlepšení bylo také pozorováno u dosažených výsledků práce (Wargoocki et al., 2006). Ke stejným závěrům dospěla i studie z USA, která však nebyla experimentální, nýbrž pozorovací, kde byly výsledky srovnávacího testu v 54 školách porovnány s koncentrací oxidu uhličitého (Shaugnessy et al., 2006). Hodnocení pozornosti a výsledků žáků pomocí exaktních metod závislých pouze na vnějších parametrech však může být zavádějící.

Zhoršená kvalita ovzduší ve školách je spojována se zdravotními dopady, ale vnitřní prostředí lze snadno zlepšit pomocí zvýšené ventilace vzduchu. Toto na první

pohled jednoznačné řešení se ale stále nedaří uvádět do praxe. V Nizozemí byl proveden experiment vedoucí k lepší ventilační činnosti ve školách. V rámci vzdělávacího projektu se zapojením žáků a semináře pro učitele byla zúčastněným vysvětlená nutnost zvýšeného větrání. Druhá skupina škol byla vybavena přístrojem na měření CO₂, ve třetí proběhlo školení personálu. Ventilační činnost byla monitorována 6 týdnů po této intervenci, přičemž projekt se zapojením žáků přinesl nejlepší výsledky, následovaný školami s přístrojem. Výsledky škol, kde byla pouze doporučena vyšší ventilační činnost, se téměř shodovaly s kontrolní skupinou (Geelen et al., 2008).

2.2 Zápach a těkavé aromatické látky

Dalším faktorem ovlivňujícím vnitřní prostředí může být nepříjemný zápach (ale i vůně) produkovaný osobami nebo procesy odehrávajícími se uvnitř budov a místností. Do prostředí každý z nás uvolňuje nejen kožní šupinky a kapičky potu, ale i další látky uvolňující se z kosmetiky nebo vznikající přirozeně. Celkově tyto mikroskopické látky nazýváme osobním oblakem („personal cloud“) (Corsi et al., 2007).

Po chemické stránce můžeme tyto směsi spolu s dalšími chemikáliemi vyskytujícími se ve vnitřním prostředí zařadit jako těkavé organické látky. Kromě lidských zdrojů (kosmetika a metabolismus) se mohou uvolňovat také z koberců, podlahy či nábytku (formaldehyd). Učebna výtvarné výchovy může být zvláště rizikovým místem, protože používání barev a lepidel způsobuje emituje tyto látky do prostředí ve zvýšené míře (U.S. EPA, 2012a), přičemž nutnost zvýšené ventilace v tomto typu učeben již byla zmiňována.

Mezi nejčastější VOC's emitované člověkem patří aceton, kyselina máselná, etanol a metanol, přičemž právě ty jsou zdrojem „zatuchlého vzduchu,“ který bývá laickým termínem pro špatnou kvalitu vnitřního ovzduší. Dále pak jsou zastoupeny acetaldehyd, alkyl-alkohol či kyselina octová.

VOC's způsobují rozličné množství krátkodobých i dlouhodobých negativních dopadů na lidské zdraví, přičemž některé z těchto látek jsou prokázanými karcinogeny, ovšem zdaleka ne všechny představují závažné zdravotní riziko. Příznaky inhalace je dráždění nosní sliznice a hrtanu, bolesti hlavy či alergická reakce, zvýšená únava a malátnost. Na metabolické úrovni se projevuje poklesem hladiny cholin-esterázy v krvi (U.S. EPA, 2012b).

V souvislosti s přítomností VOC's ve vnitřním prostředí je často zmiňován i syndrom nemoci z budov ("Sick building syndrome" (SBS)). Tento syndrom je úzce spojen s nedostatečnou kvalitou vnitřního ovzduší, resp. četností ventilace, chemického složení vzduchu a fyzikálních faktorů jako je teplota či relativní vlhkost, nicméně přesný zdroj se považuje za neznámý. Vyvolává nespecifické reakce projevující se zhoršenými zdravotními důsledky všech osob, které tráví čas v inkriminované budově, přičemž mezi příznaky patří zvýšená únava, ztráta koncentrace, bolest očí, závratě, svědění pokožky nebo dýchací potíže. Tento syndrom byl častěji popsán u budov s mechanickou ventilací a ženy se zdají být více náchylné než muži. Syndrom nemoci z budov však není záležitostí jenom škol, byl pozorován takřka u všech typů budov (National Health Service (NHS), 2012).

Další zdravotní dopady pocházející z pobytu uvnitř budov byly popsány jako „Building related illness“ (BRI), kde příčina konkrétních zdravotních potíží se váže k určitému polutantu, nebo mikroklimatickému faktoru a je známa. Jakožto příčiny BRI jsou nejčastěji identifikovány VOC's, formaldehyd či azbest (U.S. EPA, 2007).

Koncentrace jednotlivých chemických látek může být posuzována jednotlivě (např. pro benzen, formaldehyd atd.) nebo je stanoven limit pro celkovou koncentraci těkavých uhlovodíků ("Total volatile organic compounds" (TVOC's). V Kalifornii, USA, byl vyvinut tzv. CHP systém jako nástroj pro vybudování "Zdravých škol" ("Healthy schools"), který zahrnuje měření a limity pro TVOC, formaldehyd a další vybrané VOC's (Oppl a Neuhaus, 2008).

Pro únik VOC's z podlahových krytin je v EU stanoven limit normou EN 14041 pro pevné povrchy a linolea a EN 14342 pro dřevěné podlahy, pro únik ze stavebních materiálů a nábytku je pak stanovena norma EN 16000.

Limitní koncentrace pro jednotlivé látky jsou předmětem legislativy každé země samostatně, kdy jsou vytvářeny seznamy látek a odpovídajících nejnižších přípustných koncentrací. V České Republice je tato koncentrace vybraných VOC's v obytných prostorech stanovena vyhláškou 6/2003 (Příloha č. 2), která je prováděcím předpisem zákona 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví. V Tabulce č. 1 níže jsou uvedeny limitní koncentrace vybraných látek platné v ČR, Německu, Francii a USA. Rozdíly v legislativě daných států nejsou zapříčiněny rozdílnými zdravotními riziky pro jejich obyvatele, ale uplatněním různých přístupů, z uvedeného vyplývá, že harmonizace je nutná napříč zeměmi (Oppl a Neuhaus, 2008).

Koncentrace VOC's ve školách je vázána hlavně na přítomnost a počet dětí

vzhledem k velikosti učebny a na intenzitu ventilace, přičemž pro tyto dva faktory platí nepřímá úměra.

Tabulka č. 1: Srovnání limitní koncentrace vybraných VOC's v ČR a ve světě

látka/země	ČR*	USA** (Kalifornie)	Francie**	Německo**
toluen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	300	1900	300	300
formaldehyd [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	60	120	10	33
suma xylenu [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	200	2200	200	700

*data pro ČR převzata z vyhlášky 6/2003 – platí pro obytné prostory

**pro země mimo ČR jsou data převzata z Oppl a Neuhaus, 2008

2.3 Teplota a relativní vlhkost

Mezi fyzikální faktory ovlivňující mikroklima ve školách patří teplota a relativní vlhkost (RH z anglického “relative humidity“). Tyto dva faktory spolu úzce souvisí, teplota je posuzována tzv. tepelným komfortem, který je ovlivněn právě relativní vlhkostí, dále pak prouděním vzduchu, časem stráveným v budově a v neposlední řadě aktivitou, oblečením a osobní citlivostí každého jedince. Celkově tepelný komfort vyjadřuje spokojenost jedince s daným prostředím, přičemž se uvádí nejvyšší možné přijatelné procento jedinců nespokojených s danými podmínkami („percentage part of dissatisfied“ (PPD)). Pro PPD menší než 10 se uvádí minimální teplota 20 °C a maximální 26 °C (MŽP, 2010).

V souvislosti s teplotou ještě může nastat situace lokálního teplotního nepohodlí, kdy dojde k přílišnému rozdílu teplot mezi různými částmi těla, nejčastěji mezi hlavou a kotníky. Tyto rozdíly jsou zvláště patrné v zimě v učebnách s přirozenou ventilací, kdy chladnější vzduch z venku klesá k zemi (MŽP, 2010).

Extrémně nízká či vysoká teplota s sebou přináší samozřejmě dopad na zdraví, nicméně takovéto hodnoty nejsou ve školních budovách očekávány, limity dané normou se snaží o minimalizaci případných dopadů na duševní pohodu žáků, která je také součástí zdraví podle definice WHO. Příliš nízká nebo naopak vysoká relativní vlhkost vzduchu je také negativně vnímána jedinci uvnitř budov, opět s různou mírou citlivosti.

V ČR jsou zdravotní problémy spojené převážně s nízkou vlhkostí, která byla

velmi často pod 30% hranicí během zatím jediného monitoringu provedeného Státním zdravotním Ústavem ve školách (Mikešová a Kotlík, 2008). Převážně v zimních měsících, kdy ohřivaných vzduch z venkovního prostředí ztrácí svoji přirozenou vlhkost, dochází k rapidnímu poklesu RH.

Krátkodobý negativní dopad nízké relativní vlhkosti na zdraví nebyl experimentálně prokázán (Andersen et al., 1974) nicméně dlouhodobý opakovaný pobyt v prostředí s nízkou relativní vlhkostí může způsobit vysychání sliznic horních a dolních cest dýchací, což pak vede k dráždivému kašli, dále pak pálení očí či svědění pokožky. Nízká RH také vede k větší citlivosti sliznice vůči aerosolovým částicím, pylovým zrnům a dalším přítomným alergenům v prostředí. Nízká RH umožňuje delší přežití různých virů a může tak napomáhat šíření vzduchem šířených nemocí (Arundel et al., 1986).

Příliš velká vlhkost, podporovaná zvláště pak nadužíváním zvlhčovacích prostředků, zase může vést ke zvýšenému výskytu alergií. Celkově lze pozorovat nárůst mikroorganismů ve vnitřním prostředí se stoupající vlhkostí. Spóry, mycelia a všechny organické látky vypouštěné do ovzduší přítomnými mikroorganismy mohou mít negativní vliv na zdraví, přičemž nejčastěji jsou přítomné plísně a bakterie kmene *Actinomyces*. Nejrozšířenější plísně uvnitř budov jsou rody *Penicillium*, *Aspergillus* a *Cladosporium*. Venkovní ovzduší je největším zdrojem hub přítomných v tom vnitřním. Mikroorganismy představují zdravotní riziko zejména pro horní a dolní cesty dýchací, mezi popisované příznaky však také patří bolesti hlavy a žaludku (Husman, 1996).

Pro minimalizaci zdravotních dopadů způsobených RH nebo kde RH vystupuje jako zhoršující se faktor, je doporučeno udržovat RH mezi 40 až 60% (Arundel et al., 1986).

Vyhláška 343/2009 sb., jež je prováděcím předpisem zákona č.258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a upravuje předchozí vyhlášku 410/2005 sb., v příloze č. 3 stanovuje minimální a maximální hodnoty pro teplotu, relativní vlhkost a proudění vzduchu v učebnách, chodbách i sociálních zařízeních ve školách, viz Tabulka č. 2 na další straně.

Dále vyhláška 343/2009 stanovuje rozdílový limit ve výši 3°C mezi teplotou ve výšce hlavy (1,1m) a kotníků (0,1m). Teplota nesmí poklesnout pod 16 °C v jednom dni nebo pod 18°C ve třech po sobě jdoucích dnech, jinak dojde ke zrušení výuky. Při překročení vnitřní teploty 30°C a zároveň venkovní 31°C musí být zvolena náhradní opatření a zajištěn pitný režim.

Tabulka č. 2: Limitní hodnoty fyzikálních parametrů mikroklimatu ve školách (dle vyhlášky 343/2009 upravující vyhlášku 410/2005)

část školy/veličina	T _{min}	T _{max}	proudění vzduchu	RH
učebny	20	28	0,1-0,2m.s ⁻¹	30-65%
tělocvičny	18	28	0,1-0,2m.s ⁻¹	30-65%
šatny	20	28	0,1-0,2m.s ⁻¹	30-65%
sprchy	24	--	0,1-0,2m.s ⁻¹	30-65%
záchody	18	--	0,1-0,2m.s ⁻¹	30-65%
chodby	18	--	0,1-0,2m.s ⁻¹	30-65%

2.4 Aerosolové částice

Sledování koncentrace aerosolových částic patří ke klíčovým aspektům monitoringu jak vnějšího, tak vnitřního prostředí.

Aerosolové částice se skládají ze směsi mikroskopických složek pevného, kapalného i plynného skupenství, přičemž normální velikostní distribuce těchto částic je trimodální. Podle velikosti jsou také běžně děleny na hrubý aerosol ($10\mu\text{m} > d_p > 2,5\mu\text{m}$) a jemný aerosol ($d_p < 2,5\mu\text{m}$), někdy je ještě používán termín ultra-jemný aerosol pro částice menší než $0,1\mu\text{m}$ v průměru (d_p značí aerodynamický průměr částice (“particle diameter“)) (Pope and Dockery, 2006).

Koncentrace aerosolových částic uvnitř je ovlivněna jednak infiltrací z okolí, jednak mohou být zdroje znečištění přímo uvnitř, většinou jsou úzce spojené s lidskou činností. Typickými zdroji aerosolových částic uvnitř budov je kouření a vaření, nicméně přítomnosti ani jednoho z nich nelze očekávat ve školách, avšak již pouhá přítomnost lidí může zvyšovat koncentraci prachových částic (Diapouli et al., 2008).

Učebny a školní budovy obecně patří k místům s mnohem větším počtem jedinců na jednotku plochy než je tomu třeba v kancelářských budovách (Barlett et al., 2004) a jak již bylo řečeno, každý jedinec je zdrojem aerosolových částic (Corsi, 2007). Dále pak pohyb žáků, zejména během přestávky je dalším faktorem zvyšujícím koncentraci aerosolů, zejména pak způsobuje resuspenzi již usazených částic. Neznámou proměnnou může být tak kvalita úklidu ve školách (Fromme et al., 2007).

Obecně platí že, horší podmínky byly zjištěny v malých učebnách, při velkém počtu žáků, při nízkém věku žáků a také při vysokých hodnotách oxidu uhličitého (Fromme et al., 2007).

V neposlední řadě podstatná část koncentrace PM uvnitř budov má zdroje ve vnějším prostředí. Pro minimalizování množství aerosolových částic pocházejících z vnějšího prostředí se jeví lokalita, ve které se školní budova nachází, jako nejvýznamnější faktor, přičemž rušivé vlivy představuje zejména průmysl (Wei et al., 1999) nebo doprava (Diapouli et al., 2008). Zvláště mimo města pak mohou být hlavním zdrojem emise vzniklé spalováním fosilních paliv (Ward et al., 2006). Blízkost dopravní komunikace s vysokou hustotou provozu dokonce může být klíčovým faktorem (ne)překročení limitů PM ve školních učebnách (Ekmecioglu a Keskin, 2007).

Celkově je pak venkovní koncentrace PM závislá na aktuálních meteorologických podmínkách, přičemž nejvyšších hodnot dosahuje při teplotní inverzi (Zollner et al., 2007), tento trend byl zachycen např. v Montaně (USA) (Ward et al., 2006). Díky zvýšené četnosti bezvětřných dní a inverzí lze pozorovat slabou disperzi polutantů (Wei et al., 1999).

Poměr koncentrací uvnitř a vně budovy je tak označován jako I/O („Indoor/Outdoor ratio“), který ukazuje na míru provázanosti obou prostředí a na možné zdroje aerosolu.

Pro ultra-jemné částice tento index vykazuje hodnoty o hodně nižší než 1 zvláště pak ve městech, kde lze předpokládat emise z dopravy, což bylo potvrzeno např. v Aténách (I/O pro PM_{10} = 0,33-0,74) (Diapouli et al., 2008) naopak u hrubé frakce však dosahuje vyšších hodnot, v extrémních případech je pozorována až desetkrát větší koncentrace PM_{10} uvnitř než venku (Ekmecioglu a Keskin, 2007). Bylo experimentálně prokázáno, že index I/O pro $PM_{2,5}$ je ve školách je zhruba dvakrát menší než v domácnostech (0,38 oproti 0,87), což lze vysvětlit absencí hlavních vnitřních zdrojů znečištění (kouření a vaření) (Sawant et al., 2004).

Chemické složení aerosolu uvnitř budov záleží na I/O indexu. Dusík ani síra nemají uvnitř školních budov žádný přirozený zdroj, tudíž jejich výskyt odráží venkovní koncentraci a míru ventilace (Diapouli et al., 2008). V případové studii bylo prokázáno že, ve vnitřním prostředí převažují vápenaté, hlinité a hlinito-křemičité ionty (Ekmecioglu a Keskin, 2007).

Obecně platí, že kovy, pokud jsou přítomny ve vnitřním prostředí, se do něj dostávají zvnějšku, zatímco uvnitř jsou prachové částice tvořeny z křemíku, kyslíku,

vápníku a uhlíku. Složení zejména větších částic (PM_{10}) je odlišné uvnitř a venku, uvnitř je tvořen zejména minerály a také kožními šupinkami (Fromme et al., 2007).

Pokud pomineme krátkodobé epizody extrémního znečištění (smogové situace) a pokud předpokládáme pravidelnou obydlenost budovy, pak je vnitřní koncentrace hrubé frakce prachových částic vyšší než koncentrace pozad'ových hodnot v okolí (Parker et al., 2008).

Pokud jde o variabilitu mezi typem učeben, pak lze předpokládat silnou korelaci mezi pohybem žáků a koncentrací PM_{10} , což bylo ověřeno i v praxi, přičemž nejvyšších hodnot dosahovala koncentrace v tělocvičně a nejnižších v knihovně (Diapouli et al., 2008).

Podobně je stanovena hypotéza, že pokrytí podlahy koberce povede k zvýšené koncentraci aerosolu, z důvodu obtížnějšího čištění a tím pádem způsobené zvýšené resuspenzi částic, nicméně existují i protichůdné argumenty (Shaughnessy et al., 2002). Z praxe byly prezentovány výsledky podporující negativní vliv koberců (Stranger et al., 2007), ale také se závěrem, že koberec nepředstavuje zvýšené riziko (Fromme et al., 2007).

Celá problematika by šla shrnout následovně. Tak dlouho, jak dlouho bude možné udržet podlahu čistou za použití vysoce výkonných vysavačů s mikrofiltry, tak dlouho budou koberce nezávadnou, bezpečnou a také ekonomickou cestou pro pokrytí podlah ve školách (Hedge, 2001).

O negativním zdravotním dopadu aerosolových částic na lidské zdraví se ví již dlouho a bylo mnohokrát zmiňováno v odborné literatuře, zvláště pak v posledních 15 letech, přičemž byla prokázána souvislost mezi výskytem nemocí zejména dýchací a oběhové soustavy s koncentrací aerosolů v ovzduší. Hranice pro hrubou frakci ve výši $10\mu m$ zároveň představuje i jakousi hranici pro snadný vstup látky do dýchacích cest (Pope a Dockery, 2006).

Poté co částice pronikne do dýchacího traktu, její další osud závisí zejména na velikosti, přičemž průměrně 42% hrubého aerosolu se ukládá v horních cestách dýchacích a 24% pak negativně působí v plicích, v případě jemného aerosolu se jedná o 18 procent v horních cestách dýchacích i v plicích (Avigo et al., 2008). Ačkoliv klesá procento částic zachycených v organismu s jejich velikostí, s vyhodnocením míry negativního zdravotního dopadu je tomu naopak. Zejména ultra-jemné částice (nanočástice) mohou z plic proniknout i do krevního oběhu a mozku, přičemž překonávají hematoencefalickou bariéru („blood brain barrier“) (Oberdörster et al., 2004).

Dalším důležitým faktorem je pak tvar a chemické složení částice (Pope a Dockery,

2006). Z hlediska tvaru jsou nejvíce nebezpečná dlouhá vlákna („fibres“) způsobující závažná onemocnění v plicích jako je např. azbestóza a silikóza.

Po chemické stránce jsou částice pocházející z vnějšího prostředí více nebezpečné než ty produkované ve školách (Fromme et al., 2007), proto i když je prokázána vyšší koncentrace prachových částic v učebnách oproti venkovnímu prostředí v okolí školy, nemusí být tato vyšší koncentrace přímo úměrná zvýšenému zdravotnímu riziku (Schwarze et al., 2006).

Celkově však dlouhodobá expozice byť nízkým koncentracím (pro PM není určena koncentrace, kdy není pozorován žádný škodlivý efekt („no observed adverse effect level“ (NOAEL)) může způsobit předčasné úmrtí zejména lidem se srdečními nebo dýchacími problémy, případně poruchy kardiovaskulárního systému. Z pohledu dětí ve školách se zdá být největším zdravotním dopadem zvýšený výskyt astmatu a alergií, významné riziko je také spojené s poklesem kapacity plic, drážděním sliznic a dalšími respiračními potížemi (U.S. EPA, 2013).

Maximální hodinová přípustná koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ pro učebny je stanovena ve vyhlášce 6/2003 Sb., která je prováděcím předpisem zákona č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví. Pro hrubý aerosol je limitní hodnota stanovena na $150\mu\text{m}/\text{m}^3$, pro jemnou frakci pak ve výši $80\mu\text{m}/\text{m}^3$.

Stejná vyhláška také upravuje maximální přípustný počet azbestových a pevných vláken v jednom krychlovém metru na 1000 kusů.

2.5 Shrnutí a cíle práce

Jak bylo uvedeno v předcházející rešerši, je kvalitě vnitřního prostředí věnována stále větší pozornost, stejně tak vzrůstá počet odborných článků, které se věnují kvalitě ovzduší ve školách, přičemž se shodují, že zvýšená koncentrace PM_{10} může zvláště citlivým jedincům způsobovat zdravotní komplikace, dále pak koncentrace CO_2 má velmi úzký vztah k míře ventilace a je také indikátorem "špatného vzduchu", protože jeho biogenní (lidská) emise je velmi úzce svázána s produkcí látek "lidského pachu", který navozuje nepříjemné pocity (např. „vydýchaného vzduchu“). Oxid uhličitý, aerosolové částice, pachy, teplota a vlhkost jsou hlavní ukazatele kvality ovzduší ve vnitřních prostorách škol. Vedle hluku a osvětlení patří k zásadním ukazatelům komfortu v každém interiéru.

Jelikož děti tráví ve školních budovách nemalou část dne, je více než vhodné zjistit, v jakých mikroklimatických podmínkách pobývají. Případové i srovnávací studie ze zahraničí mnohokrát ukázaly, že kvalita ovzduší nemálo ovlivňuje například soustředěnost, výkon, únavu a u citlivých jedinců i zdraví žáků.

Stav mikroklimatu v učebnách ovlivňuje celá řada faktorů (poloha budovy a její blízkost různým zdrojům znečištění, typ třídy, typ aktivity, který se ve třídě odehrává, počet žáků, intenzita a typ větrání, vytápění budovy a celá řada dalších vlivů). Mezi jednotlivými školními budovami a učebnami jsou velké rozdíly, každá učebna i vyučovací hodina určuje nebo ovlivňuje charakter mikroklimatu, které je v každé situaci, třídě, budově unikátní. Tento fakt velmi ztěžuje poznání a pochopení variability, příčin jeho změn ovzduší ve školách.

Jednou z možností, jak zjistit převládající nebo průměrné charakteristiky vnitřního prostředí učeben je výběr jakéhosi reprezentativního vzorku škol a v nich provést jednorázové měření (průřezový typ sledování). Tuto metodu v ČR použil SZÚ v roce 2008.

Druhou možností je výběr jedné školy a provedení dlouhodobého měření v různých učebnách této školy (tzv. longitudinální sledování). Kombinace obou přístupů by byla ideální, avšak je v časových personálních a finančních důvodů prakticky neuskutečnitelná.

Dříve provedené průřezové studie v drtivé většině případů ukazují průměrné koncentrace za celý den, nebo koncentrace měřené v náhodně vybraných hodinách během dne, oba způsoby však představují soubory izolovaných dat, která prakticky nelze mezi sebou porovnávat a vytvořit tak souvislý systém, který by komplexně hodnotil kvalitu ovzduší a nacházel by relevance mezi jednotlivými učebnami a školami.

Naproti tomu cílem naší studie je provést longitudinální měření v jedné reprezentativní škole za přesně stanovených a sledovaných podmínek. Tento postup se vykazuje jasnou výhodou proti průřezovým studiím, které sice mohou postihnout situaci na větším množství škol, ovšem bez znalostí vnitřního chodu školy a s ovlivnění dalších výše uvedených parametrů. Ve výsledku pak porovnávaná data z těchto měření nejsou příliš relevantní.

Tato diplomová práce si klade za cíl popsat kvalitu vnitřního prostředí ve školách. Na základě teoretické rešerše dostupné odborné literatury byly stanoveny následující hypotézy, které budou testovány v průběhu longitudinálního měření v ZŠ Kladská, v Praze.

Pracovní hypotézy:

- 1) Charakter jednotlivých faktorů ve třídách se bude lišit, přestože se jedná o stejnou budovu
- 2) Významný vliv na kvalitu vnitřního ovzduší bude mít venkovní prostředí (hrubý aerosol)
- 3) Významný vliv na kvalitu ovzduší bude mít typ třídy (výuky v ní probíhající) zejména hrubý aerosol.
- 4) Rozdíly budou ve třídách s různým vybavením (koberec, hladká podlaha) či různým stylem výuky (odborné učebny)
- 5) Rozdíly mohou být i mezi třídami podle jejich polohy ve škole.
- 6) Charakteristika CO₂ bude hlavně ovlivněna počtem žáků a stylem větrání.
- 7) Tradiční výuka (lavice) bude méně ovlivňovat kvalitu ovzduší, nežli aktivní formy výuky
- 8) Přestávky budou výraznými epizodami vysokého znečištění

3. Metodika práce

V Praze se nachází více než 250 základních škol, každá se specifickou polohou i mikroklimatem, ale při sledování charakteristických faktorů (stáří budovy, typ oken, počet pater) lze definovat 2 základní typy školní budovy. První z nich je škola v centru města, zpravidla se 4-5 podlažími a stářím budovy mezi 60-120 lety, s menším počtem žáků, zpravidla do 500, druhý typ představují sídlištní školy, nejvíce trojpodlažní, zpravidla s větším počtem žáků (600-900), postavené v 70. - 90. letech. Pro longitudinální studii byla vybrána ZŠ Kladská, která představuje typickou školu prvního typu. V této škole stejně jako v drtivé většině škol na území Prahy není přítomná mechanická ventilace v učebnách.

V rámci školního roku 2011/12 bylo provedeno 8 kampaní (od listopadu do června jedna měsíčně), přičemž v rámci každé kampaně byly vybrané mikroklimatické faktory měřeny simultánně ve 3 třídách a také vně budovy pro srovnání charakteru vnitřního a vnějšího prostředí. Přístroje byly umístěny na vhodná místa (na nábytek nebo pojízdný vozík) v přední nebo zadní části třídy. Přístroje pro venkovní měření byly umístěny na střeše budovy. Detailní přehled kampaní je uveden v Tabulce č. 3 níže.

Tabulka č. 3: Přehled sledovaných učeben v ZŠ Kladská

číslo kampaně	datum	učebna 1	učebna 2	učebna 3*
1	7.-11.11. 2011	PC	7.A	309(2)
2	5.-9.12. 2011	PC	1.B	312(2)
3	9.-13.1. 2012	VV	7.A	206(1)
4	20.-24.2. 2012	CH	1.B	127(1)
5	12.-16.3. 2012	PC	7.A	313(J)
6	16.-20.4. 2012	VV	1.B	209(1)
7	14.-18.5. 2012	CH	211(1)	126(1)
8	11.-15.6. 2012	VV	1.B	110(1)

*číslo v závorce udává, zda se jedná o třídu prvního či druhého stupně, J značí jazykovou učebnu

Jako hlavní mikroklimatické faktory byly vybrány koncentrace CO₂, PM₁₀, dále pak hodnoty relativní vlhkosti a teploty vzduchu. Pro všechna měření ve všech kampaních byla zvolena integrační doba 5 min, aby bylo možné postihnout denní variabilitu

proměnných. Začátek každé kampaně byl stanoven na pondělí před zahájením výuky (mezi 6 a 7 hod.) a konec na pátek před zahájením výuky (6-7 hod.). Toto časové rozvržení umožnilo pokrýt 4 vyučovací dny a 4 “klidová” období, ze kterých bylo možné zjistit základní hladinu sledovaných faktorů bez ovlivnění procesy spojenými s výukou.

Koncentrace CO₂ byla měřena přístrojem Telaire 7001 s dataloggerem, s přesností +/- 50ppm (přístroj využívá čidla absorpce infračerveného světla NDIR). Stejným přístrojem byla měřena i teplota s přesností +/- 1°C a relativní vlhkost (+/-5%). Hmotnostní koncentrace PM₁₀ byla měřena přístrojem TSI model DustTrak 8520, který používá laserovou diodu a rozptyl světla pod úhlem 90°. Rozsah tohoto přístroje je 0,001-100 mg.m⁻³ (kalibrace na ISO12103-1 A1 test dust - tzv. Arizona Road Dust). Rozlišení přístroje je +/- 0,1% z naměřené hodnoty nebo +/- 0,001 mg.m⁻³.

Pro měření ve venkovním prostředí (v klimaticky odolném boxu) bylo využito jak čidla CO₂, teploty a vlhkosti, tak fotometru DustTrak DRX (Model 8533), který měří velikostně rozlišený aerosol (PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀ a TSP – “total suspended particles“), druhý DRX byl použit vždy v jedné ze tří odborných učeben.

Paralelně s měřením byly sledovány další informace vypovídající o mikroklimatu ve třídách. Počet dětí, frekvence větrání a případně další činnosti v učebně byly zaznamenávány do předtištěného deníku učiteli a kontrolovány členy týmu.

V rámci projektu byly vybrány kmenové učebny 7.A a 1.B jako základní jednotky pro srovnání, v nich se uskutečnilo nejvíce měření. Dále pak byly ve zvýšené míře monitorovány odborné učebny: počítačová (PC), chemie (Ch) a výtvarné výchovy (VV). Zbylé měření se uskutečnilo v dalších kmenových učebnách prvního a druhého stupně a také v jazykové učebně (menší místnost s méně žáky).

Získané údaje byly statisticky zpracovány s využitím programu MS Excel.

4. Výsledky

Tabulka č. 4 (str. 29) ukazuje vybrané popisné charakteristiky (průměr, medián, směrodatnou odchylku, minimální a maximální hodnotu) a koncentraci aerosolových částic PM₁₀. V této tabulce jsou zahrnuta data z období výuky. Stejným způsobem jsou prezentována data o koncentraci CO₂ v Tabulce č. 5 (str. 30), o množství relativní vlhkosti v Tabulce č. 6 (str. 31) a naměřené teplotě v Tabulce č. 7 (str. 32).

V průběhu třetí-lednové kampaně přístroje podměřovaly koncentraci CO₂, což lze odvodit od venkovní koncentrace, která často ukazovala hodnoty menší než 300ppm. Z tohoto důvodu lze data pro CO₂ z této kampaně použít pouze pro relativní srovnání mezi učebnami v rámci této kampaně.

Nejvyšší průměrná hodnota PM₁₀ v době výuky byla naměřena v listopadu 2011 v učebně 9.B ve výši 100,66μg.m⁻³, dále pak byla ve dvou případech lehce překročena hodnota 80μg.m⁻³ ve dvou případech, všechny ostatní průměrné hodnoty dosahovaly výrazně nižších hodnot (méně než 70μg.m⁻³). Nejvyšší jednotlivá hodnota PM₁₀ ve výši 295μg.m⁻³ byla naměřena v rámci 7. kampaně (červen 2012) v jedné z kmenových učeben prvního stupně.

Nejnižší průměrná hodnota ve výši 16,07μg.m⁻³ byla naměřena v prosinci 2011 v počítačové učebně. Nejnižší naměřené hodnoty PM₁₀ dosahovaly jednotek mikrogramů na metr krychlový a bylo jich dosaženo vždy před výukou, krátce po otevření školy žákům v 7:40.

Nejvyšší průměr venkovní koncentrace PM₁₀ byl naměřen v rámci první kampaně (listopad 2011) a to ve výši 101,92μg.m⁻³, nejnižší průměrná hodnota pak byla pozorována hned v rámci následující kampaně (prosinec 2011) a to ve výši 15,57μg.m⁻³. Maximální naměřená hodnota pro venkovní hodnotu PM₁₀ činila 423μg.m⁻³ (červen 2012), minimální pak 5μg.m⁻³ (prosinec 2011).

Naměřené průměrné hodnoty PM₁₀ uvnitř a venku jsou využity pro kalkulaci poměru vnitřní koncentrace PM₁₀ vůči venkovní (indoor/outdoor ratio (I/O)), který je znázorněn v Tabulce č. 8 (str. 33).

Tento poměr dosahoval hodnot v rozpětí od 0,73 (počítačová učebna, listopad 2011) do 2,77 (kmenová učebna 1.B, prosinec 2011), přičemž většina hodnot se pohybovala v rozmezí od 0,8 do 1,4.

Koncentrace PM₁₀ během přestávek, resp. Její popisné charakteristiky pro vybrané

kampaně jsou znázorněny v Tabulce č. 9 (str. 34). Poměr těchto hodnot vůči hodnotám naměřeným po celou dobu výuky je pak zachycen v Tabulce č. 10 (str. 34). Průměrné hodnoty dosažené během přestávek se velmi podobají hodnotám z celé výuky, přičemž přestávková maxima jsou mírně nižší než celková, této situaci odpovídají i poměrné hodnoty velmi blízké 1.

Dynamika koncentrace PM_{10} v rámci jednoho vyučovacího dne (7.11. 2011) je zachycena na Obrázku č. 1 (str. 35). Pro srovnání jsou zde uvedeny všechny tři sledované učebny i venkovní koncentrace.

Koncentrace PM_{10} průběžně stoupá v průběhu dne, přičemž můžeme pozorovat lokální maxima, většinou krátce po zahájení hodiny. Maxima je zpravidla dosaženo po velké přestávce nebo při skončení výuky.

Průměrná hodnota koncentrace CO_2 překročila ve všech případech hranici 1000ppm, z čehož byla pětkrát překročena hranice 1500ppm, nejvyšší průměrná hodnota dosáhla výše 1899,72ppm a byla naměřena v jazykové učebně v březnu 2012. Nejvyšší jednotlivá hodnota pak byla opakovaně naměřena ve výši limitu přístroje ve výši 2499ppm. Nejnižší průměrná koncentrace ve výši 1024,59ppm byla naměřena v červnu 2012 v učebně výtvarné výchovy.

Dynamika koncentrace CO_2 v rámci jednoho vyučovacího dne (6.12. 2011) je zachycena na Obrázku č. 2 (str. 35). Pro srovnání jsou zde uvedeny všechny tři sledované učebny. Intenzita nárůstu je v nepřímé úměře s intenzitou ventilace. Skokové snížení koncentrace CO_2 odpovídá náhlému otevření oken, pozvolné pak opuštění učebny žáky při zachování stejné míry větrání.

Naměřená teplota nevykazovala výrazné výkyvy v průběhu dne, změny v průběhu roku odpovídají očekávaným změnám v souvislosti s venkovní teplotou, podobný trend lze pozorovat u relativní vlhkosti, ovšem s větší fluktuací hodnot v průběhu roku, které v zimních měsících klesaly hluboko pod 30%.

Průměrné hodnoty teploty vykazovaly minimální rozdíly, když ani v jednom případně průměr neklesnul pod hranici 20°C, nejnižší průměrná hodnota ve výši 20,56°C byla naměřena v prosinci 2011 v kmenové učebně druhého stupně. Nejvyšší průměrná hodnota ve výši 24,71°C byla naměřena v listopadu 2011 v počítačové učebně stejně jako maximální jednotlivá hodnota 26,48°C, nejnižší jednotlivá hodnota 17,82°C byla naměřena v rámci druhé kampaně (prosinec 2011) v kmenové učebně druhého stupně.

Průměrná hodnota relativní vlhkosti menší než 30% byla naměřena pouze jednou a to ve čtvrté (únor 2012) kampani ve výši 29,38% v kmenové učebně 1.B, kde byla při

stejně kampani naměřena i absolutně nejnižší jednotlivá hodnota ve výši 21,7%. Pouze v průběhu poslední kampaně v červnu 2012 byla naměřena průměrná hodnota RH vyšší než 50% (53,18; 52,73 a 54%) a to ve všech sledovaných učebnách (odborná učebna výtvarné výchovy, kmenová učebna 1.B, kmenová učebna prvního stupně). Nejvyšší jednotlivá hodnota RH byla naměřena v červnu 2012 v kmenové učebně prvního stupně ve výši 58,13%.

Informace obsažené ve formulářích vyplňovaných učiteli nebylo možné statisticky vyhodnotit z důvodu různé míry vyplněnosti (někdy zůstávaly i prázdné), nicméně jsou použity při vyhodnocování naměřených dat v diskusi.

Tabulka č. 4: Popisné charakteristiky PM₁₀ v době výuky

Kampaň	Měsíc	Učebna	Průměr*	Medián*	Sm. odch.	Minimum*	Maximum*
1	11	7.A	82,19	80	15,77	48	115
1	11	9.B	100,66	98	19,92	58	183
1	11	PC	74,8	74	16,43	40	123
2	12	1.B	43,18	44	18,79	3	106
2	12	312	38,47	37	13,89	4	89
2	12	PC	16,07	15	5,9	6	35
3	1	7.A	51,22	50,5	20,95	2	128
3	1	206	36,94	37	15,7	4	80
3	1	VV	36,06	37	13,4	6	90
4	2	1.B	61,19	58,5	26,35	9	152
4	2	310	46,32	42	17,75	13	102
4	2	Ch	44,46	41	15,87	9	110
5	3	313	59,15	56	24,53	7	134
5	3	7.A	57,84	53	23,22	10	132
5	3	PC	47,23	48	6,45	27	61
6	4	1.B	47,1	41	20,43	8	128
6	4	209	57,15	55	21,11	14	116
6	4	VV	66,31	62	19,88	33	164
7	5	211	36,45	32	15,16	4	80
7	5	126	80,5	73	44,37	10	295
7	5	Ch	59,35	57	14,69	29	182
8	6	VV	56,83	53	21,19	12	124
8	6	1.B	60,03	59	13,33	25	123
8	6	110	43,5	38,5	25,45	8	227

*koncentrace je uváděna v jednotkách $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Tabulka č. 5: Popisné charakteristiky CO₂ v době výuky

Kampaň	Měsíc	Učebna	Průměr*	Medián*	Sm. odch.	Minimum*	Maximum*
1	11	7.A	1356,52	1328	398,41	464	2218
1	11	9.B	No data	No data	No data	No data	No data
1	11	PC	1097,73	1056	381,06	441	2431
2	12	1.B	1315,98	1353	398,82	504	2377
2	12	312	1669,75	1627	461,92	555	2682
2	12	PC	1169,52	1140	394,02	455	1966
3*	1	7.A	672,22	677	178,94	257	1148
3*	1	206	670,7	656	216,42	259	1252
3*	1	VV	652,11	663,5	226,27	221	1154
4	2	1.B	1507,09	1532	427,8	512	2433
4	2	310	1586,84	1751	468,61	493	2240
4	2	Ch	No data	No data	No data	No data	No data
5	3	7.A	1339,25	1376	389,07	518	2108
5	3	313	1899,72	2064	560,96	545	2499
5	3	PC	1123,86	1051	421,65	464	2145
6	4	209	1367,84	1271,65	486,41	515.9	2499.4
6	4	1.B	1307,71	1330,3	323,41	564.4	2344.3
6	4	VV	1289,57	1256,4	395,46	496.3	2380.3
7	5	211	1142,76	994,5	437,2	482	2447
7	5	126	1651,06	1673	596,72	493	2499
7	5	Ch	1322,03	1291	389,78	505	2370
8	6	VV	1024,59	876,7	412,94	469.5	2042.1
8	6	1.B	1157,66	1133,1	373,16	493.9	2045.2
8	6	110	1304,02	1181,9	423,16	601.3	2191

*koncentrace je uváděna v jednotkách ppm

Tabulka č. 6: Popisné charakteristiky relativní vlhkosti během výuky

Kampaň	Měsíc	Učebna	Průměr*	Medián*	Sm. odch.	Minimum*	Maximum*
1	11	7.A	45,14	46,18	3,91	34,29	51,38
1	11	9.B	44,97	45,88	2,92	37,27	49,73
1	11	PC	38,06	38,03	2,37	31,52	44,46
2	12	1.B	35,21	34,8	3,21	28,95	43,42
2	12	312	46,78	46,43	3,53	39,27	56,24
2	12	PC	32,59	32,3	3,19	26,96	39,99
3	1	7.A	35,92	35,83	2,6	29,06	42,96
3	1	206	37,61	37,5	3,04	30,55	45
3	1	VV	38,85	39,33	3,03	32,77	44,67
4	2	1.B	29,38	29,63	3,14	21,7	36,58
4	2	310	33,29	34,24	3,93	23,33	41,2
4	2	Ch	32,94	33,3	2,91	24,8	39,55
5	3	7.A	35,99	36,91	3,04	27,84	41,32
5	3	313	44,63	45,31	3,85	34,08	52,18
5	3	PC	32,19	32,63	2,75	26,79	38,19
6	4	209	31,94	30,19	5,04	23,47	44,42
6	4	1.B	32,81	32,32	4,03	24,75	39,86
6	4	VV	34,74	33,49	4,72	25,81	45,06
7	5	211	35,18	35	4,08	26,1	44,68
7	5	126	39,47	39,12	3,42	31,41	46,2
7	5	Ch	40,03	39,89	3,5	30,84	47,79
8	6	VV	53,18	53,42	1,59	50,1	57,39
8	6	1.B	52,73	53,28	2,21	47,53	57,15
8	6	110	54	54,86	2,75	47,36	58,128

*Hodnoty jsou uváděny v procentech

Tabulka č. 7: Popisné charakteristiky teploty během výuky

Kampaň	Měsíc	Učebna	Průměr*	Medián*	Sm. odch.	Minimum*	Maximum*
1	11	7.A	23,04	23,11	0,54	20,94	24,03
1	11	9.B	22,55	22,68	0,62	20,53	23,69
1	11	PC	24,71	25,07	0,99	22,25	26,48
2	12	1.B	23,46	23,71	0,92	20,87	25,04
2	12	312	20,56	20,7	0,88	17,82	22,1
2	12	PC	23,44	23,42	1,14	20,87	26,16
3	1	7.A	23,61	23,63	0,48	22,51	24,65
3	1	206	23,31	23,35	0,31	22,59	23,93
3	1	VV	22,46	22,51	0,54	21,32	23,5
4	2	1.B	24,42	24,46	0,55	23,09	25,45
4	2	310	23,62	23,71	0,39	22,49	24,39
4	2	Ch	23,39	23,38	0,37	22,23	24,22
5	3	7.A	24,36	24,41	0,41	23,35	25,31
5	3	313	22,68	22,87	0,7	20,89	23,88
5	3	PC	24,52	24,58	1,09	21,15	26,45
6	4	209	24,68	24,8	0,79	22,32	26,18
6	4	1.B	24,49	24,58	0,47	23,28	25,48
6	4	VV	23,56	23,57	0,77	21,51	25,16
7	5	211	24,1	23,95	0,57	22,97	25,28
7	5	126	22,54	22,56	1,05	20,03	24,68
7	5	Ch	22,99	23	0,63	21,7	24,24
8	6	VV	23,46	23,5	0,88	21,99	25,14
8	6	1.B	23,85	24	0,65	22,25	24,77
8	6	110	23,12	23,18	0,46	22,2	23,95

*hodnoty jsou uváděné ve °C

Tabulka č. 8: Poměr koncentrace PM₁₀ uvnitř a venku během výuky

Kampaň	Měsíc	Učebna	Průměr	Medián	Sm.odch.	Minimum	Maximum
1	11	7.A	0,81	0,79	0,92	0,73	0,77
1	11	9.B	0,99	0,97	1,16	0,88	1,22
1	11	PC	0,73	0,73	0,96	0,61	0,82
2	12	1.B	2,77	3,14	2,63	0,60	2,52
2	12	312	2,47	2,64	1,94	0,80	2,12
2	12	PC	1,03	1,07	0,83	1,20	0,83
3	1	7.A	2,01	2,10	1,83	0,33	1,32
3	1	206	1,45	1,54	1,37	0,67	0,82
3	1	VV	1,42	1,54	1,17	1,00	0,93
4	2	1.B	1,12	1,10	1,01	0,90	1,24
4	2	310	0,85	0,79	0,68	1,30	0,83
4	2	Ch	0,82	0,77	0,61	0,90	0,89
5	3	313	1,00	1,12	0,72	0,39	0,82
5	3	7.A	0,98	1,06	0,68	0,56	0,81
5	3	PC	0,80	0,96	0,19	1,50	0,37
6	4	1.B	0,99	1,14	0,50	0,57	0,30
6	4	209	1,20	1,53	0,52	1,00	0,27
6	4	VV	1,39	1,72	0,49	2,36	0,39
7	5	211	0,76	0,89	0,37	0,29	0,19
7	5	126	1,69	2,03	1,10	0,71	0,70
7	5	Ch	1,25	1,58	0,36	2,07	0,43
8	6	VV	1,19	1,47	0,52	0,86	0,29
8	6	1.B	1,26	1,64	0,33	1,79	0,29
8	6	110	0,91	1,07	0,63	0,57	0,54

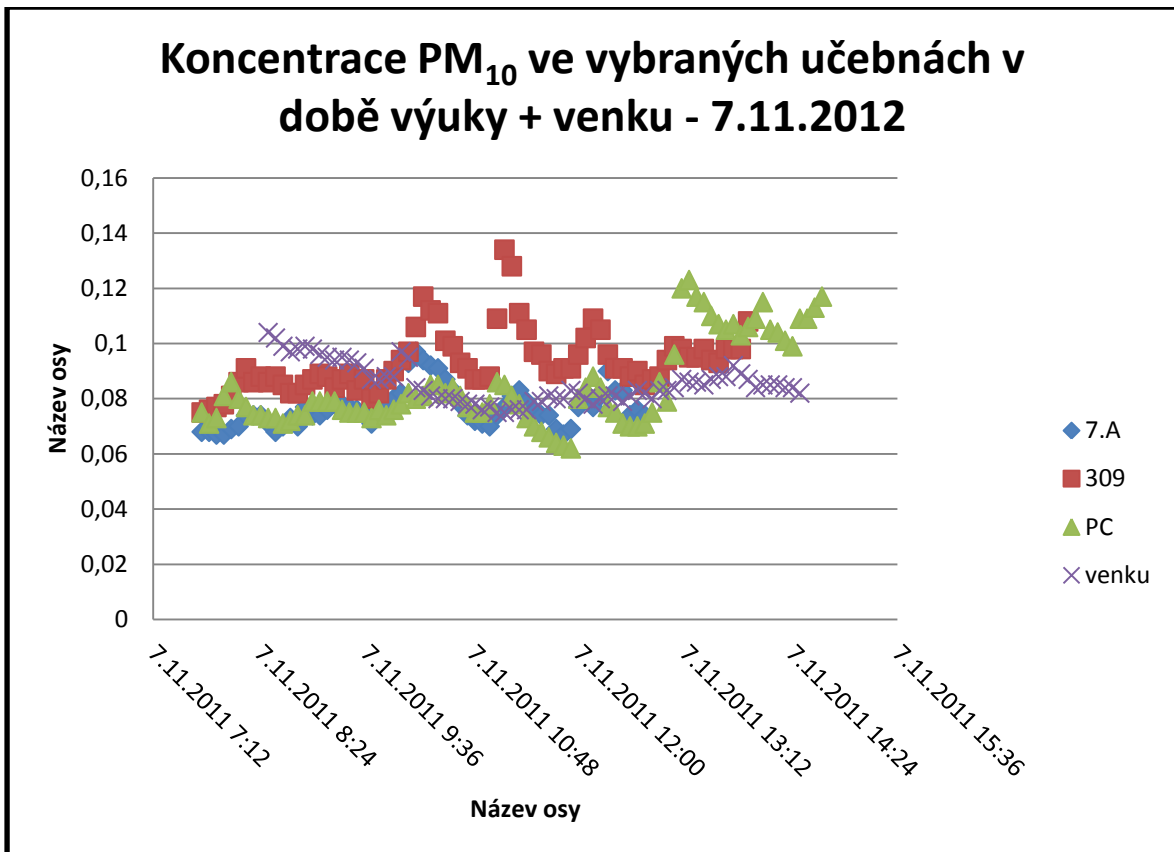
Tabulka č. 9: Koncentrace PM₁₀ během přestávek

Kampaň	Měsíc	Učebna	Průměr	Medián	Sm. odch.	Minimum	Maximum
1	11	7.A	79,53	78	13,18	53	109
1	11	9.B	101,09	98	17,13	68	148
1	11	PC	76,35	76	16,07	46	117
4	2	1.B	73,63	69	29,81	25	143
4	2	310	47,21	44	15,3	26	85
4	2	Ch	50,49	45	17,97	27	110
7	5	211	39,26	33	16,05	19	79
7	5	126	96,96	90	46,39	26	227
7	5	Ch	65,21	61	19,97	39	182

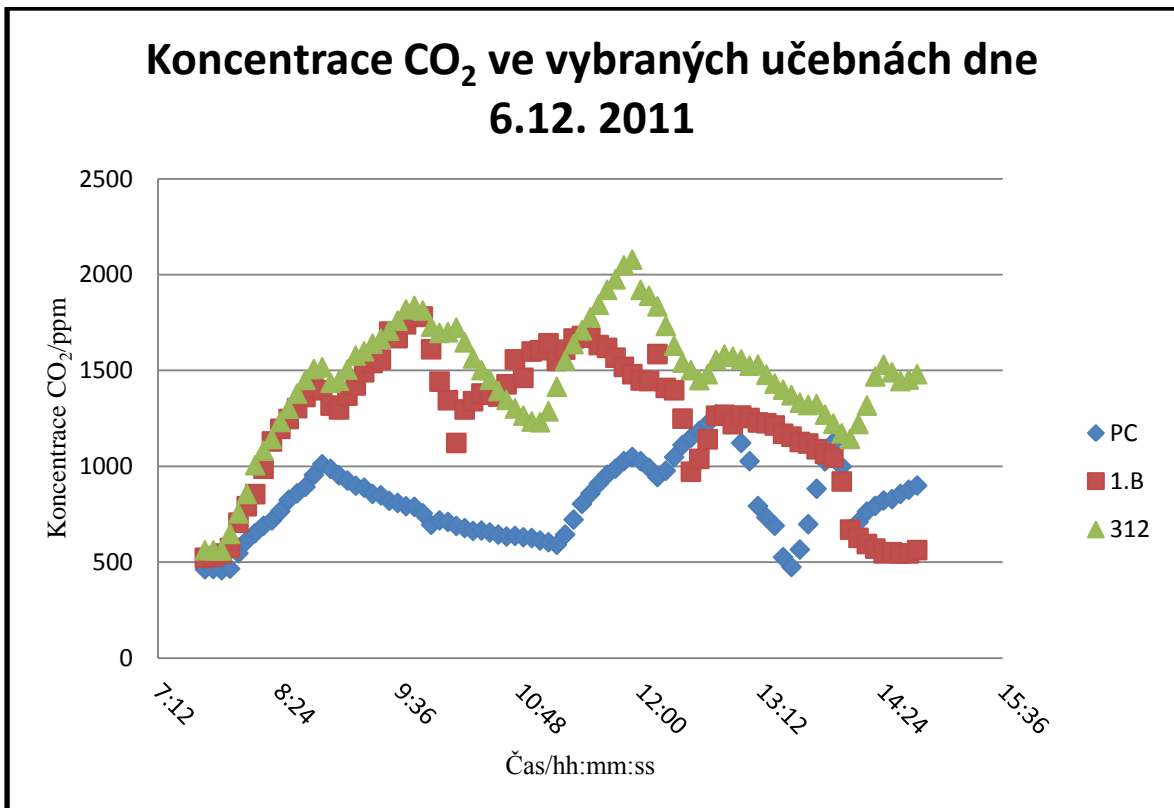
*koncentrace je uváděna v jednotkách $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Tabulka č. 10: Poměr koncentrace PM₁₀ během přestávek a po celou dobu výuky

Kampaň	Měsíc	Učebna	Průměr	Medián	Sm. odch.	Minimum	Maximum
1	11	7.A	0,97	0,98	0,84	1,10	0,95
1	11	9.B	1,00	1,00	0,86	1,17	0,81
1	11	PC	1,02	1,03	0,98	1,15	0,95
4	2	1.B	1,20	1,18	1,13	2,78	0,94
4	2	310	1,02	1,05	0,86	2,00	0,83
4	2	Ch	1,14	1,10	1,13	3,00	1,00
7	5	211	1,08	1,03	1,06	4,75	0,99
7	5	126	1,20	1,23	1,05	2,60	0,77
7	5	Ch	1,10	1,07	1,36	1,34	1,00



Obrázek č. 1: Koncentrace PM₁₀ ve vybraných učebnách dne 7.11. 2011



Obrázek č. 2: Koncentrace CO₂ ve vybraných učebnách dne 6.12. 2011

5. Diskuse

Výsledky prezentované v předchozí sekci ukazují na tři druhy variability: 1) v rámci dne, 2) v rámci roku, 3) mezi třídami.

Koncentrace PM_{10} byla v průměru výrazně podlimitní vůči požadavkům plynoucím z legislativy.

Aktivita žáků, resp. míra jejich pohybu po učebně a s tím spojená resuspenze aerosolu se jeví jako hlavní faktor ovlivňující koncentraci PM_{10} spolu s venkovní koncentrací, nicméně průměrná koncentrace PM_{10} dosáhla pouze v jednom případě hranice $100\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

V tomto ohledu je přestávka spouštěcím mechanismem díky zvýšenému pohybu žáků po třídě, nicméně maximální hodnoty přichází s prodlevou a jsou tak měřeny již v rámci hodiny. Otázkou však zůstává, do jaké míry je toto způsobeno případným pozdním vstupem kantora do učebny.

Na vysoký vliv aktivity žáků na vnitřní koncentraci PM bylo poukázáno již dříve (Fromme et al, 2007), stejně tak jako, že pouhá přítomnost lidí způsobuje nárůst koncentrace (Diapouli et al., 2008). Tento jev je především pozorován před zahájením výuky při pozvolném obsazování učebny žáky.

Přímá úměra mezi aktivitou žáků a koncentrací hrubého aerosolu byla prokázána také v tělocvičnách během hodin tělesné výchovy (Braniš et al., 2009).

Při srovnání učeben v rámci jedné kampaně a tedy stejných venkovních podmínek byly nejnižší hodnoty naměřeny v počítačové učebně. Zde je předpokládána nejnižší aktivita žáků, která je důsledkem neustálého dozoru vyučujícího. Podobný výsledek prezentoval Diapouli et al. (2008), když poukázal na nejnižší měřené koncentrace v knihovně.

Vysoké hodnoty naměřené v průběhu první-listopadové kampaně lze vysvětlit zvýšenou venkovní koncentrací, která je po aktivitě žáků druhým faktorem ovlivňujícím koncentraci PM_{10} v učebnách. Platí, že čím vyšší je venkovní koncentrace aerosolu, tím vyšší pozadová základní koncentrace v učebnách a také menší fluktuace během výuky, resp. přestávek.

Na základě naměřených dat lze usuzovat, že venkovní koncentrace PM_{10} významně ovlivňuje tu vnitřní až po dosažení koncentrace přibližně $50\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a větší. Tento vliv se odráží ve vyšší základní hladině mimo výuku a také byly v těchto případech pozorovány menší výkyvy způsobené vnitřními zdroji.

Na vliv aerosolu z vnějších zdrojů na vnitřní prostředí bylo také poukázáno v souvislosti s odlišným chemickým složením, které představuje vyšší zdravotní riziko než aerosol pocházející z vnitřních zdrojů (Fromme et al., 2007).

Maximální stanovená hodinová koncentrace pro PM_{10} ve výši $150 \mu m.m^{-3}$ byla několikrát překročena bodově (v rámci 5 min. měřeného intervalu), nikdy však v dlouhodobějším úseku. Maximální koncentrace byla naměřena většinou krátce po přestávce, existuje tak přímá souvislost mezi přestávkou a zvýšenou koncentrací PM_{10} . Na tento fakt poukázala i studie provedená SZÚ (Mikešová a Kotlík, 2008).

Fromme et al. (2007) kromě aktivity žáků uvádí jako další hlavní zdroj nedostatečnou ventilaci spojenou re-suspenzí přítomného aerosolu z podlahy, přičemž zmiňuje četnost a kvalitu úklidu jako ovlivňující faktor, nicméně nízké základní hodnoty naměřené před výukou neukazují na nedostatečný úklid v monitorované ZŠ Kladská. Na nepřímou úměru mezi kvalitou úklidu a koncentrací aerosolů poukazuje také Ekmecioglu a Keskin (2007).

Částečné pokrytí učebny kobercem se neukázalo být faktorem zásadně ovlivňujícím koncentraci PM_{10} , resp. žádný vliv nebylo možné prokázat nebo vyvrátit, ke stejnému závěru dospěl i Fromme et al. (2008), na druhou stranu Stranger et al. (2007) poukazuje až na trojnásobnou koncentraci aerosolových částic v učebnách pokrytých kobercem. Hedge (2001) dává do souvislosti pokrytí podlahy kobercem s kvalitou a četností úklidu.

Ward et al. (2006) poukazuje na věk žáků jako další faktor podílející se na výsledné koncentraci aerosolu v učebnách, přičemž vyšší koncentrace přiřazuje základní škole oproti střední, nicméně tento trend nebyl potvrzen v rámci naší studie, kdy nebyly pozorovány rozdíly mezi učebnami prvního a druhého stupně.

Provedené kampaně neukázaly žádný vztah mezi ročním obdobím a koncentrací PM_{10} . Shoda nepanuje ani mezi publikovanými studiemi. Zatímco Fromme et al. (2007) poukazuje na nejvyšší koncentrace v zimě, zatímco John et al. (2007) v létě. Wei et al. (1999) poukazuje na nejvyšší koncentrace v zimě v souvislosti s vysokou koncentrací PM_{10} ve venkovním ovzduší v důsledku používání tuhých paliv k topení.

Nízké naměřené koncentrace v ZŠ Kladská také mohou mít souvislost s polohou školy v klidné lokalitě Vinohrad. Na negativní vliv dopravy v okolí školy poukazuje Ekmecioglu a Keskin (2007) nebo Diapouli et al. (2008).

Hladina CO_2 konstantně vzrůstá v průběhu dne, částečné poklesy jsou způsobené ventilací. Počet žáků ve třídě se v tomto směru neukázal jako podstatný faktor,

koncentrace CO₂ je takřka výhradně v nepřímém poměru s intenzitou ventilace.

Průměrná koncentrace CO₂ se pohybovala mezi 1000 a 1900ppm, přičemž překročila hranici 1500ppm v 5 učebnách z celkem 19 měřených, avšak doporučená limitní koncentrace 1000ppm daná ASHRAE byla překročena ve všech měřených učebnách. Nejvyšší hodnota byla dosažena v jazykové učebně, což bylo pravděpodobně ovlivněno také jejími menšími rozměry (učebna dosahuje zhruba třetinové velikosti oproti ostatním).

Chatzidiakou et al. (2012) na základě literární rešerše uvádí, že v 30% sledovaných učeben došlo k překročení mediánu 1500ppm, přičemž funkce mediánu má log-normální distribuci, medián se s největší četností nachází mezi 1000-1200ppm. Výsledky v tomto intervalu ukazuje i nedávná srovnávací studie intenzity ventilace z Finska a Portugalska (Canha et al., 2013) a také výsledky dosažené během měření v ZŠ Kladská dosahují stejných hodnot.

Srovnání průběhu koncentrace CO₂ ze stejné učebny (1.B) avšak v rámci různých kampaní (prosinec a červen) ukázalo srovnatelný nárůst v průběhu prvních dvou vyučovacích jednotek, což lze vysvětlit absencí větrání v obou případech, dále je pak vidět odlišný průběh způsobený vyšší intenzitou ventilace, pravděpodobně v závislosti na venkovní teplotě, proto lze v zimě pozorovat vyšší hladinu CO₂ v učebně než v létě.

V zimě byly naměřeny vyšší koncentrace než v létě, což přímo souvisí s intenzitou větrání. Grimsurd et al. (2006) upozorňuje, že nedostatečná ventilace v zimních měsících může být také dána ekonomickými důvody a dokládá to studii, která ukazuje na nepřímou úměru mezi koncentrací CO₂ a průměrnou cenou za topení přepočtenou na žáka.

Především v zimních měsících byla naměřena příliš nízká hodnota relativní vlhkosti, průměrná hodnota sice poklesla pod hranici 30% pouze jednou a to minimálně, průměrné hodnoty kolem 30% jsou hraniční, navíc nárazově byly naměřeny i hodnoty menší než 25%. Doporučená hodnota 40% byla během zimního období naměřena pouze sporadicky. Maximální doporučená i legislativou vyžadovaná hodnota relativní vlhkosti ve výši 60% nebyla nikdy ani bodově překročena v žádné z uskutečněných kampaní.

Naměřená teplota byla ve všech hodnotách v souladu s vyhláškou (6/2003 sb.) a pouze jednou krátkodobě poklesla pod 18 °C.

Stejně jako bylo možné pozorovat vysokou variabilitu mezi sledovanými faktory, stejně velká proměnlivost byla nalezena i v počtu informací o ventilaci a aktivitě žáků, typu výuky získaných z formulářů z učeben. Tato zpětná vazba od pedagogů přinesla mj. i cenné informace o tom, jak pedagogové reagují na projekt měření kvality ovzduší. Obecně lze konstatovat, že čím více informací bylo vyplněno, tím lepší byly i naměřené hodnoty.

Dá se usuzovat, že např. při vyplňování položek o četnosti ventilace kantoři měli více na paměti, že mají během výuky větrat. Z toho lze vyvodit, že již pouhá přítomnost měřicího zařízení či fungování projektu pozitivně ovlivňuje kvalitu prostředí.

Zapojení učitelů i žáků do projektu za účelem zlepšení kvality ovzduší se pokusil uvést do praxe Geelen et al. (2008), přičemž ve škole která se zúčastnila tohoto vzdělávacího projektu, byla zjištěna vyšší kvalita prostředí i dlouho po této intervenci.

6. Závěr

V posledních deseti letech lze pozorovat rapidní nárůst zájmu odborné veřejnosti o problematiku kvality vnitřního prostředí obecně i cíleně na školní budovy, což lze demonstrovat na databázi Scopus, kde je v současné době publikováno více než 1000 článků s touto problematikou (zadáno "air quality schools"), nicméně drtivá většina z nich se týká krátkodobého monitoringu a někdy sledují pouze omezené množství faktorů, málokdy jsou zařazeny informace o vnitřním chodu školy.

Tato práce v literární rešerši definuje hlavní faktory zájmu, přičemž vysvětluje danou problematiku z komplexního pohledu: Definuje fyzikální, chemické a biologické veličiny; jejich možné zdroje; jejich vliv na kvalitu ovzduší i lidské zdraví; uvádí příklady z platné legislativy ČR i limity doporučené a v nespolední řadě diskutuje výsledky prováděných studií.

Koncentrace PM_{10} a CO_2 spolu s fyzikálními faktory teplotou a relativní vlhkostí byly vybrány jako klíčové parametry pro monitorování kvality prostředí v rámci provedené longitudinální studie. Pro získání ucelenějšího množství informací byly získány další informace o vnitřním chodu školy přímo od učitelů.

Z pohledu naměřených hodnot se největším nedostatkem jeví nedostatečná míra relativní vlhkosti v zimních měsících, limity pro teplotu a PM_{10} nebyly překročeny v žádné z měřicích kampaní, limit pro CO_2 pak v 5 z 19 zahrnutých měření, ale i tak se jeví dosažené hodnoty jako průměrné či lehce nadprůměrné v mezinárodním srovnání. Aktivita žáků byla vyhodnocena jako hlavní faktor ovlivňující vnitřní koncentraci PM_{10} .

Výsledky jednotlivých kampaní prokázaly velkou variabilitu pohybující se až v řádu desítek procent mezi jednotlivými učebnami, ale i v rámci jedné učebny v průběhu různých částí roku. Tato variabilita by měla být zohledněna při provádění budoucích studií. V případě Prahy potažmo ČR by bylo vhodné provést podobnou longitudinální studii také na jedné ze sídlištních škol, dále se pak věnovat chemické analýze PM_{10} .

Spíše než provádění dalších a další krátkodobých studií, se jeví nutná jednotná metodika provádění měření, zohledněných faktorů i způsob vyhodnocování výsledků, přičemž právě možnost srovnání výsledků napříč různými školami v dané oblasti i mezinárodně by měl být hlavním cílem. Tento úkol je společnou výzvou pro odbornou veřejnost o orgány státní správy (např. SZÚ, MŽP, MŠMT), v mezinárodním měřítku pak pro příslušné odbory EU a WHO.

Kvalita ovzduší ve školách i kvalita vnitřního ovzduší obecně představuje více oborový problém, nicméně v posledních letech přibývá informací o možnostech řešení. Hlavní cílem do budoucna by mělo být využití stávajícího stavu poznání za účelem zlepšení situace ve školách. Inspirací by mohl být manuál severoamerické organizace EPA “Tools for schools“.

Ačkoliv opatření ke zlepšení se zdají být jednoduchá – větší míra větrání či umístění nádoby s vodou na topení v zimě – výsledky prováděných studií ukazují, že se tato opatření stále nedaří uplatnit v praxi. Nejlepší cestou by však byly cílené projekty pro školy na téma kvality vnitřního ovzduší se zapojením jak učitelů, tak žáků.

7. Seznam použité literatury

Andersen, I., Lundqvist, G., R., Jensen, P., L., Proctor, D., F. (1974): "Human response to 78-hour exposure to dry air," *Archives of Environmental Health*, 29(6), 319–324

Arundel, A., V., Sterling, E., M., Biggin, J., H., Sterling T., D. (1986): "Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments," *Environmental Health Perspectives*, 65, 351-361

Avigo, D., Godoi, A., F., L., Jannisek, P., R., Makarovska, Y., Krata, A., Potgieter-Vermaak, S., Alfoldy, B., van Grieken, R., Godoi, R., H., M. (2008): "Particulate matter analysis at elementary schools in Curitiba, Brazil," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391(4), 1459-1468

Bakó-Biró, Z., Clements-Croome, D., J., Kochhar, N., Awbi, H., B., Williams, M., J. (2012): "Ventilation rates in schools and pupils' performance," *Building and Environment*, 48(1), 215-223

Barlett K. H., Martinez, M., Bert J. (2004): "Modeling of occupant-generated CO₂ dynamics in naturally ventilated classrooms," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(3), 139-148

Bell, M., L., Davis, D., L. (2001): "Reassessment of the lethal London fog of 1952: Novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution," *Environmental Health Perspectives*, 109(Suppl. 3), 389-394

Braniš, M., Větvíčka, J. (2010): "PM₁₀, Ambient temperature and relative humidity during the XXIX summer olympic games in Beijing: Were the athletes at risk?," *Aerosol and Air Quality Research*, 10(2), 102-110

Braniš, M. (2009): "Air quality of Prague: Traffic as a main pollution source," *Environmental Monitoring and Assessment*, 156(1-4), 377-390

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(6), 1246–1252

Breyse, P.N., Diette, G., B., Matsui E., C., Butz, A., M., Hansel, N., N., McCormack, M., C. (2010):“Indoor air pollution and asthma in children,“ *Proceedings of the American Thoracic Society*, 7(2), 102-106

Canha, N., Almeida, S.M., Freitas, M.C., Täubel, M., Hänninen, O. (2013):“ Winter ventilation rates at primary schools: Comparison between Portugal and Finland,“ *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues*, 76(6), 400-408

Chatzidiakou, L., Mumovic, D., Summerfield, A., J. (2012):”What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature,“ *Intelligent Buildings International*, 4(4), 228–259

Coley, D., A., Greeves R, Saxby, B., K. (2007):“The effect of low ventilation on the cognitive function of a primary schools class,“ *International Journal of Ventilation*, 6(2), 107-112

Corsi, R., L., Siegel, J., Karamalegos, A., Simon, H. Morrison, G., C. (2007): “Personal Reactive Clouds: Introducing the Concept of Near-head Chemistry,“ *Atmospheric Environment*, 41(15), 3161-3165

Corsi, R., L., Torres, V., M., Sanders, M., Kinney, K., A. (2002):“Carbon dioxide levels and dynamics in elementary schools: Results of the Tesias study,“ *Indoor Air 2002 - 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 74-79, <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB6553.pdf>, přístupné online 22. 5. 2013

Daisey, J., M., Angell, W., J., Apte, M., G. (2003):“ Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: An analysis of existing information,“ *Indoor Air*, 13(1), 53-64

Diapouli, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N., Spyrellis, N. (2008):“Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area,“ *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1-3), 13-20

Hůnová I., Šantroch J., Ostatnická J. (2004): Ambient air quality and deposition trends at rural stations in the Czech Republic during 1993–2001, *Atmospheric Environment*, 38(6), 887-898

Ekmekcioglu D., Keskin, S., S. (2007):“Characterization of indoor air particulate matter in selected elementary schools in Istanbul, Turkey,“ *Indoor and Built Environment*, 16(2), 169-176

Geelen, L., M., J., Huijbregts, M., A., J., Ragas, A., M., J., Bretveld, H., W., A., Jans, H., W., A., van Doorn, W., J., Evertz, S., J., C., J., van der Zijden, A. (2008):“Comparing the effectiveness of interventions to improve ventilation behavior in primary schools,“ *Indoor Air*, 18(5), 416-424

Guidotti, T., L., Gitterman, B., A. (2007):“Global Pediatric Environmental Health.“ *Pediatric Clinics of North America*, 54(2), 335-350

Grimsurd, D., Bridgers, B., Schilte, R. (2006):“Continous measurements of air quality parametres in schools,“ *Building Research and Information*, 15(5), 447-458

Hanninen, O. (2013):”Novel second-degree solution to single zone mass-balance equation improves the use of build-up data in estimating ventilation rates in classrooms”, *Journal of Chemical Health and Safety*, 20(2), 14-19

HealthVent (2013):“ Presentation of Guidelines of Health Based Ventilation from the Event in Brussels on February 20,“ *Technical University of Denmark*, <http://www.healthvent.byg.dtu.dk/>, přístupné online 26. 5. 2013

Hedge, A. (2001): Carpets in schools don't compromise indoor air quality says Cornell researcher, Cornell University Press release, March 9, 2001, Ithaca, NY

Husman, T. (1996):“Health effects of indoor-air microorganisms,“ *Scandinavian journal of work, environment and health*, 22(1), 5-13

John, K., Karnea, S., Crist, K., Kim, M. (2007):“Analysis of trace elements and ions in ambient fine particulate matter at three elementary schools in Ohio,“ *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(4), 394-406

Leech, J., Nelson, W.C., Burnett, R., T., Aaron, S., Raizenne, M.E. (2002):“It is about time: A comparison of Canadian and American time-activity patterns,“ *Journal of Exposure and Analysis and Environmental Epidemiology*, 12(6), 427-432

Mikešová M., Kotlík B., (2008):“Závěrečná zpráva z měření kvality vnitřního prostředí a mikroklimatických parametrů ve školách“, *Statni Zdravotni Ustav (SZU), Praha*, (Final Report from measuring of the indoor air quality and microclimatic parameters in schools, *State Health Institute, Prague*)

Ministerstvo životního prostředí (MŽP) (2010):“Nucené větrání s možností rekuperace odpadního tepla v objektech pro vzdělávání“, *Státní fond životního prostředí ČR*, <http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/15/4679-08-2009-vetrani-5web.pdf>, přístupné online 10. 5. 2013

Morse, G., R., Haas, P., Lattanzio, S., M., Zehnter, D., Divine, M. (2009):”A cross-sectional study of schools for compliance to ventilation rate requirements“, *Journal of Chemical Health and Safety*, 16(6), 4-10

National Health Service (NHS) (2012):”*Sick Building Syndrome*,” <http://www.nhs.uk/Conditions/Sick-building-syndrome/Pages/Introduction.aspx>, přístupné online 10. 5. 2013

Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W., Cox, C. (2004):“ Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain“, *Inhalation Toxicology*, 16(6-7), 437-445

Oppl, R., Neuhaus, T. (2008):”Emission specifications in Europe and the US – Limit values (TVOC, LCI, CREL, ...) in critical discussion“, in *Proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality nad Climate – Indoor Air '08*, Copenhagen, Denmark, paper ID 953, http://www.eurofins.com/media/18336/emission_limit_values_in_critical_discussion_953.pdf, přístupné online 26.2.2013

Parker, J., L., Larson, R., R., Eskelson, E. Wood, E., M., Veranth J., M. (2008):“Particle size distribution and composition in mechanically ventilated school building during air pollution epizodes“, *Indoor Air*, 18(5), 386-393

Parrish, D., D., Singh, H., B., Molina, L., Madronich, S. (2011):“ Air quality progress in North American megacities: A review“, *Atmospheric Environment*, 45(39), 7015-702

Pope III, C., A. and Dockery, D., W. (2006):"Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect", *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742

Sawant, A., A., Na, K., Zhu, X., Cocker, K., Butt, S., Song, Ch., Cocker III, D. R. (2004):"Characterization of PM 2.5 and selected gas-phase compounds at multiple indoor and outdoor sites in Mira Loma, California," *Atmospheric Environment*, 38(37), 6269-6278

Stranger, M., Potgieter-Vermaak, S.S., Van Grieken, R (2007):"Comparative overview of indoor air quality in Antwerp, Belgium," *Environment International*, 33(6), 789-797

Schwartz, J. (2004):"Air Pollution and Children's Health," *Pediatrics*, 113(4 II), 1037-1043

Schwarze, P.E., Øvrevik, J., Låg, M., Refsnes, M., Nafstad, P., Hetland, R.B., Dybing, E. (2006):"Particulate matter properties and health effects: Consistency of epidemiological and toxicological studies," *Human and Experimental Toxicology*, 25(10), 559-579

Shaughnessy, R., J., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandres, D. (2006):"A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance," *Indoor Air*, 16(6), 456-468

Shaughnessy, R. J., Turk, B., Evans, S., Fowler, F., Casteel, S., Louie, S. (2002):"Preliminary study of flooring in school in the U.S.: Airborne particulate exposures in carpeted vs. uncarpeted classrooms," *Indoor Air 2002 - 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 974-979, <http://www.irb.fraunhofer.de/CIBlibrary/search-quick-result-list.jsp?A&idSuche=CIB+DC6476>, přístupné online 10. 5. 2013

Shendell, D., G., Prill, R., Fisk, W., J., Apte, M., G., Blake, D., Faulkner, D. (2004):"Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho," *Indoor Air*, 14(5), 333-341

Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W., W., Cain, W., S., Fisk, W., J., Grimsrud, D., T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily, A., K., Pickering, A., C., Samer, J., M., Spengler, J., D.,

Taylor, S., T., Weschler, C., J. (2011):“Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature,“ *Indoor Air*, 21(3), 191-204

Tomášková, H., Tomášek, I., Šlachťová, H., Šebáková, H. (2011)“Odhad vlivu koncentrací PM₁₀ na úmrtnost a nemocnost obyvatel Ostravy v průběhu smogových epizod | [Impact assessment of PM₁₀ concentrations on mortality and morbidity in Ostrava during smog episodes],“ *Hygiena*, 56(1), 5-10

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2013):”*Particulate Matter (PM): Health*, <http://www.epa.gov/pm/health.html>, přístupné online 10. 5. 2013

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA)(2012a):”Volatile Organic Compounds (VOCs)”, *Technical Overview*, <http://www.epa.gov/iaq/voc2.html>, přístupné online 10. 5. 2013

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2012b):” *An Introduction to Indoor Air Quality (IAQ): Volatile Organic Compounds (VOCs)*,” <http://www.epa.gov/iaq/voc.html>, přístupné online 10. 5. 2013

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2007):“Sick Building Syndrome,“ *IAQ Facts No. 4*, http://www.epa.gov/iaq/pdfs/sick_building_factsheet.pdf, přístupné online 10. 5. 2013

Wallinder, R., Norback, D., Wieslander, G., Smedje, G., Erwall, C., Venge, P. (1998):“Nasal patency and biomarkers in nasal lavage – the significance of air exchange rate and type ventilation in schools,“ *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 71(7), 479-486

Wang, T., Xie, S. (2009):“Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period,“ *Atmospheric Environment*, 43(35), 5682-5690

Wang, Y., Hao, J., McElroy, M., B., Munger, J., W., Ma, H., Chen, D., Nielsen, C., P. (2009):“Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics: Effectiveness of emission restrictions,“ *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5237-5251

Ward, T. J., Noonan, C. W., Hooper, K. (2007):“Results of an indoor size

fractionated PM school sampling program in Libby, Montana,“ *Environmental Monitoring and Assessment*, 130(1-3), 163-171

Wargoeki, P. , Wyon, D., P. (2006):”Effects of HVAC On Student Performance,” *ASHRAE Journal*, 48(10), 23-28

Wei F., Teng, E., Wu, G., Hu W., Wilson, W. E., Chapman, R. S., Pau, J. C., Zhang, J. (1999):“Ambient concentration and elemental composition of PM₁₀ and PM_{2,5} in four Chinese cities,“ *Environmental Science and Technology*, 33(23), 4188-4193

World Health Organization (WHO) (2013):”Metrics: Disability-Adjusted Life Year (DALY),” *Health statistics and health information systems*,
http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/, přístupné online 22. 5. 2013

World Health Organisation (WHO) (2000):“Air Quality Guidelines for Europe,“ *Regional office for Europe, Copenhagen*, second edition,
http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf, dostupné online 10. 5. 2013

Zöllner, I., Gabrio, T., Link, B. (2007):“Concentrations of particulate matter in schools in southwest Germany,“ *Inhalation Toxicology*, 19(Suppl. 1), 245-249