

Ing. Marek BEGENI
 doc. Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Větrání učebny základní školy

Ventilation of Elementary School Classroom

Recenzent
 prof. Ing. František Drkal, CSc.

Článek prezentuje měření kvality vnitřního ovzduší v učebně základní školy v podobě analýzy koncentrace oxidu uhličitého CO₂ během výuky. Měření byla realizována jednak v učebně s přirozeným větráním a posléze s nuceným, rovnotlakým, větracím systémem. Vzhledem k instalaci větrací jednotky do prostoru učebny bylo přistoupeno k měření hladiny akustického tlaku ve třech kontrolních bodech učebny, pro všechny výkonové stupně jednotky.

Klíčová slova: větrání, školy, koncentrace CO₂, hladina akustického tlaku

The paper presents indoor air quality measurement in the classroom of elementary school by analysis of carbon dioxide CO₂ concentration during the class time. The measurement was realized first in the classroom with natural ventilation and after that with forced, neutral-pressure, ventilation system. Due to the installation of the air-handling unit inside the classroom, it was proceeded to measurement of acoustic pressure level in three control points, for all the power levels of the air-handling unit.

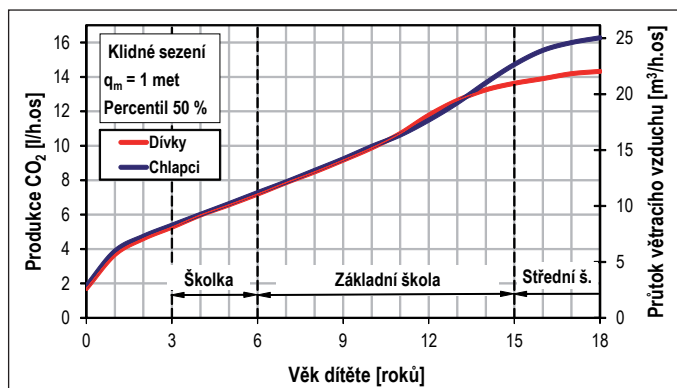
Key words: ventilation, schools, CO₂ concentration, level of acoustic pressure

ÚVOD

V souvislosti s masivním zateplováním a výměnou oken z důvodu snížení energetické náročnosti budov je vnitřní prostředí a větrání škol v poslední době poměrně aktuálním tématem. Převážná většina škol je vybavena otevíratelnými okny, ta jsou ale většinou zcela nevhodně navržena a přirozené větrání je tak často zcela nefunkční (důkazem je příklad řešené školy - viz dále). Největší problémy nastávají zejména v zimním období, kdy je přirozené větrání okny zcela potlačeno. Přitom na základních a středních školách, tráví děti v jedné učebně podstatnou část dne. Podle statistiky školských zařízení (zdroj: ČSÚ [9]) uveřejněné v předchozím čísle časopisu VVI, navštěvovalo základní a střední školy v roce 2012/2013 cca 1,3 milionu žáků, celkový počet učeben je cca 60 tisíc. Ze statistiky není zřejmé, kolik škol prošlo procesem revitalizace (zateplení a výměny oken), nicméně dá se předpokládat, vzhledem k orientaci dotačních titulů, že problém s větráním a vytvořením kvalitního prostředí se týká značné části škol.

Návrh větrání

Podle platné vyhlášky č. 410/2005 Sb. [3] má být průtok přiváděného venkovního vzduchu do učeben 20 až 30 m³/h na žáka. Určitým vodítkem mohou být i údaje uvedené v normě ČSN EN 15251 [4]. Uvedené hodnoty jsou hodnoty mezní (maximální) a slouží pro návrh větracího zařízení. Reálný průtok vzduchu se může od návrhového lišit a měl by respektovat skutečnou produkci CO₂ (větrání podle potřeby) z důvodu maximální úspory provozních nákladů.



Obr. 1 Produkce CO₂ v závislosti na věku dítěte a odpovídající dávky venkovního vzduchu (podle Pettenkoferova kritéria)

Pokud se pro hodnocení kvality vnitřního vzduchu použije Pettenkoferovo kritérium, tedy dodržení koncentrace CO₂ ve vnitřním prostředí 1000 ppm (při venkovní koncentraci 350 ppm), je možné stanovit průtok venkovního vzduchu na dítě pro různé věkové skupiny (např. 1. stupeň, 2. stupeň). Produkce CO₂ závisí na aktivitě a fyzických proporcích člověka (hmotnost, výška). Pro stanovení produkce CO₂ u dětí lze s výhodou využít percentilové grafy, které používají pediatři pro kontrolu správného růstu dítěte, kdy běžný průměr představuje 50% percentil. Na obr. 1 je znázorněna produkce CO₂ v závislosti na věku dítěte a tomu odpovídající průtok větracího vzduchu pro udržení koncentrace CO₂ 1000 ppm. Správný návrh větrání by měl respektovat právní předpis [1] z hlediska přítomnosti vyučujícího, pro kterého je učebna pracovištěm.

CO₂ se používá jako dobrý ukazatel míry znečištění vnitřního ovzduší a často se uplatňuje jako indikátor pro regulaci větracích systémů. Koncentrace CO₂ v ovzduší a vliv na člověka je uveden v tab. 1.

Tab. 1 Koncentrace CO₂ v ovzduší a vliv na člověka [5] a [7]

Koncentrace CO ₂ [ppm]	Popis a dopad na člověka
380 až 400	Běžná koncentrace ve venkovním ovzduší
800 až 1000	Doporučená úroveň koncentrace ve vnitřním prostředí
1200 až 1500	Maximální akceptovatelná koncentrace ve vnitřním prostředí
> 1500	Nastávají příznaky únavy a snižování koncentrace
> 2500	Óspalost, letargie, bolest hlavy
< 5000	Maximální bezpečná koncentrace bez zdravotních rizik
> 5000	Zvýšený tep, nedoporučuje se delší pobyt
> 10 000	Nastávají zdravotní obtíže
> 40 000	Životu nebezpečné

BUDOVA ŠKOLY A VĚTRÁNÍ

Měření probíhalo na ZŠ v Praze na Jižním městě, které je typickou sídlištní zástavbou z druhé poloviny 20. století. Tomuto faktu odpovídá také samotná budova školy, která prošla v uplynulých letech revitalizací



Obr. 2 Budova pavilonu základní školy

v podobě zateplení obálky včetně výměny oken. Na obr. 2 je budova pavilonu, kde je umístěna třída 4. A, ve které probíhalo měření kvality vnitřního prostředí. Jedná se o třídu umístěnou ve druhém patře. Věk žáků je 9 až 10 let, průměrný počet žáků ve třídě během vyučování je 25. Děti tráví výraznou část dne ve třídě, respektive celé dopoledne a v některých dnech i část odpoledne. Jedná se o první stupeň ZŠ. Časový rozvrh třídy je uveden v tab. 1.

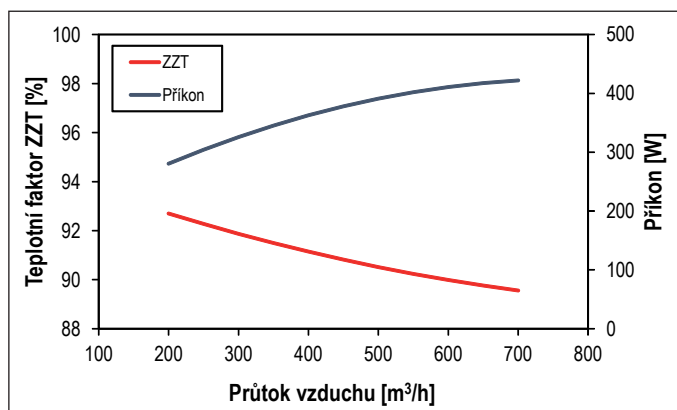
Původní větrání učebny bylo přirozené – okna, následně bylo do učebny instalováno nucené větrací zařízení v podobě větrací jednotky se zpětným získáváním tepla (viz dále).

Tab. 2 Časový rozvrh třídy

Den	8.00 až 8.45	8.55 až 9.40	9.55 až 10.40	10.50 až 11.35	11.45 až 12.30	12.40 až 13.25
Pondělí		výuka			-	výuka
Úterý		výuka				-
Středa			výuka			-
Čtvrtek		výuka			-	
Pátek			výuka			-

Realizace větracího zařízení

Na základě úvahy v úvodu tohoto článku, je při průměrném počtu žáků v dané třídě 25 a průměrném věku 9 let dostatečný průtok vzduchu $15 \text{ m}^3/\text{h}$ na žáka, tj. celkem $375 \text{ m}^3/\text{h}$. Pro větrání učebny byla vybrána jednotka, která dokáže dopravit při středních otáčkách tento průtok vzduchu.



Obr. 3 Závislost teplotního faktoru ZPT a příkonu větrací jednotky Venus HRV70EC na průtoku vzduchu



Obr. 4 Realizace nuceného větrání – přívod vzduchu



Obr. 5 Realizace nuceného větrání - odvod vzduchu a větrací jednotka



Obr. 6 Realizace nuceného větrání – sání a výfuk vzduchu na fasádě

Instalace systému nuceného větrání probíhala v době školního klidu. Do učebny byla instalována větrací jednotka s deskovým hliníkovým rekuperačním výměníkem Venus HRV70EC. Na obr. 3 jsou uvedeny výkonové parametry jednotky v podobě závislosti teplotního faktoru ZPT a příkonu jednotky (pro max. otáčky) na průtoku vzduchu.

Vzduchovody o průměru 250 mm jsou realizovány z ohebných hadic s útlumem hluku a z ocelového pozinkovaného potrubí (ze spirálně vinutého plechu), v němž jsou instalovány 3 dvouřadé vyústky pro přívod vzduchu do třídy. Odvod vzduchu je zajištěn dvěma talířovými ventily $\varnothing 200$. Přívod vzduchu je situován pod stropem při zadní stěně místnosti (viz obr. 4), odvod vzduchu na opačné straně třídy nad tabulí (obr. 5).

Sání a výfuk vzduchu je umístěn na obvodovém plášti budovy (obr. 6). Větrací jednotka je umístěna ve třídě pod stropem v blízkosti vstupních dveří.

Větrací jednotka umožňuje regulaci průtoku ve třech stupních otáček ventilátorů. Po realizaci větracího zařízení bylo přistoupeno k měření skutečného objemového průtoku v podobě sondáže rychlostního profilu pro všechny tři stupně otáček ventilátoru. Výsledky jsou uvedeny v tab. 3. Pro potřeby regulace průtoku vzduchu v automatickém provozu bylo zařízení vybaveno čidlem koncentrace CO₂.

Tab. 3 Průtoky vzduchu pro jednotlivé otáčky ventilátorů

Stupeň otáček	Průtok vzduchu [m ³ /h]	Průtok vzduchu na žáka [m ³ /h]	Intenzita větrání [h ⁻¹]
1	229	8,8	1,12
2	371	14,3	1,82
3	617	23,7	3,0

MĚŘENÍ KONCENTRACE CO₂

Samotné měření kvality vnitřního prostředí v učebně základní školy probíhalo ve dvou krocích. Nejprve bylo přistoupeno k měření koncentrace oxidu uhličitého bez jakéhokoliv zásahu do provozu třídy, za stávajícího stavu (přirozené větrání okny). Měření probíhalo v březnu. Čidlo CO₂ bylo umístěno na vybrané reprezentativní místo, kterým byla deska pracovního stolu vyučujícího ve výšce 0,8 m nad podlahou. Nebyl stanoven žádný limitující parametr, který by zamezil vyučujícímu jakkoliv podle uvážení otevírat okna či dveře. Následně bylo do učebny instalováno výše popsané větrací zařízení a měření se opakovalo, tentokrát měření probíhalo během dubna a května.

Pro měření koncentrace CO₂ v učebně bylo využito čidlo Wöhler CDL 210, které měří na principu nedisperzivního infračerveného záření. Výrobce uváděná přesnost čidla pro měření koncentrace CO₂ je ± 5 % z naměřené hodnoty. Před vlastním měřením bylo použito čidlo CDL 210 podrobeno porovnání s kalibrovaným čidlem Vaisala MI70 (obr. 7). Výsledky měření čidlem CDL 210 vykazují dobrou shodu s odchylkou ± 4,6 % oproti hodnotám naměřených čidlem Vaisala MI70. Pro teploty vzduchu uvádí výrobce přesnost ± 0,6 °C.

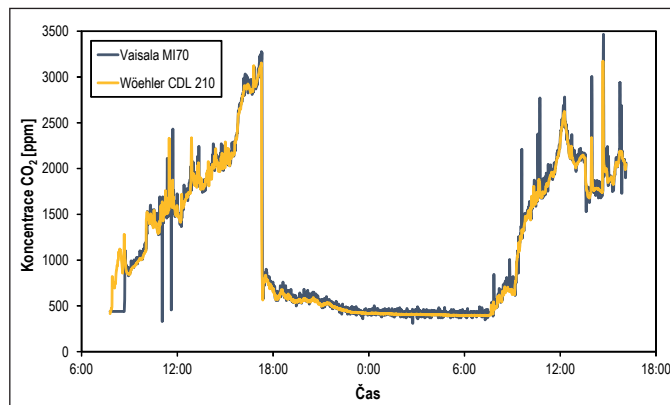
Měření před realizací nuceného větrání

Tato varianta představuje typický stav v učebnách, kdy větrání je možné zajistit pouze přirozeným způsobem – provětráváním okny. Při tomto měření nebylo nikterak zasahováno do zvyklostí a provozu třídy. Měření probíhalo v březnu během dvou týdnů. Na obr. 8 je znázorněn průběh koncentrace oxidu uhličitého v jednom vyučovací týdnu v době od 24. 3. do 28. 3. 2014 (černý průběh). Maximální hodnoty dosahují 3 964 ppm, průměrná hodnota během vyučování činí 2 000 ppm. Z průběhu na obr. 8 je patrný rychlý nárůst koncentrace po příchodu žáků do třídy resp. po zahájení vyučování. Stejně tak je patrný strmý pokles, jakmile žáci třídu opustí. Zajímavý je pokles koncentrace CO₂ cca 1 hodinu před zahájením vyučování každý den, kdy do učebny přichází uklízečka a do začátku vyučování dochází k příčnému provětrání třídy.

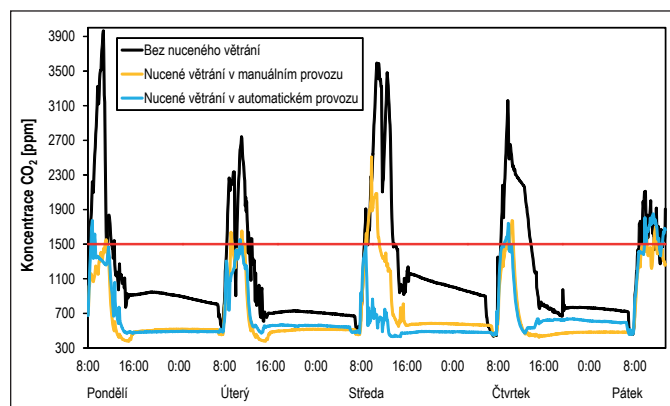
Měření po realizaci nuceného větrání

Po instalaci nuceného větrání s přívodem a odvodem vzduchu bylo opět zrealizováno měření koncentrace CO₂, které probíhalo stejným způsobem jako v předchozím případě, s tím rozdílem, že okna, až na jednu výjimku nebyla otevírána. Měření probíhalo dva týdny, kdy první týden byla jednotka v manuálním režimu a ovládání větrací jednotky bylo zcela v kompetenci vyučujícího, který mohl podle uvážení měnit průtok ve

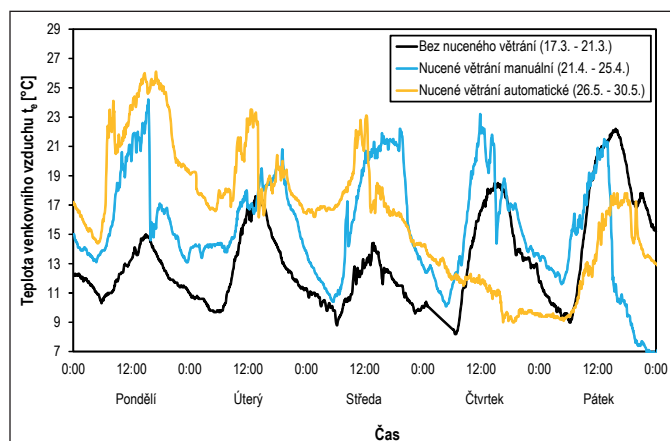
třech stupních. Druhý týden bylo ovládání automatické, kdy chod jednotky byl řízen podle koncentrace CO₂ v odváděném vzduchu s nastavenou diferencí 150 ppm. Při dosažení koncentrace CO₂ 1500 ppm, se jednotka automaticky uvedla do chodu, jakmile koncentrace CO₂ dosáhla hodnoty 1350 ppm, došlo k vypnutí jednotky. Obě měření a to jak v manuálním, tak v automatickém režimu probíhala při druhém stupni otáček ventilátoru. Třetí stupeň otáček byl využíván jen zřídka z důvodu vysoké hluchnosti (viz dále). Vyučující o některých přestávkách nastavil třetí stupeň otáček ventilátoru, tak aby třídu vyvětral před další hodinou. Výsledky měření při obou režimech jsou uvedeny na obr. 8, kde je dobře patrné porovnání s původním stavem. Maximální koncentrace CO₂ dosahovala při manuálním provozu větrání 2507 ppm a při automatickém provozu 1850 ppm. Průměrné hodnoty při době vyučování byly 1161 ppm resp. 1067 ppm.



Obr. 7 Porovnání měření CO₂ čidlem Vaisala MI70 a Wöhler CDL 210



Obr. 8 Porovnání naměřených koncentrací CO₂ při různých režimech větrání



Obr. 9 Teploty venkovního vzduchu při měření

Bohužel měření v učebně s nuceným větráním probíhalo v květnu, kdy teplota venkovního vzduchu dosahovala již poměrně vysokých hodnot (obr. 9). V takových případech vyučující přepnul jednotku do letního provozu a vzduch byl do učebny pouze přiváděn, aby přiváděný vzduch nebyl ohříván v rekuperačním výměníku ZZT. Ve středu při automatickém režimu došlo k překročení teploty vzduchu nad 27 °C, kdy byl vyučující nucen otevřít okna, aby ve třídě zajistil pozornost žáků. Z grafu je patrné udržení koncentrace CO₂ pod hodnotou 1500 při automatickém režimu po většinu týdne.

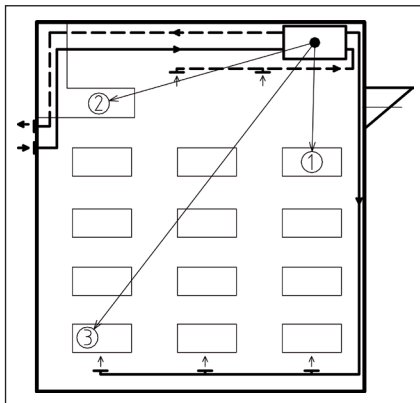
Subjektivní hodnocení prostředí

Na závěr měření byl proveden krátký průzkum přímo s dětmi ve třídě, který se týkal jejich subjektivního hodnocení vnitřního prostředí. Téměř všechny děti uvedly, že po instalaci větrací jednotky mají pocit, že prostředí je „příjemnější“. Na dotaz, zdali zaznamenal vyučující rozdíl mezi obdobím před a po realizaci nuceného větrání bylo odpovězeno, že se děti cítí lépe, problémy registroval při vysokých teplotách vnitřního vzduchu nad 27 °C, kdy si děti začínají stěžovat na únavu a „dusno“.

HLUK

Vzhledem k tomu, že větrací jednotka byla umístěna přímo v prostorách třídy, bylo přistoupeno rovněž k měření hlukových parametrů. Vybraná kontrolní místa jsou znázorněna na obr. 10. Jedná se o nejbližší místo sedícího žáka (1), místo vyučujícího (2) a nejvzdálenější lavice (3). U místa (3) bylo měřeno 1 m od obvodové konstrukce, z důvodu možného odrazu akustických vln. Výška měření nad podlahou byla vybrána 1,16 m (0,7 m nad úrovní židle), která přibližně odpovídá poloze hlavy sedícího žáka.

Naměřené hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{pA,eq}$ jsou uvedeny v tab. 4. Zdrojem hluku je větrací jednotka a hluk se šíří do prostoru jednak pláštěm jednotky, ale i vzduchovodem (výústkami). Jelikož se jedná o zdroj hluku s ustáleným provozem, bylo pro jednotlivá měření využito krátkého časového intervalu. Měření probíhalo v třetinooktávovém pásmu v rozsahu 6,3 Hz až 20 kHz. Pro zabránění šíření hluku vzduchovodem jsou použity ohebné hadice s útlumem hluku (tlumiče hluku nejsou použity).



Obr. 10 Schéma měřících bodů pro měření hluku

Výsledné hladiny akustického tlaku a jejich vysoké hodnoty zejména při 3. stupni otáček vedly k doporučení využívat během vyučování otáček prvního a druhého stupně. Při třetím stupni byl hluk rušícím faktorem výukového procesu. Podle Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. [2] má být hladina akustického tlaku v učebnách max. 45 dB (A), norma ČSN EN 15251 [4] pak uvádí doporučené hodnoty 30 až 40 dB (A).

Tab. 4 Výsledné ekvivalentní hladiny akustického tlaku A

Měřicí místo	1			2			3		
Vzdálenost od jednotky [m]	3,5			4			9		
Stupeň otáček ventilátoru	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$L_{pA,eq}$ [dB]	52	56	66	54	57	65	51	60	64

Nutno poznamenat, že veškeré rozvody vzduchotechniky vč. jednotky nejsou zakryty, právě z důvodu probíhajících měření. Vzhledem k relativně vysokým hodnotám hladin akustického tlaku bude, podle informace realizační firmy, přistoupeno k zakrytí jednotky a rozvodů sádkarotonovou konstrukcí.

ZÁVĚR

Prezentované výsledky měření potvrzují špatné zkušenosti s výměnou oken z hlediska vnitřního prostředí učeben a nutnost řešit větrání školských zařízení (viz rovněž [5]). Učebny jsou specifickým prostorem, ve kterém, při nedostatečném větrání, dochází k poměrně rychlému nárůstu koncentrace oxidu uhličitého na vysoké hodnoty ve chvíli, kdy do prostoru vstoupí žáci. Koncentrace CO₂ v průběhu vyučování v prostoru zpravidla roste a dosahuje hodnot, které mohou vést k problémům. Nutno připomenout, že CO₂ není jedinou znečišťující látkou v prostoru, nicméně dobře vypovídá o kvalitě vnitřního vzduchu a větrání. Mnohem závažnějším problémem může být např. výskyt radonu [6], zejména ve starších budovách, kdy protiradonová ochrana je nedostatečná.

Je jisté, že problémy s větráním nastávají hlavně v zimních měsících, kdy nízké teploty venkovního vzduchu vedou k omezení přirozeného větrání okny z důvodu možného vzniku tepelného diskomfortu. Bohužel realizovaná měření s nuceným větráním učebny probíhala v relativně teplém měsíci, kdy již není problémem použít trvalé větrání okny. Měření stavu vnitřního prostředí bude tak pokračovat i v nadcházejícím zimním období.

Nucené větrání je jedním ze způsobů jak uvedenou problematiku řešit. Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že koncentrace CO₂ se výrazně snížily a dosahují přijatelných hodnot. Na druhou stranu systémy nuceného větrání s sebou přinášejí problém investičního charakteru a určité provozní náklady, proto je nutné na větrání myslet od počátku případné rekonstrukce. Potřebě energie na větrání škol a s tím spojenými náklady se bude věnovat další příspěvek na toto téma.

Kontakt na autora: marek.begeni@fs.cvut.cz

Poděkování: Měření bylo realizováno za podpory společnosti Multi-Vac spol. s.r.o., která dodala a nainstalovala větrací jednotku do třídy základní školy na vlastní náklady.

Použité zdroje:

- [1] Nařízení vlády č. 93/2012 Sb. Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb.
- [2] Nařízení č. 272/2011 Sb. Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.
- [3] Vyhláška č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých.
- [4] ČSN EN 15251. *Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky*. Praha: ÚNMZ, 2011. Třídící znak 127028.
- [5] JINDRÁK, M. Větrání ve školách – požadavky a realita. *Tepelná ochrana budov*. 2013, roč. 16, č. 3, s. 20-24. ISSN 1213-0907.
- [6] JIRÁNEK, M. Vliv energetických sanací na koncentraci radonu v domě. *Radon bulletin*. Prosinec 2013.
- [7] ZMRHAL, V. Znečišťující látky z vnitřního prostředí. In: *Větrání škol – sborník přednášek*. 2013.
- [8] ZMRHAL, V. Větrání do škol. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, roč. 23, č. 3, s. 148-149. ISSN 1210-1389.
- [9] Český statistický úřad [online]. Dostupné z: http://www.czso.cz/csu/dyn-grafy.nsf/graf/cr_od_roku_1989_skoly
- [10] Multi-Vac spol. s.r.o. *Firemní podklady společnosti*.