

MĚŘENÍ VELIKOSTNÍ DISTRIBUCE AEROSOLOVÝCH NANOČÁSTIC V INTERIÉRU VYBRANÝCH ZÁKLADNÍCH ŠKOL V JIHOMORAVSKÉM KRAJI

MEASUREMENT OF SIZE DISTRIBUTION OF AEROSOL NANOPARTICLES IN INTERIOR OF SELECTED ELEMENTARY SCHOOLS IN SOUTH-MORAVIAN REGION

Eva KELLNEROVÁ, Tomáš ZEMAN, Pavel MIKUŠKA, Josef KELLNER
eva.kellnerova@unob.cz

Abstract

The article deals with the size distribution of aerosol particles in the range of 10 nm to 500 nm. The measurement was performed inside five primary schools in the South Moravian region from the 5.10.2014 to 21.1.2015. Average concentrations of nanoparticles and larger particles were consequently calculated for the assessed schools, as well as their mean diameter, surface area, approximate specific surface energy and approximate mass concentration per unit volume. Nanoparticles in the range from 10 nm to 100 nm made up 60–86% of the whole number of counted particles. Approximate mass concentration allocated to these nanoparticles was in the range from 3% to 6%. The parameters for specific surface of particles (SSA) and specific surface energy (SSE) were derived for the characterization of their importance in the full sample. The SSE of measured nanoparticles was estimated to be 6.0–7.21 J·cm⁻³, while for the particles in the range from 100 nm to 500 nm the estimated values were 1.7–1.88 J·cm⁻³. The relationship between the traffic intensity and number concentration of particles inside the tested primary schools was observed as well. While the correlation was low or slightly medium ($R_s = 0.36$) for the particles larger than 100 nm, for nanoparticles in the range from 10 nm to 100 nm the correlation was middle or high ($R_s = 0.67$). The trend of increasing of the number concentration of nanoparticles due to the traffic intensity was considerably discernible.

Key words

Aerosol nanoparticles, population protection, measures of particle size distribution.

1 ÚVOD

U každého typu činnosti člověka musíme počítat s riziky. Jde o přirozený jev, který může být minimalizován zaváděním různých druhů bezpečnostních opatření. Různé druhy aktivit, zejména průmyslových, s sebou přinášejí různé druhy rizik. Například u pracovníků průmyslových provozů to mohou být rizika psychická, chemická, biologická, sociální aj. Zavádění některých nových výrobních technologií může vést k uvolňování nebezpečných chemických látek a aerosolů (toxické látky, prachy, páry, nanočástice) do životního prostředí. Toto je obzvláště pravděpodobné pro technologie využívající nové látky a nanočástice, jejichž dlouhodobé účinky na zdraví a ekosystémy nejsou známy, nebyly rozpoznány a nemůžeme je dosud ani určit.

Výzkum v této oblasti by měl být, z hlediska předběžné opatrnosti, zaměřen zejména na vyšetřování toxických vlastností těchto chemických činitelů, vývoj kritérií pro hodnocení expozice jemným částicím, které zahrnují i nanočástice, a vývoj kritérií pro určení současného vystavení rozdílným chemickým činitelům.

Základní metodiky snižování rizika těchto materiálů v rámci ochrany obyvatelstva zahrnují dále návrh systémů a zařízení používaných k přímé ochraně dotčeného subjektu, tj. vývoj a zavádění bezrizikových technologií a materiálů, aplikaci technické kolektivní ochrany a nakonec použití následných bezpečnostních opatření jako jsou organizační procedury, nebo používání osobních ochranných prostředků.

2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

Nanočástice vznikající přírodní cestou, např. při vulkanických erupcích, prachových bouřích a lesních požárech [1], byly vždy součástí životního prostředí. Jejich koncentrace se však v důsledku činnosti člověka výrazně zvýšily [2, 3]. Mezi jejich nejvýznamnější zdroje v současnosti patří spalovací motory, tepelné elektrárny, hutě a další spalovací procesy, např. spalování uhlí a dřeva při vytápění domácností a průmyslové výrobě [4, 5]. V důsledku rychlého rozvoje nanotechnologií v posledních desetiletích jsou navíc nanočástice stále častěji připravovány záměrně při průmyslové výrobě nanomateriálů. Do životního prostředí se tyto nanočástice mohou uvolňovat nejen při samotné výrobě nanomateriálů, ale také v průběhu jejich používání a následného rozkladu [6, 7].

Aydin et al. [8] vymezují 3 mechanismy toxicity nanočástic: 1) vyvolání oxidativního stresu; 2) vznik zánětlivých procesů; 3) genotoxicita. Předpokládá se, že příčinou biologického účinku nanočástic je jejich vysoká schopnost interagovat s biomolekulami, zejména s proteiny [2, 3, 9]. Ta je podmíněna jejich vysokou povrchovou reaktivitou, což bezprostředně souvisí s vysokým podílem povrchových atomů a molekul, které se nalézají ve stavu termodynamické nerovnováhy. Z hlediska předpokládaných toxických účinků jsou, vzhledem k jejich vysoké pronikavosti do organismu cestou dýchací soustavy, za nejrizikovější považovány aerosolové nanočástice v ovzduší.

Existuje celá řada metod, které lze pro měření koncentrace aerosolových nanočástic využít. Každá z metod má své přednosti a nelze tedy jednoznačně určit, která je nevhodnější (pro přehled [10, 11]). Za velmi slibné jsou považovány metody založené na měření mobility částic v elektrickém poli. Na tomto principu pracuje přístroj SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer).

Hlavními zdroji aerosolových nanočástic, které se vyskytují v životním prostředí, jsou v současné době antropogenní zdroje z dopravy a energetiky. Doposud provedené výzkumy naznačují, že na koncentracích nanočástic ve městech (zejména u cest s vysokou intenzitou dopravy) se největší měrou podílí emise nanočástic z motorových vozidel [12, 13]. Zhu et al. [14] zjistili, že nejvýznamnější faktory ovlivňující početní koncentrace nanočástic v ovzduší v blízkosti silnic jsou rychlost větru, vzdálenost od silnice a intenzita provozu.

Pokud jde o aerosolové nanočástice v interiérech budov, ukazuje se, že jejich hlavním zdrojem jsou nanočástice z okolního ovzduší [15]. Početní koncentrace nanočástic v interiéru přibližně kopírují početní koncentrace nanočástic v exteriéru, avšak jsou prakticky vždy nižší, což je pravděpodobně dáno ochrannou funkcí oken. Byly ovšem zaznamenány také případy, kdy došlo k výraznému rychlému nárůstu početních koncentrací nanočástic interiéru v důsledku některých činností (např. vaření, používání svíček).

Cílem našeho výzkumu je provést měření početní koncentrace a velikostní distribuce aerosolových nanočástic v interiéru vybraných základních škol (ZŠ). Prostorů základních škol bylo zvoleno ze dvou důvodů: 1) Základní škola tvoří prostředí, v němž se její žáci pohybují významnou část dne. Působení inhalovaných nanočástic na zdravotní stav žáků je zde proto dlouhodobé a opakované. 2) Děti obecně představují skupinu obyvatel s vyšší citlivostí vůči polutantům. Tato fakta se řadí mezi hlavní důvody pro předpoklad, že se u dětí projeví negativní zdravotní následky z inhalace vzdušných polutantů dříve než u dospělých. Dále lze rovněž očekávat, že se u mladého dětského organismu projeví výskyt zdravotních symptomů

souvisejících se zvýšenou inhalací škodlivých nanočástic s větší intenzitou. U mnohdy značně nespecifických zdravotních symptomů (kašel, alergie, únava apod.), způsobených přílišným vdechováním ultrajemných prachových částic, to následně může představovat jejich snadnější lékařskou diagnostiku. Bez přesných dat a detailních informací o prostředí základních škol, v němž se děti pohybují a tráví podstatnou část svého života, nebude možné relevantně zvážit, zda pro ně pobyt v takovém ovzduší představuje zvýšené riziko výskytu negativních zdravotních symptomů. Závěry našeho výzkumu by z těchto důvodů bylo vhodné doplnit a dále rozvést výzkumem hodnotícím zdravotní stav dětí s ohledem na námi dosažené výsledky.

3 POUŽITÉ METODY

Byly měřeny početní koncentrace aerosolových částic v interiéru 5 základních škol. Všechny sledované školy se nacházejí na území Jihomoravského kraje (JMK). Pro měření byl využit aerosolový spektrometr SMPS (model 3936L72, TSI). Částice byly měřeny v rozsahu velikosti od 10 nm do 500 nm s rozlišením 64 kanálů na dekádu. Měření probíhalo ve všech případech v prázdné třídě, nebo kabinetu orientovaném do ulice s nejvyšší intenzitou dopravy. Na každé škole bylo bezprostředně po sobě analyzováno 5 vzorků vzduchu (doba analýzy jednoho vzorku činila přibližně 5 min., celková doba měření na jedné škole tedy činila přibližně 25 min.). Všechny dveře a okna v místnosti byly po dobu měření uzavřeny. Pro vyhodnocení signálu z přístroje SMPS byl využit software Aerosol Instrument Manager [16], který umožňuje exportovat pro jednotlivé kanály hodnoty normalizované početní koncentrace částic (NC_i) v analyzovaném vzorku vzduchu. NC_i je dána vztahem

$$NC_i = \frac{C_i}{\log_{10} D_{i+1} - \log_{10} D_{i-1}}, \quad (1)$$

kde C_i [N/cm^3] je početní koncentrace částic pro i -tý kanál a D_i průměr částic měřených v i -tém kanálu [17]. Vzhledem k tomu, že dekadické logaritmy šířky kanálu jsou u všech kanálů shodné s rozlišením 64 kanálů na dekádu, platí

$$C_i = \frac{NC_i}{64}. \quad (2)$$

Na základě tohoto vztahu byly z hodnot normovaných početních koncentrací pro jednotlivé kanály dopočítány hodnoty nenormovaných početních koncentrací.

Početní koncentrace částic naměřené v jednotlivých kanálech v 5 následných měřeních provedených na každé škole byly pro účely dalších výpočtů pro každý kanál zprůměrovány. Dále byla vypočítána celková početní koncentrace (C_N) a střední průměr částic (MD) podle vztahů

$$C_N = \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

a

$$MD = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^n D_i C_i, \quad (4)$$

kde n je celkový počet kanálů. Na základě předpokladu o kulovitě tvaru částic byl následně celkový povrch částic (SA) a celkový objem částic (V) podle vzorců

$$SA = 4\pi \sum_{i=1}^n R_i^2 C_i \quad (5)$$

a

$$V = \frac{4}{3}\pi \sum_{i=1}^n R_i^3 C_i, \quad (6)$$

kde R_i poloměr částic měřených v i -tém kanálu a C_i početní koncentrace částic v i -tém kanálu. Následně byl vypočítán specifický povrch částic (SSA) podle vzorce

$$SSA = \frac{SA}{V}. \quad (7)$$

Dále byla na základě naměřených dat přibližně odhadnuta hmotnostní koncentrace (C_M) částic a specifická povrchová energie (SSE) podle vzorců

$$C_M = V\rho \quad (8)$$

a

$$SSE = \sigma SSA, \quad (9)$$

kde ρ značí průměrnou hustotu částic a σ povrchové napětí. Pro ilustrační účely bylo zvoleno $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$, což odpovídá hodnotám zjištěným pro městský aerosol v rámci různých studií (pro přehled [18]), a $\sigma = 0,0728 \text{ N/m}$, což odpovídá tabelované hodnotě povrchového napětí vody při $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pro každou školu byly následně v archivu počasí [19] dohledány hodnoty základních meteorologických ukazatelů (teplota a vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru, intenzita srážek a atmosférický tlak), které byly hlášeny v Brně v čase zahájení 1. měření na každé škole. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1. Všechny školy se nacházely ve vzdušné vzdálenosti menší než 40 km od Brna, 3 z nich se přitom nacházely přímo v Brně.

Při vyhodnocení naměřených dat jsme využili roční průměry denních intenzit dopravy na pozemních komunikacích v bezprostředním sousedství sledovaných škol [20], které uvádí Tab. 2.

Míra závislosti mezi jednotlivými sledovanými veličinami byla hodnocena pomocí Spearmanova koeficientu pořadové korelace (R_S). Pro veškeré výpočty a tvorbu grafů byl využit programovací jazyk R [21].

Na ZŠ 1 bylo měření provedeno dne 22. 10. 2014 v čase od 9:00 do 9:25. Škola se nachází v zástavbě u dopravně středně až silně vytižené místní komunikace (Obr. 1). Měřeno bylo ve sborovně situované v prvním poschodí přibližně 3 metry nad úrovní okolního terénu. Na ZŠ 2 bylo měření provedeno dne 15. 10. 2014 v čase od 11:00 do 11:25. Škola se nachází v blízkosti hlavní silnice, která je však poměrně málo dopravně zatížena (Obr. 2). Škola je umístěna tak, že hlavní silnice kopíruje kratší stranu budovy školy, takže do této silnice přímo neústí okna žádných tříd. Bylo proto přistoupeno k měření na delší straně školní budovy ve třídě, která se nachází nejbližší hlavní silnici. Třída, v níž měření probíhalo, je situována ve zvýšeném přízemí ve výšce přibližně 1,5 metrů nad úrovní okolního terénu. Na ZŠ 3 bylo měření provedeno

dne 22. 10. 2014 v době od 11:30 do 11:55. Škola se nachází ve vzdálenosti přibližně 50 m od dopravně silně frekventované ulice (Obr. 3). Od této silnice je však škola oddělena souvislým blokem městské zástavby. Měřeno bylo v kabinetu, který se nacházel ve zvýšeném přízemí přibližně 1,5 m nad úroveň okolního terénu. Na ZŠ 4 bylo měření provedeno dne 21. 1. 2015 v době od 9:00 do 9:25. Škola se nachází v sousedství dopravně frekventované křižovatky (Obr. 4). Měřeno bylo v kabinetu, který se nachází přibližně 3 metry nad úroveň okolního terénu a je orientován směrem do křižovatky. Na ZŠ 5 bylo měření provedeno dne 21. 1. 2015 v době od 11:30 do 11:55. Škola se nachází u křižovatky dvou velmi silně frekventovaných místních komunikací (Obr. 5). Měřeno bylo ve třídě orientované směrem do frekventovanější z obou silnic. Třída se nachází v přízemí školní budovy přibližně 0,5 metru nad úroveň vozovky.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Na Obr. 6–10 jsou znázorněny velikostní distribuce částic v rozsahu od 10 nm do 500 nm na sledovaných ZŠ. V Tab. 3 jsou uvedeny průměrné hodnoty veličin pro nanočástice od 10 nm do 100 nm. V Tab. 4 jsou pak uvedeny stejné údaje pro částice od 100 nm do 500 nm. Tab. 5 udává podíl hodnot sledovaných parametrů zjištěných u nanočástic od 10 nm do 100 nm a částic v rozsahu velikosti od 100 nm do 500 nm.

Tabulka 1
Hodnoty základních meteorologických ukazatelů zaznamenané v Brně v čase měření na sledovaných ZŠ (zdroj dat:[19])

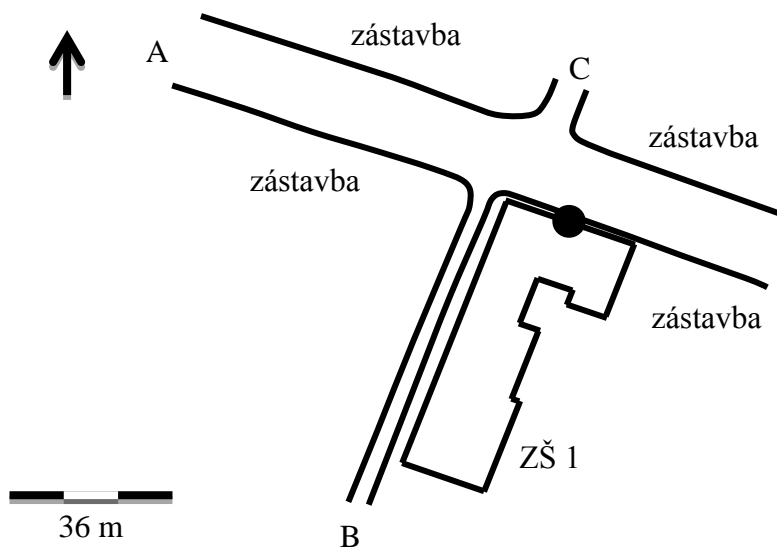
	datum a čas	T _{atm} [°C]	T _{dp} [°C]	P _{atm} [hPa]	v [km/h]	SV
ZŠ 1	22.10.2014 9:00	9	4	1006	27	Z
ZŠ 2	15.10.2014 11:00	10	8	1009	3	NA
ZŠ 3	22.10.2014 11:30	9	3	1006	23	Z
ZŠ 4	21.1.2015 9:00	2	0	1014	2	NA
ZŠ 5	21.1.2015 11:30	3	1	1014	4	V

Poznámka: T_{atm} - teplota vzduchu, T_{dp} - teplota rosného bodu, P_{atm} - atmosférický tlak, v - rychlost větru, SV - převládající směr větru, Z - západní, V - východní, NA - proměnlivý vítr, převládající směr nebylo možné určit.

Tabulka 2
Roční průměry denních intenzit dopravy na přilehlých pozemních komunikacích (zdroj dat: [20])

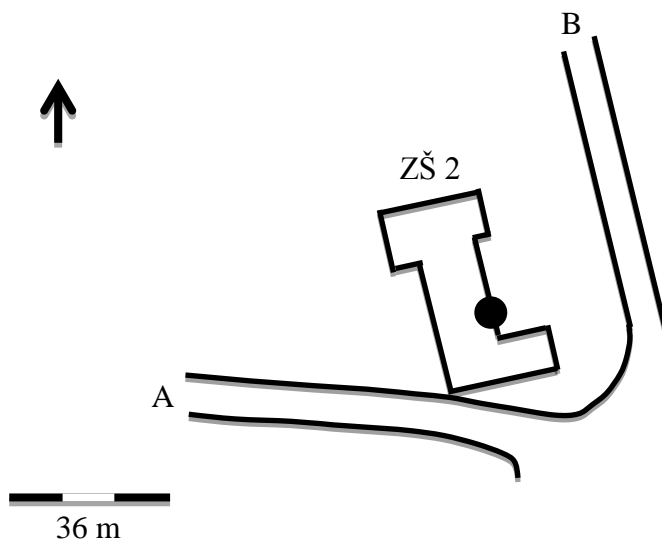
	komunikace ¹	ID [tis. vozidel/den]	TMV [%]
ZŠ 1	A	23	4
ZŠ 2	A	2	6
ZŠ 3	A	9	9
ZŠ 4	A	6	7
	B	3	9
ZŠ 5	A	14	4
	B	20	5

Poznámka. ID - roční průměr denních intenzit dopravy zjištěný při sčítání v roce 2012, TMV - podíl těžkých motorových vozidel, ¹ - odpovídá označení komunikací v situačních nákresech (viz Obr. 1–5).



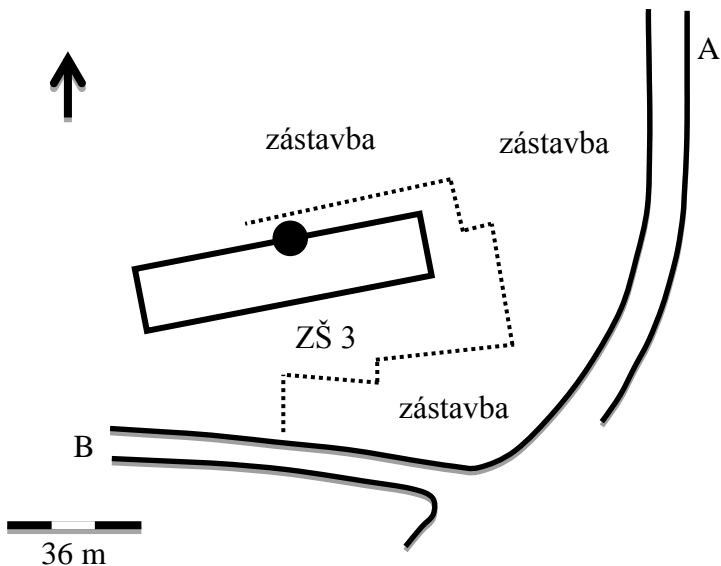
Obr. 1
Situční plán ZŠ 1 a okolí

Legenda: A, B a C označují přilehlé pozemní komunikace, černá šipka v levém horním rohu označuje sever a černý bod polohu místnosti, v níž bylo měření provedeno.



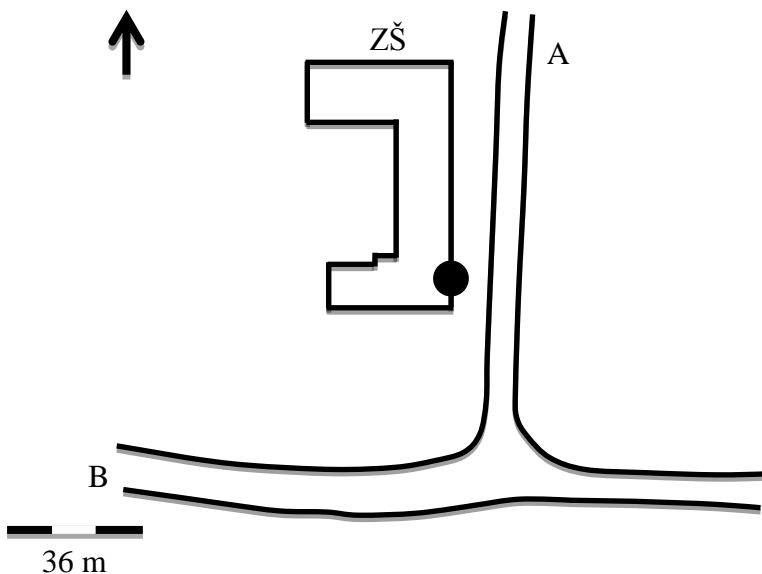
Obr. 2
Situční plán ZŠ 2 a okolí

Legenda: A a B označují přilehlé pozemní komunikace, černá šipka v levém horním rohu označuje sever a černý bod polohu místnosti, v níž bylo měření provedeno.



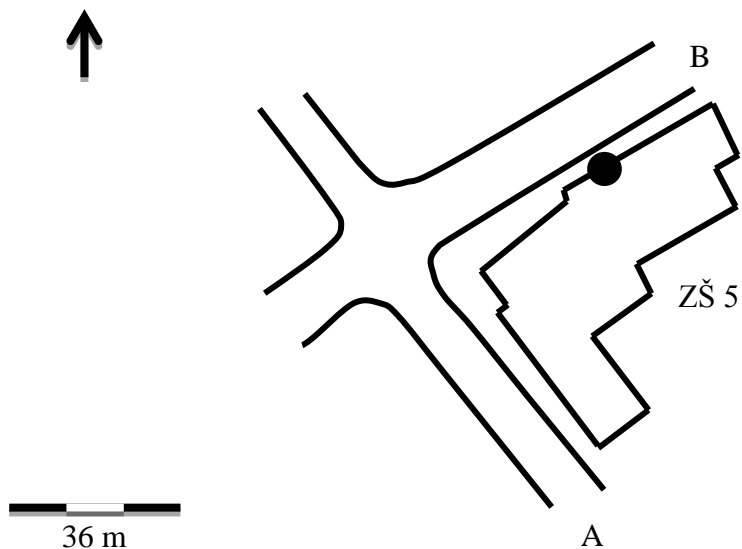
Obr. 3
Situční plán ZŠ 3 a okolí

Legenda: A a B označují přilehlé pozemní komunikace, přerušovaná čára vymezuje úroveň zástavby v okolí ZŠ 3, černá šipka v levém horním rohu označuje sever a černý bod polohu místnosti, v níž bylo měření provedeno.



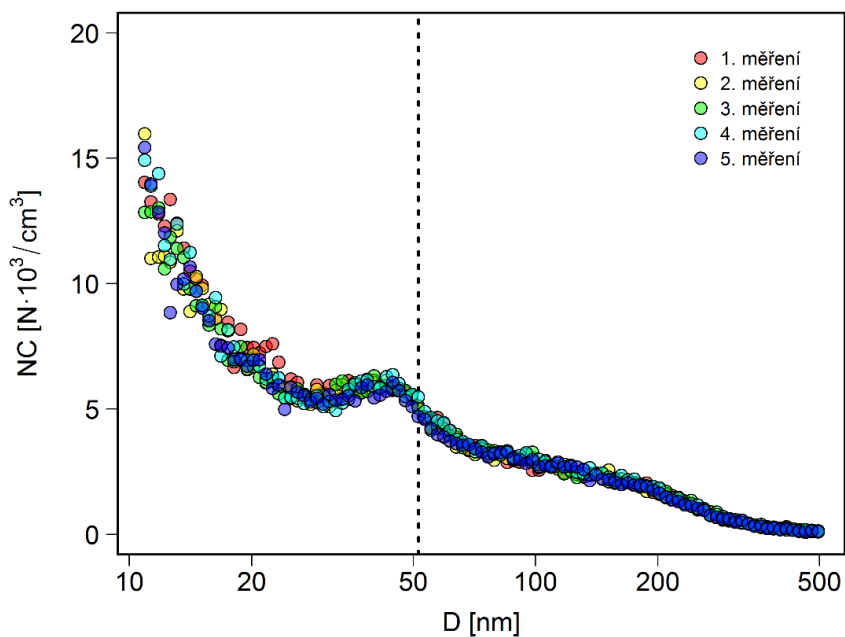
Obr. 4
Situční plán ZŠ 4 a okolí

Legenda: A a B označují přilehlé pozemní komunikace, černá šipka v levém horním rohu značí sever a černý bod polohu místnosti, v níž bylo měření provedeno.

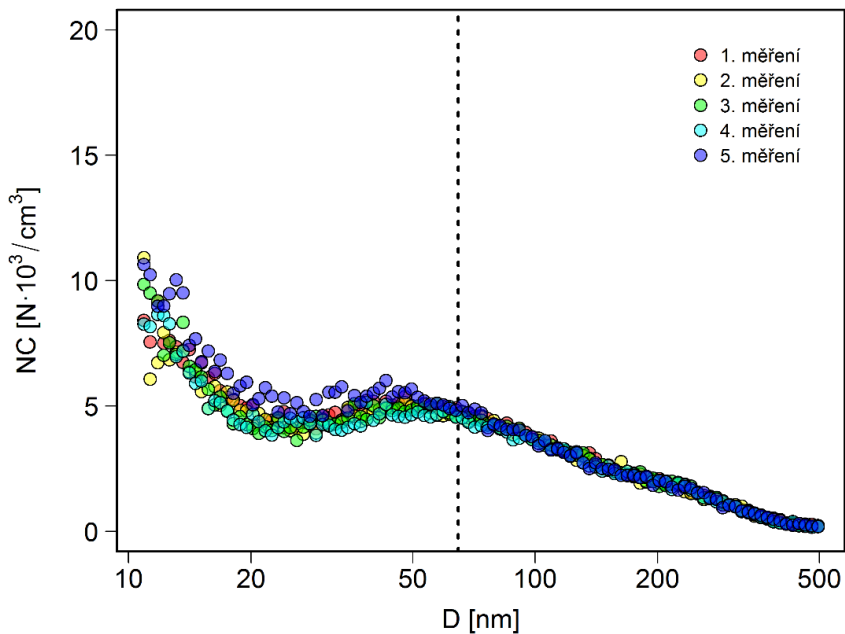


Obr. 5
Situční plán ZŠ 5 a okolí

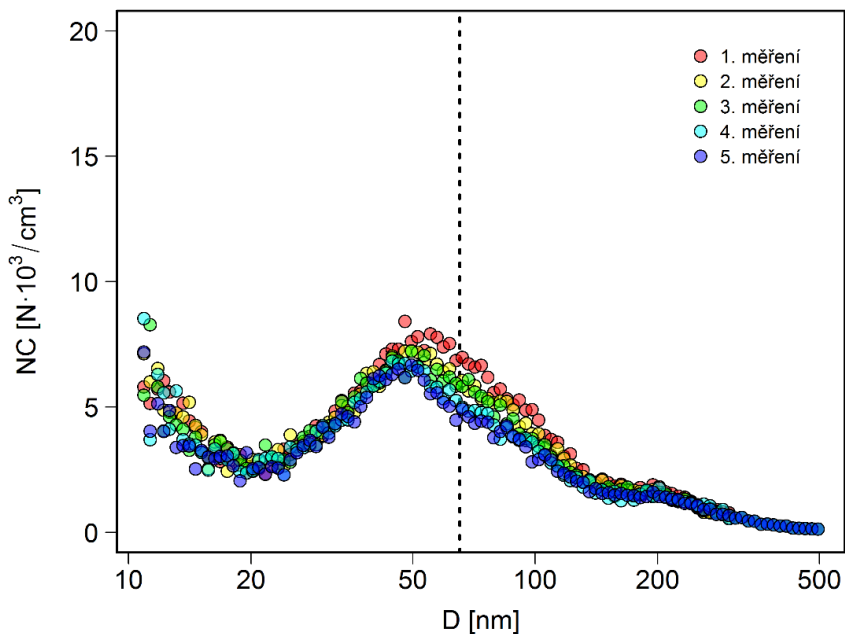
Legenda: A a B označují přilehlé pozemní komunikace, černá šipka v levém horním rohu označuje sever a černý bod polohu místnosti, v níž bylo měření provedeno.



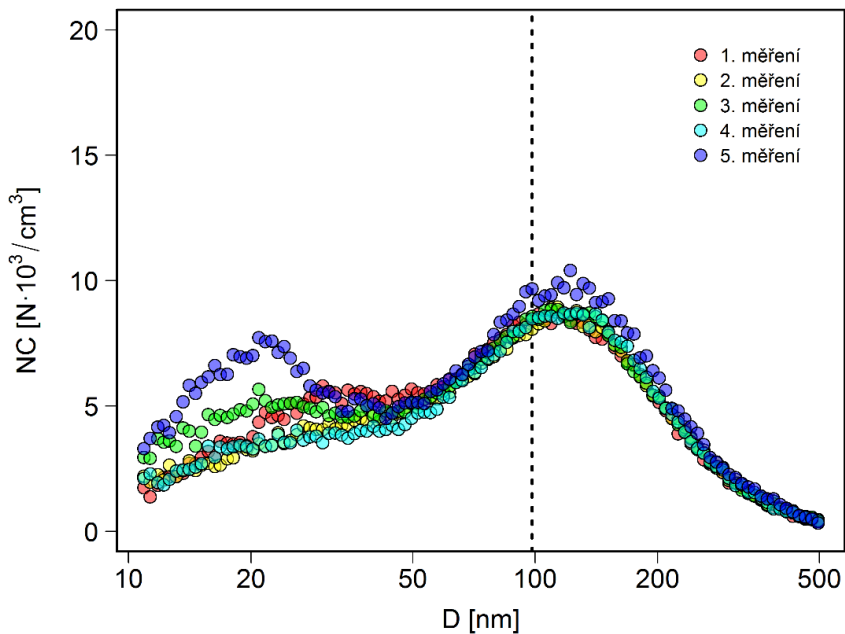
Obr. 6
Velikostní distribuce částic na ZŠ 1



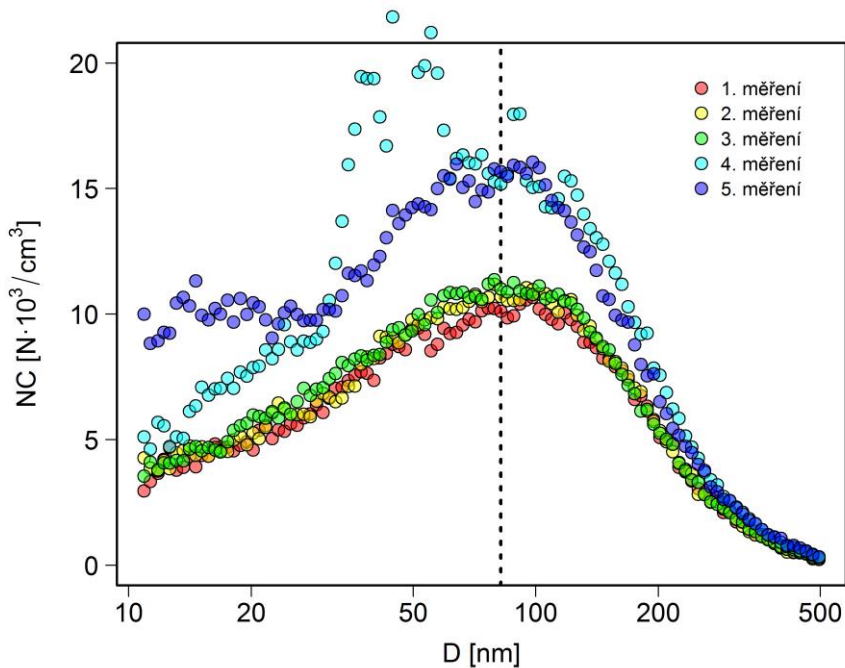
Obr. 7
Velikostní distribuce částic na ZŠ 2



Obr. 8
Velikostní distribuce částic na ZŠ 3



Obr. 9
Velikostní distribuce částic na ZŠ 4



Obr. 10
Velikostní distribuce částic na ZŠ 5

Tabulka 3

Srovnání průměrných hodnot pro nanočástice od 10 nm do 100 nm na sledovaných základních školách

	MD [nm]	C _N [N/cm ³]	C _M [μg/m ³]	SA [μm ² /cm ³]	V [μm ³ /cm ³]	SSA [μm ⁻¹]	SSE [J/cm ³]
ZŠ 1	31	6051	0,42	27,78	0,28	99,05	7,21
ZŠ 2	36	5074	0,49	30,11	0,33	92,32	6,72
ZŠ 3	42	4318	0,52	31,73	0,35	91,72	6,68
ZŠ 4	46	5062	0,81	44,59	0,54	82,94	6,04
ZŠ 5	47	10505	1,59	91,92	1,06	86,51	6,3

Poznámka. MD - průměrná velikost částic změřených s SMPS, C_N - početní koncentrace částic, C_M - hmotnostní koncentrace částic, SA - celkový povrch částic, V - celkový objem částic, SSA - specifický povrch částic, SSE - specifická povrchová energie částic.

Tabulka 4

Srovnání průměrných hodnot pro nanočástice od 100 nm do 500 nm na sledovaných základních školách

	MD [nm]	C _N [N/cm ³]	C _M [μg/m ³]	SA [μm ² /cm ³]	V [μm ³ /cm ³]	SSA [μm ⁻¹]	SSE [J/cm ³]
ZŠ 1	176	976	6,66	110,22	4,44	24,81	1,81
ZŠ 2	184	1212	9,73	151,74	6,49	23,39	1,7
ZŠ 3	179	872	6,59	104,42	4,39	23,76	1,73
ZŠ 4	177	3368	23,97	389,43	15,98	24,37	1,77
ZŠ 5	169	4277	25,9	445,35	17,26	25,8	1,88

Poznámka. MD - průměrná velikost částic změřených s SMPS, C_N - početní koncentrace částic, C_M - hmotnostní koncentrace částic, SA - celkový povrch částic, V - celkový objem částic, SSA - specifický povrch částic, SSE - specifická povrchová energie částic.

Tabulka 5

Podíl hodnot sledovaných parametrů zjištěných u nanočástic od 10 nm do 100 nm a částic v rozsahu velikosti od 100 nm do 500 nm

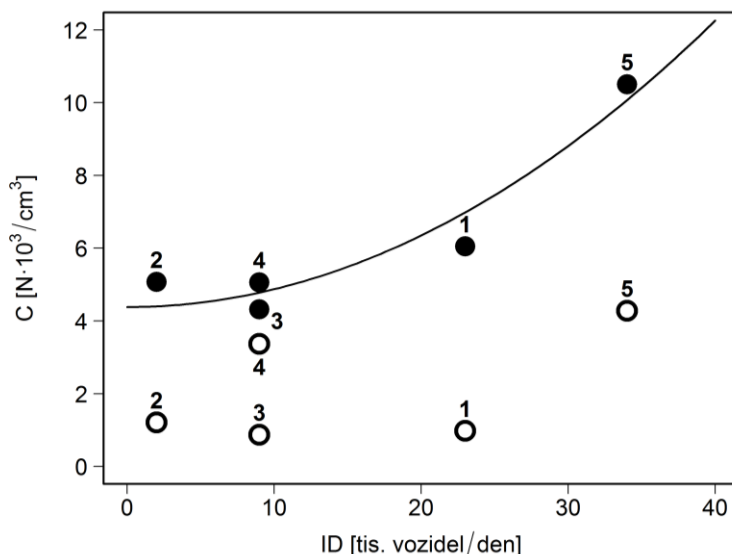
	MD [%]	C _N [%]	C _M [%]	SA [%]	V [%]	SSA [%]	SSE [%]
ZŠ 1	18	620	6	25	6	399	398
ZŠ 2	20	419	5	20	5	395	395
ZŠ 3	23	495	8	30	8	386	386
ZŠ 4	26	150	3	11	3	340	341
ZŠ 5	28	246	6	21	6	335	335

Poznámka. MD - průměrná velikost částic změřených s SMPS, C_N - početní koncentrace částic, C_M - hmotnostní koncentrace částic, SA - celkový povrch částic, V - celkový objem částic, SSA - specifický povrch částic, SSE - specifická povrchová energie částic.

Jak lze vidět na Obr. 6–9, byla velikostní distribuce měřených částic po dobu měření (přibližně 25 min.) u většiny škol prakticky neměnná. Tyto výsledky naznačují, že nanočástice z exteriéru přechází dovnitř budov jen omezenou rychlostí. Koncentrace nanočástic v interiéru tedy výrazně nereagují na náhlé zvýšení koncentrace nanočástic v exteriéru, které lze očekávat

zejména při průjezdu těžkého motorového vozidla, přinejmenším u základních škol, které se nacházejí v bezprostředním sousedství silně frekventované silnice. Žádné jednorázově odlehle hodnoty však v interiéru ZŠ1–ZŠ4 naměřeny nebyly. Předpokládáme proto, že změna početních koncentrací nanočástic v interiéru budov v reakci na zvýšení početních koncentrací nanočástic v exteriéru bude pozvolná a plně se projeví až s určitým zpožděním (za předpokladu, že jsou dveře a okna v místnosti zavřena). Podobnou situaci zaznamenal Matson [15], který měřil početní koncentrace kontinuálně během dne v několika budovách. Ačkoliv křivka početních koncentrací v interiéru přibližně kopírovala tutéž křivku sestavenou pro exteriér, její průběh byl zřetelně hladší bez výrazných skoků. Jak prokázali Diapouli et al. [22], existuje mezi dlouhodobými průměry početních koncentrací nanočástic v interiéru a exteriéru silná korelace (měřeno bylo po dobu 8 hodin). U okamžitých hodnot a krátkodobých průměrů však bude tato korelace pravděpodobně výrazně slabší. K rozdílným výsledkům dospěl Koponen et al. [23], který zjistil, že početní koncentrace naměřené v interiéru zvolené kancelářské budovy relativně přesně kopírují hodnoty početních koncentrací naměřených v exteriéru. Autoři ovšem uvádějí, že při měření byly otevřené dveře na chodbu, stejně jako dveře vedoucí z chodby ven. Budova byla navíc vybavena blíže nespecifikovaným ventilačním systémem. Je proto pravděpodobné, že nanočástice pronikaly do interiéru touto cestou.

Odlišná situace však byla zaznamenána u ZŠ5 (Obr. 10), kde u prvních třech měření byla zjištěna prakticky totožná velikostní distribuce částic. Na začátku čtvrtého měření došlo ovšem k výraznému nárůstu početních koncentrací. Zvýšené hodnoty početních koncentrací pak byly pozorovány i u pátého měření. Domníváme se, že tento jev může být důsledkem blíže nespecifikované činnosti provedené uvnitř školní budovy. Hypotéza je založena na poznatku Matsona [15], který zachytil vliv zapálené svíce a vaření na hodnoty početní koncentrace nanočástic v interiéru. Další zdroje nanočástic v interiéru zachytili dříve Afshari et al. [24], jednalo se o cigaretový kouř, vysávání, žehlení prádla, použité osvěžovače vzduchu a provoz ústředního vytápění. Vzhledem k nízké venkovní teplotě vzduchu v čase měření a k době, kdy bylo měření na ZŠ5 provedeno (11:00–11:25), se mohlo jednat o činnost spojenou s vytápěním školy, popř. přípravou obědů.



Obr. 11

Korelace mezi intenzitou dopravy (ID) a početní koncentrací částic (C)

Legenda: Plné body značí nanočástice od 10 nm do 100 nm, prázdné body částice od 100 nm do 500 nm.

Na obr. 11 je graficky znázorněn vztah mezi intenzitou dopravy a celkovým počtem částic v interiéru sledovaných ZŠ. Zatímco u částic > 100 nm byla tato korelace jen slabá až střední ($R_S = 0,36$), u nanočástic byla korelace střední až silná ($R_S = 0,67$), přičemž zde byl dobře patrný trend zvyšování početní koncentrace nanočástic s rostoucí intenzitou dopravy. Přestože žádný z korelačních koeficientů nebyl statisticky významný, naznačují tyto výsledky, že intenzita dopravy má větší vliv na početní koncentrace nanočástice, než na početní koncentrace částic větších. Tento jev lze vysvětlit ochranným účinkem oken. Je pravděpodobné, že přes netěsnící okna projde relativně více nanočástic než částic větších rozměrů. Tuto hypotézu bude ovšem nutné ještě ověřit dalším měřením.

5 ZÁVĚR

Byly měřeny velikostní distribuce aerosolových částic v rozsahu od 10 nm do 500 nm v interiérech pěti základních škol v Jihomoravském kraji. Pro jednotlivé školy byly následně vypočteny průměrné početní koncentrace nanočástic a ostatních částic, jejich střední průměr, celkový povrch, specifický povrch, přibližná hmotnostní koncentrace a přibližná specifická povrchová energie v jednotkovém objemu. Střední průměr nanočástic od 10 nm do 100 nm se pohyboval v rozmezí od 31 nm do 47 nm. Srovnáním naměřených hodnot pro nanočástice od 10 nm do 100 nm a částice od 100 nm do 500 nm bylo zjištěno, že na nanočástice připadalo 60 % až 86 % celkového počtu naměřených částic, ale jen 3–6 % hmotnostní koncentrace. Specifický povrch částic (SSA) nabýval hodnot od $83 \mu\text{m}^{-1}$ do $99 \mu\text{m}^{-1}$ pro nanočástice, avšak jen $26 \mu\text{m}^{-1}$ až $29 \mu\text{m}^{-1}$ pro částice větší než 100 nm. V případě specifické povrchové energie (SSE) byly pro nanočástice odhadnuty hodnoty od 6,0 do $7,21 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$, zatímco pro částice od 100 nm do 500 nm jen 1,7 až $1,88 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$. V práci byl sledován také vztah mezi intenzitou dopravy a celkovým počtem částic v interiéru sledovaných ZŠ. Zatímco u částic větších než 100 nm byla tato korelace jen slabá až střední ($R_S = 0,36$), u nanočástic byla korelace střední až silná ($R_S = 0,67$), přičemž zde byl patrný trend zvyšování početní koncentrace nanočástic s rostoucí intenzitou dopravy na přilehlých pozemních komunikacích. Tento jev lze vysvětlit ochranným účinkem oken. Předpokládáme, že netěsnícími okny projde relativně větší počet nanočástic než částic větších rozměrů. Hypotézu však bude ještě nutné v budoucnu otestovat při dalším měření.

Poděkování

Měření bylo provedeno v rámci řešení projektu SV14-FEM-K106-08-ZEM.

Literatura

- [1] BUZEA, C., I. I. PACHECO BLANDINO a K. ROBBIE. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*. 2007, 2(4), MR17-MR172. ISSN 1934-8630.
- [2] OBERDÖRSTER, G., E. OBERDÖRSTER a J. OBERDÖRSTER. Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*. 2005, 113(7), 823-839. ISSN 0091-6765.
- [3] ROY, R., S. KUMAR, A. TRIPATHI, M. DAS a P. D. DWIVEDI. Interactive threats of nanoparticles to the biological system. *Immunology Letters*. 2014, 158(1-2), 79-87. ISSN 0165-2478.

- [4] GRIGORIU, C., W. N. WANG, D. MARTIN a P. BISWAS. Capture of Particles from an Iron and Steel Smelter with a Pulse-Energized Electrostatic Precipitator. *Aerosol and Air Quality Research*. 2012, 12, 673-682. ISSN 1680-8584.
- [5] RÖNKKÖ, T., L. PIRJOLA, L. NTZIACHRISTOS, J. HEIKKILÄ, P. KARJALAINEN, R. HILLAMO a J. KESKINEN. Vehicle Engines Produce Exhaust Nanoparticles Even When Not Fueled. *Environmental Science & Technology*. 2014, 48(3), 2043-2050. ISSN 0013-936X.
- [6] GUIOT, A., L. GOLANSKI a F. TARDIF. Measurement of nanoparticle removal by abrasion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009, 170(1). ISSN 1742-6588.
- [7] BISKOS, G. a A. SCHMIDT-OTT. Airborne Engineered Nanoparticles: Potential Risks and Monitoring Challenges for Assessing their Impacts on Children. *Paediatric Respiratory Reviews*. 2012, 13(2), 79-83. ISSN 1526-0542.
- [8] AYDIN, A., H. SIPAHI a M. CHAREHSAZ. Nanoparticles Toxicity and Their Routes of Exposures. In: SEZER, A. D., ed. *Recent Advances in Novel Drug Carrier Systems*. InTech, 2012, 483-500. ISBN 978-953-51-0810-8.
- [9] DOHNALOVÁ, L. a V. DOHNAL. Nanočástice a jejich toxicita. *Chemické Listy*. 2015, 109, 444-445.
- [10] GIECHASKIEL, B., M. MARICQ, L. NTZIACHRISTOS, C. DARDIOTIS, X. WANG, H. AXMANN, A. BERGMANN a W. SCHINDLER. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *Journal of Aerosol Science*. 2014, 67, 48-86. ISSN 0021-8502.
- [11] AMARAL, S. S., J. A. de CARVALHO, M. A. M. COSTA a C. PINHEIRO. An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere*. 2015, 6(9), 1327-1345. ISSN 2073-4433.
- [12] HAGLER, G. S. W., R. W. BALDAUF, E. D. THOMA, T. R. LONG, R. F. SNOW, J. S. KINSEY, L. OUDEJANS a B. K. GULLETT. Ultrafine particles near a major roadway in Raleigh, North Carolina: Downwind attenuation and correlation with traffic-related pollutants. *Atmospheric Environment*. 2009, 43(6), 1229-1234. ISSN 1352-2310.
- [13] KUMAR, P., A. ROBINS, S. VARDOULAKIS a R. BRITTER. A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the prospects for developing regulatory controls. *Atmospheric Environment*. 2010, 44(39), 5035-5052. ISSN 1352-2310.
- [14] ZHU, Y., J. PUDOTA, D. COLLINS, D. ALLEN, A. CLEMENTS, A. DENBLEYKER, M. FRASER, Y. JIA, E. MCDONALD-BULLER a E. MICHEL. Air pollutant concentrations near three Texas roadways, Part I: Ultrafine particles. *Atmospheric Environment*. 2009, 43(30), 4513-4522. ISSN 1352-2310.
- [15] MATSON, U. Indoor and outdoor concentrations of ultrafine particles in some Scandinavian rural and urban areas. *Science of The Total Environment*. 2005, 343(1-3), 169-176. ISSN 0048-9697.
- [16] TSI. *Aerosol Instrument Manager® Software* [software]. Version 9. 2010.
- [17] TSI. *Aerosol statistics lognormal distribution and $dN/dlogD_p$: Application note PR-001*. [online]. 2012 [cit. 2016-7.-27]. Dostupné z: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/PR-001-RevA_Aerosol-Statistics-AppNote.pdf
- [18] ZHAO, S., Y. YU, D. YIN a J. HE. Effective Density of Submicron Aerosol Particles in a Typical Valley City, Western China. *Aerosol and Air Quality Research*. 2016, v tisku. ISSN 1680-8584.
- [19] Meteocentrum.cz. *Archiv: Průběh počasí v Brně* [online]. © 2007-2015 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.meteocentrum.cz/archiv/pocasi-brno.php>
- [20] CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU: Výsledky sčítání dopravy v roce 2012 [osobní sdělení].

- [21] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing [software]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. ISBN 3-900051-07-0. Dostupné z: <http://www.R-project.org/>
- [22] DIAPOULI, E., A. CHALOULAKOU a N. SPYRELLIS. Levels of ultrafine particles in different microenvironments – Implications to children exposure. *Science of The Total Environment*. 2007, 388(1-3), 128-136. ISSN 0048-9697.
- [23] KOPONEN, I. K., A. ASMI, P. KERONEN, K. PUHTO a M. KULMALA. Indoor air measurement campaign in Helsinki, Finland 1999 – the effect of outdoor air pollution on indoor air. *Atmospheric Environment*. 2001, 35(8), 1465-1477. ISSN 1352-2310.
- [24] AFSHARI, A., U. MATSON a L. E. EKBERG. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*. 2005, 15, 141–150. ISSN 1600-0668.