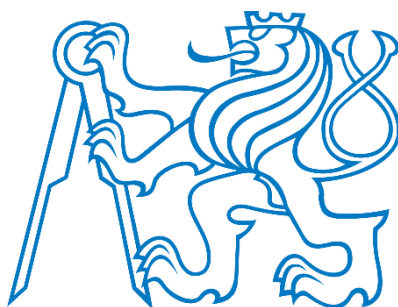


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



VĚTRÁNÍ REKONSTRUOVANÉ ŠKOLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Jan Hejlek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

2017/2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hejlek Jméno: Jan Osobní číslo: 468398
Zadávací katedra: Katedra technických zařízení budov
Studijní program: Budovy a prostředí
Studijní obor: Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Větrání rekonstruované školy

Název diplomové práce anglicky: Ventilation of refurbished schools.

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte prováděcí projekt systému větrání školy, která je rekonstruována. Navrhněte systém větrání s ohledem na možnosti budovy tak, aby byla zajištěna kvalita vzduchu ve třídách a kabinetech. V rámci projektu navrhněte jednotlivé části systému, zpracujte výkresovou dokumentaci, technickou zprávu i výpis materiálů.

V rozšiřující části zpracujte rešerši studií v nichž byla posuzována různá řešení větrání učeben, zpracujte přehled těchto řešení pro renovace školních budov. Zjištěné závěry uplatněte při analýze stavu předmětné školy.

Seznam doporučené literatury:

Zhang, X., Wagrocki, P., Lian, Z., Thyregod, C. Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. In: Indoor Air, 2007, 27, s. 47-64.

Stranger, M., Potgieter-Vermaak, S. S. Van Grieken, R. Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. In: Indoor Air, 2008, 18, s. 454-463.

Jméno vedoucího diplomové práce: Daniel Adamovský

Datum zadání diplomové práce: 10.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

10.10.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 7.1.2018



.....
podpis autora
Jan Hejlek

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval Ing. Danielu Adamovskému, Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

V Praze dne 7.1.2018

Obsah

Abstrakt	7
A TEORETICKÁ ČÁST.....	8
A.1 Úvod.....	8
A.2 Kvalita vnitřního prostředí ve školách.....	9
A.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí	10
A.2.1.1 Tepelně-vlhkostní mikroklima.....	10
A.2.1.2 Kvalita vnitřního vzduchu.....	13
A.2.1.3 Akustické mikroklima	17
A.2.2 Nejvýznamnější škodliviny v ovzduší školních prostor.....	17
A.2.2.1 Škodliviny pocházející z venkovního ovzduší	17
A.2.2.2 Škodliviny pocházející z vnitřního prostředí.....	23
A.2.3 Souvislost mezi kvalitou vnitřního prostředí, zdravím a produktivitou žáků.....	27
A.3 Větrání škol.....	28
A.3.2 Legislativní požadavky na větrání škol	28
A.3.3 Systémy větrání pro vzdělávací zařízení	30
A.3.3.1 Návrh větracího systému	30
A.3.3.2 Přehled větracích systémů	31
A.3.4 Příklady řešení větracích systémů u rekonstruovaných škol	42
A.3.4.1 Základní škola Slivenec (Česká republika)	42
A.3.4.2 Základní škola v Kostelní Lhotě (Česká republika).....	43
A.3.4.3 Základní škola St. Leonhard (Rakousko).....	45
A.3.4.4 Základní škola Höttinger, Innsbruck (Rakousko)	46
A.3.4.5 Gymnázium Stuttgart (Německo)	48
B EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	50
B.1 Experimentální měření kvality vzduchu ve třídě.....	51
B.1.2 Popis třídy	51
B.1.3 Popis měření	53
B.1.3.1 Měřicí technika.....	53
B.1.4 Výsledky měření.....	53
B.1.5 Závěr měření.....	60
Závěr..	63
Seznam použitých zdrojů	64
Seznam obrázků a tabulek.....	69
Seznam příloh a výkresů	71

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je popis faktorů ovlivňujících kvalitu vnitřního vzduchu ve školách s návazností na možné použití větracích systémů u rekonstruovaných škol. Teoretická část podrobněji popisuje škodlivé látky ve vzduchu pocházející jak z venkovního, tak i z vnitřního prostředí a jejich vliv na zdraví a produktivitu žáků. V rámci práce bylo provedeno experimentální měření kvality vzduchu prováděné v třídě řešené základní školy. Získané poznatky byly použity při zpracování prováděcí projektové dokumentace systému nuceného větrání pro základní školy v Kostelci na Hané.

Klíčová slova

Kvalita vnitřního vzduchu, rekonstruovaná škola, nucené větrání, vzduchotechnika

Abstract

An aim of this Master's thesis is a description of factors influencing the indoor air quality in schools linked to the possible use of ventilation systems in reconstructed schools. The theoretical part describes in detail pollutants coming from both the outdoor and the indoor environment and their influence on the health and productivity of the pupils. This part ends with an experimental measurement of air quality carried out in the classroom. In the practical part of this thesis a detailed design documentation of the ventilation system in the reconstructed elementary school was designed.

Key words

Indoor air quality, reconstructed school, forced ventilation, air conditioning



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA
TECHNICKÝCH
ZAŘÍZENÍ
BUDOV

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

VĚTRÁNÍ REKONSTRUOVANÉ ŠKOLY

A TEORETICKÁ ČÁST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Bc. Jan Hejlek

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

PRAHA 2017/2018

A.1 Úvod

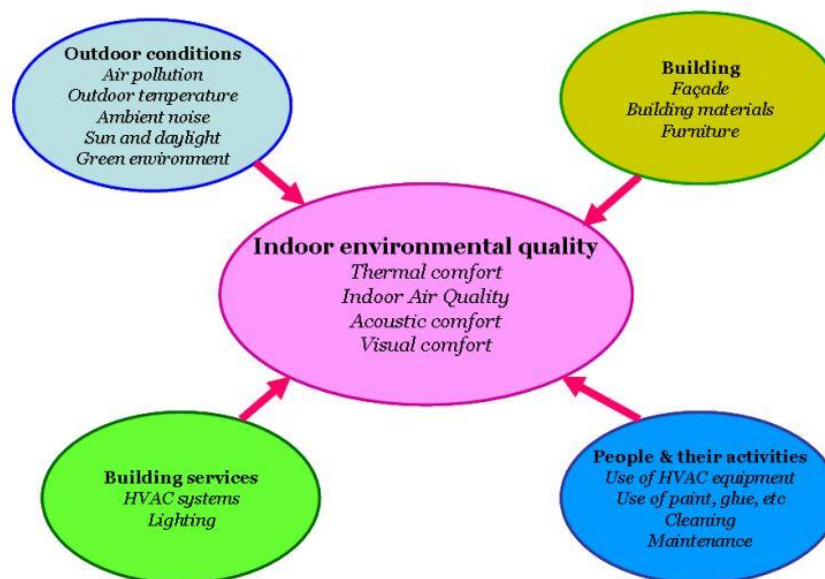
Poskytování kvalitního vzdělávání by mělo být základem každé vyspělé společnosti, a to, že by výuka měla probíhat v co nejpříznivějším prostředí, by mělo být chápáno jako samozřejmost. Příznivé prostředí můžeme charakterizovat jako stav, kdy člověk, který v tomto prostředí provádí činnosti k tomu určené, není tímto prostředím nijak omezován a v ideálním případě by jej neměl vnímat. Faktory ovlivňující toto prostředí jsou vzájemně provázány a je nutné, aby požadavky na kvalitu vnitřního prostředí splňoval každý z nich.

Vlně opatření, která má za úkol snížit energetickou náročnost budov, se nevyhnula ani školská zařízení. Tohoto bylo dosaženo hlavně zateplováním obvodových konstrukcí a výměnou starých oken za nová s lepšími tepelně-technickými vlastnostmi. V ideálním případě by těmto opatřením měla předcházet úvaha, zdali nedojde ke zhoršení kvality vnitřního prostředí. To, že se tomu tak ve velké většině případů neděje, potvrzuje i práce (Zachoval, 2016), zkoumající souvislost mezi výměnou oken a změnou parametrů vnitřního prostředí.

Hlavním cílem teoretické části diplomové práce je popis problémů souvisejících s vnitřním prostředím rekonstruovaných škol a zpracování přehledu různých řešení větrání učeben. Praktická část se zabývá experimentálním měřením parametrů ovzduší ve třídě základní školy a zpracováním prováděcího projektu systému větrání školy, která je rekonstruována.

A.2 Kvalita vnitřního prostředí ve školách

Lidé ve vyspělých zemích tráví podstatnou část dne uvnitř budov (Schweizer et al., 2007). To se týká i žáků a studentů, u kterých se čas strávený uvnitř vzdělávacích zařízení pohybuje mezi 4 až 12 hodinami denně. Je proto nutné, aby tyto prostory splňovaly požadavky na kvalitu vnitřního prostředí (IEQ – z angl. Indoor Environmental Quality), která je definována hodnotami fyzikálních, chemických a biologických ukazatelů, jejichž společný účinek definuje teplotní komfort, kvalitu vnitřního vzduchu, akustický komfort a kvalitu osvětlení. Kvalita vnitřního prostředí škol je ovlivněna venkovními podmínkami, materiálovou charakteristikou budovy, technickými systémy a v neposlední řadě lidmi a aktivitami, které jsou v budově vykonávány (d'Ambrosio Alfano et al., 2010).



Obr. 1 Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí (d'Ambrosio Alfano et al., 2010)

A.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí

Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí jsou znázorněny na následujícím grafu.

FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ



Obr. 2 Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí

Následující kapitoly budou věnovány především tepelně-vlhkostnímu mikroklimatu a kvalitě vnitřního vzduchu. Okrajově bude zmíněno také akustické mikroklima, jakožto složka vnitřního prostředí, která může být přímo ovlivněna opatřeními majícími za cíl zlepšit kvalitu vnitřního prostředí. Světelné mikroklima, i přes svoji nespornou důležitost, není předmětem řešení této práce.

A.2.1.1 Tepelně-vlhkostní mikroklima

Tepelně-vlhkostní mikroklima je složka vnitřního ovzduší tvořena třemi navzájem se ovlivňujícími faktory – teplotou, relativní vlhkostí a rychlostí proudění vzduchu (Mathauserová, 2007). Vzájemné působení těchto veličin definuje tzv. tepelnou pohodu, což je jeden ze základních faktorů hodnocení kvality vnitřního prostředí. Podle Cihelky et al. (1975) tepelná pohoda znamená, že je dosaženo takových tepelných poměrů, kdy člověku není ani chladno, ani příliš teplo — člověk se cítí příjemně.

Tepelnou pohodu ovlivňují následující parametry stavu prostředí:

- teplota vzduchu t_a ,
- střední radiační teplota t_r ,
- rychlost proudění vzduchu w ,
- intenzita turbulence T_u ,
- relativní vlhkost vzduchu φ ,
- měrný energetický výdej q_m ,
- tepelný odpor oděvu I_{od} ,

a další faktory, jako je pohlaví nebo stáří člověka (Zmrhal et al., 2017)

Teplota vzduchu t_a [°C] je teplota vnitřního vzduchu bez vlivu sálání z okolních povrchů. Optimální teplota vzduchu v učebnách by měla být 22 ± 2 °C a v letních měsících by neměla přesáhnout 28 °C (viz tab.1).

Střední radiační teplota t_r [°C] je myšlená rovnoměrná teplota všech ploch v prostoru, při níž by byl přenos tepla z těla sáláním stejný, jako ve skutečnosti.

Operativní teplota t_o [°C] zahrnuje společný vliv teploty vzduchu t_a , střední radiační teploty t_r a rychlosti proudění vzduchu w . Pro $w < 0,2$ m.s⁻¹ se vliv rychlosti proudění zanedbává a operativní teplotu lze stanovit jako aritmetický průměr t_a a t_r .

$$t_o = \frac{t_a + t_r}{2} \text{ [°C]}$$

kde je:

t_a je teplota vzduchu [°C]

t_r je střední radiační teplota [°C]

Rychlost proudění vzduchu w [m.s⁻¹] by se v učebnách měla pohybovat mezi 0,1-0,2 m.s⁻¹. Rychlost proudění ovlivňuje přenos tepla prouděním a odpařování vlhkosti z pokožky. Při vyšších rychlostech může způsobovat pocit průvanu.

Relativní vlhkost vzduchu φ [%] udává nasycení vzduchu vodní parou. V učebnách by se relativní vlhkost měla pohybovat v rozmezí 30-65 %.

Měrný energetický výdej [W/m²] [met] závisí na intenzitě fyzické činnosti člověka (viz tab. 2)

Tepelný odpor oděvu $I_{od} = 1$ clo odpovídá tepelnému odporu $R = 0,155$ m²K/W.

Tab. 1 Požadavky na tepelný stav prostředí podle vyhlášky č. 465/2016 Sb.

Prostor	Výsledná teplota t_g [°C]			Rychlost proudění w [m/s]	Relativní vlhkost φ [%]
	min.	opt.	max.		
Učebny, pracovní	20	22 ± 2	28	0,1 až 0,2	30 až 35
Tělocvičny	18	22 ± 2	28		
Šatny	20	22 ± 2	28		
Záchody	18	-	-		
Chodby	18	-	-		
Sprchy	24	-	-	-	-

Tab. 2 Energetický výdej pro různé lidské činnosti ve školách (Zmrhal, 2017)

Lidská činnost	Prostory	M [met]	q_m [W/m ²]
Sezení uvolněné	zasedací místnosti	1	58
Činnost vsedě	učebny, jídelny	1,2	70
Lehká činnost vstoje	laboratoře	1,6	93
Chůze bez zátěže	chodby	1,9	110
Tělocvik	tělocvičny	3 - 4	174 - 232

A.2.1.2 Kvalita vnitřního vzduchu

Pokud se budeme soustředit na problematiku zhoršení stavu vnitřního prostředí po rekonstrukci, která měla za cíl snížit energetickou náročnost budovy, nejvíce zasaženou oblastí bude kvalita vnitřního vzduchu (IAQ – z angl. Indoor Air Quality). Tato energetická opatření totiž souvisí i s omezením přirozeného provětrávání budovy, což může mít za následek nedostatečný přísun čerstvého vzduchu a s tím spojené zvyšování koncentrace škodlivých látek, zvyšování relativní vlhkosti a teploty vzduchu (Földváry et al., 2017; Wells et al., 2015; Nabinger a Persily, 2011).

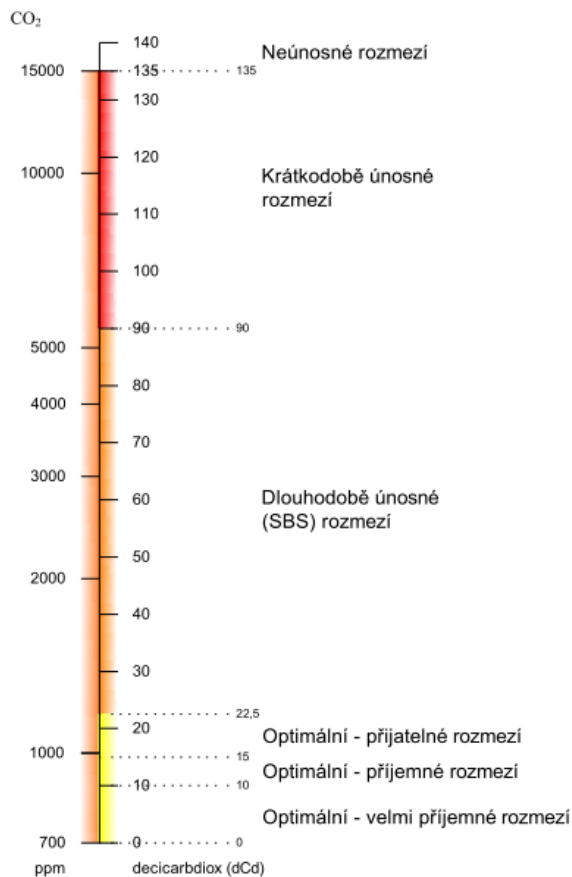
Přijatelná kvalita vzduchu může být definována jako „vzduch, ve kterém nejsou známy kontaminující látky ve škodlivých koncentracích, které určují příslušné orgány a s nimiž podstatná většina (80 % nebo více) vystavených lidí nevyjadřuje nespokojenost“ (ASHRAE, 2010).

A.2.1.2.1 Odérové mikroklima

Odérové látky (odéry) jsou plynné látky v ovzduší, které vnímáme jako vůně nebo zápachy. Odérové látky vstupují do interiéru z venku nebo vznikají přímo uvnitř budovy (činností člověka, uvolňováním ze stavebních materiálů).

50 až 80 % odérových látek pochází z venkovního prostředí. Jedná se zejména o produkty spalovacích motorů (oxidy dusíku a síry, CO a jejich sloučeniny), produkty z výrobních procesů průmyslových závodů a spaliny z tepláren, kotelen a lokálních topenišť (Jokl, 1991).

Jako měřítko kvality vzduchu se v prostorách, kde jsou zdrojem odérových látek lidé, nejčastěji používá koncentrace CO₂ ve vzduchu, která by podle Pettenkoferova kritéria neměla přesahovat 0,10 % CO₂, což odpovídá 25 m³.h⁻¹ čerstvého vzduchu na osobu (Doležilková, 2010).



Obr. 3 Stupnice oděrových hladin koncentrací CO₂ (Jokl, 1991)

Odéry nejsou sami o sobě považovány za toxické, ale při vyšších koncentracích mohou způsobovat snížení výkonnosti a ztrátu pozornosti.

A.2.1.2.2 Aerosolové mikroklima

Aerosolové mikroklima je důležitou složkou vnitřního prostředí spoluvytvářející celkový stav člověka. Je tvořeno pevnými aerosoly (prach) a kapalnými aerosoly, od velikosti cca 0,8 μm.

Pevné aerosoly mohou vznikat jak činností člověka (opracování pevných materiálů, spalování různých organických látek), tak při oxidaci anorganických látek.

Základní dělení prachu je podle původu na organický, anorganický a smíšený. Speciálním druhem pevného aerosolu je **azbestový prach**, což je látka, která při inhalaci představuje potenciální zdravotní riziko (Skácel et al., 2012).

Kapalné aerosoly vznikají nejčastěji při kondenzaci vodní páry při poklesu pokojové teploty pod rosný bod, nebo v různých průmyslových závodech při provádění některých druhů postřiku.

A.2.1.2.3 Mikrobiální mikroklima

Mikrobiální mikroklima je tvořeno mikroby neboli mikroorganismy nacházející se v ovzduší – aeromikroby. Hlavními zástupci mikrobů jsou bakterie, plísňe a jejich spóry, endotoxiny a mykotoxiny a antigeny od 0,1 do 100 μm (Jokl, 1991).

Zdroje mikroorganismů nacházejících se ve vnitřním prostředí:

- venkovní ovzduší jako zdroj mikroorganismů
- vzduchotechnická zařízení jako zdroj mikroorganismů
- člověk jako zdroj mikroorganismů
- stavební konstrukce jako zdroj mikroorganismů

Z **venkovního ovzduší** mohou vstupovat mikroorganismy do interiéru jednak přímo, jednak na aerosolu, jenž je jejich nositelem.

Tab. 3 Výskyt a koncentrace mikrobů v ovzduší

Místo	Počet mikrobů v 1 m ³ ovzduší
volná krajina	150-300
vesnice	250
malé město	400
velkoměsto	1000-1500
interiér budovy	200-900

Obzvláště nebezpečné jsou tyčinkové bakterie Legionelly nesené kapalnými aerosoly z chladících věží nebo klimatizačních zařízení.

Vzduchotechnická zařízení mohou být intenzivním zdrojem mikroorganismů zejména v případě zanedbání údržby a pravidelného čištění filtrů. Dalšími zdroji mohou být zařízení sloužící ke zvlhčování a odvlhčování vzduchu a vzduchovody.

Člověk může být buďto přímým zdrojem mikroorganismů (respirabilní viry) nebo nepřímo prostřednictvím aerosolových částic. Mikroorganismy, které se do ovzduší

dostávají při hovoru, kašlání nebo kýčání jsou nesený kapalnými aerosoly a nesesedimentují.

Stavební konstrukce jsou především zdrojem plísní a jejich sporů. Hlavním předpokladem pro růst plísní je zvýšená vlhkost (plísně začínají růst již při relativní vlhkosti 80 %).

A.2.1.2.4 Toxické mikroklima

Toxické mikroklima je tvořeno tokem plynných toxických látek v ovzduší, které působí na člověka a vytváří tak jeho celkový stav (Jokl, 1991). Toxické plyny mohou být organické i anorganické a mohou vznikat buďto v interiéru (v důsledku činnosti člověka nebo uvolňováním ze stavebních materiálů a vnitřního vybavení), nebo mohou do interiéru vstupovat z venkovního prostředí. Toxickými mohou být ve vysokých koncentracích i oděrové látky, a naopak některé toxické látky mohou být zcela bez zápachu (např. oxid uhelnatý) (Hirš a Gebauer, 2005).

Mezi hlavní toxické plyny přicházející z **exteriéru** patří:

- oxid uhelnatý CO
- oxid síry SO₂ a SO₃
- oxid dusíku NO_x
- ozon
- smog

Mezi hlavní toxické plyny vznikající v **interiéru** patří:

- oxid uhelnatý
- oxidy dusíku NO_x
- ozón
- uhlovodíky
- formaldehyd
- těkavé organické látky VOC (z angl. volatile organic compounds)

Nejvýznamnější toxické látky z hlediska dopadu na zdraví budou podrobněji popsány v samostatné kapitole.

A.2.1.3 Akustické mikroklima

Zvuk je doprovodným jevem provozu řady technických zařízení a technologických procesů a není tomu jinak ani u zařízení, které mají za úkol zlepšení kvality vnitřního prostředí. Pokud je za účelem zlepšení parametrů vnitřního vzduchu instalováno vzduchotechnické zařízení, může právě ono být nejvýznamnějším zdrojem hluku v uvažovaných prostorách.

Hlavním zdrojem hluku ve vzduchotechnických systémech je ventilátor. Jeho hluk se šíří vzduchotechnickým potrubím jak do interiéru, tak do exteriéru, přičemž se uplatní způsoby šíření volným a uzavřeným prostorem i stavebními konstrukcemi (Hirš a Gebauer, 2005). Vedlejším zdrojem hluku může být samotné vzduchotechnické potrubí, regulační prvky a distribuční elementy.

Základní metodou pro řešení problémů s hlukem pocházejícího ze vzduchotechnických zařízení je instalace tlumičů hluku a důkladný návrh distribučních elementů.

Závazným legislativním předpisem pro posuzování hluku v prostorách škol je nařízení vlády č. 217/2016 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, které říká, že větrací zařízení musí být navrženo tak, aby hladina akustického tlaku A v učebně při jeho provozu nepřevyšovala limitní hodnotu 45 dB. Norma ČSN EN 15 251 také doporučuje, aby hladina akustického tlaku A v učebnách byla v rozmezí 30-40 dB.

A.2.2 Nejvýznamnější škodliviny v ovzduší školních prostor

A.2.2.1 Škodliviny pocházející z venkovního ovzduší

Mezi hlavní zdroje škodlivin z venkovního ovzduší patří doprava, průmysl a domácí topeniště. Maximální přípustné množství těchto látek v ovzduší je dáno zákonem 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, který také definuje pojem znečišťující látka jako každou látku, která svojí přítomností v ovzduší má nebo může mít škodlivé účinky na lidské zdraví nebo životní prostředí anebo obtěžuje zápachem.

Tab. 4 Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] LV	Maximální počet překročení za rok
Oxid siřičitý SO ₂	1 hodina	350	24
	24 hodin	125	3
Oxid dusičitý NO ₂	1 hodina	200	18
	kalendářní rok	40	0
Částice PM ₁₀	24 hodin	50	35
	kalendářní rok	40	0
Částice PM _{2,5}	kalendářní rok	25	0
Olovo Pb	kalendářní rok	0,5	0
Oxid uhelnatý CO	maximální denní 8hod. klouzavý průměr	10 000	0
Benzen	kalendářní rok	5	0

A.2.2.1.1 Oxid uhelnatý CO

Oxid uhelnatý je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, není dráždivý a je lehčí než vzduch. Přírodní koncentrace ve vzduchu se pohybují v rozmezí 50 - 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vzduchu, v místech s hustou dopravou mohou krátkodobé koncentrace přesahovat desítky mg/m^3 . Toxicita CO je dána tím, že znemožňuje/omezuje přeno kyslíku z plic do tkání.

Hlavními zdroji oxidu uhelnatého ve venkovním prostředí jsou procesy založené na spalování uhlíkatých paliv za nízké teploty a nedostatku spalovacího vzduchu, kdy nedochází k úplné oxidaci uhlovodíků na oxid uhličitý a vodní páru. Důležitou roli hrají emise z motorů s vnitřním spalováním, které produkují až 95 % oxidu uhelnatého ve městech (Integrovaný registr znečišťování, 2002). Dalšími potenciálními zdroji jsou průmyslové závody (hutní průmysl, výroba koku) a stacionární spalovací zdroje tepla.

A.2.2.1.2 Oxid siřičitý SO₂

Oxid siřičitý je bezbarvý reaktivní dráždivý plyn, snadno rozpustný ve vodě. Zdrojem emisí do ovzduší je zejména spalování fosilních paliv, jak při průmyslových procesech, tak v domácích topeništích.

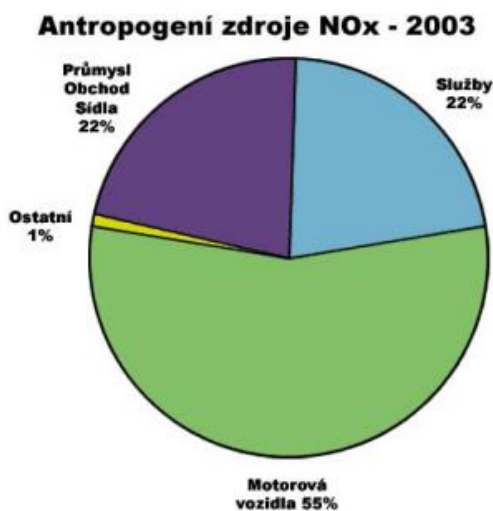
Oxid siřičitý může způsobovat širokou škálu negativních dopadů, jak na životní prostředí, tak na člověka. Fotochemickou nebo katalytickou reakcí přechází oxid siřičitý na oxid sírový, který je následně hydratován vzdušnou vlhkostí na aerosol kyseliny sírové. Tímto může docházet k okyselování srážkových vod, což společně s dalšími látkami tvoří tzv. kyselé deště (Integrovaný registr znečišťování, 2002).

Oxid siřičitý při běžných koncentracích dráždí oči a horní cesty dýchací, při opakovaných expozicích způsobuje bolesti hlavy, nevolnosti a závratě. Při vyšších koncentracích dochází ke zvýšení respirační nemocnosti u citlivých dospělých a dětí.

A.2.2.1.3 Oxidy dusíku NO_x/NO₂

Mezi nejběžnější oxidy dusíku patří oxid dusnatý (NO, bezbarvý plyn bez zápachu) a oxid dusičitý (NO₂, červenohnědý plyn štiplavého zápachu).

Emise oxidů dusíku jsou produkovány především při spalovacích procesech. Primárním zdrojem vytvářejících až 55 % antropogenních NO_x jsou motorová vozidla, kde při vysokoteplotním hoření dochází k oxidaci vzdušného dusíku na tzv. vysokoteplotní NO_x. Oxidy dusíku vznikají také přirozeně při biologických procesech v půdách.



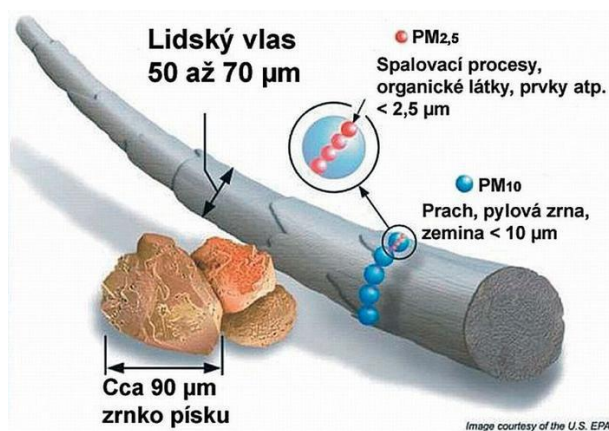
Obr. 4 Antropogenní zdroje NO_x (Integrovaný registr znečišťování, 2002)

Společně s kyslíkem a těkavými organickými látkami přispívá oxid dusičitý k tvorbě přízemního ozonu a vzniku tzv. fotochemického smogu.

Oxidy dusíku mají přímý vliv na zdraví člověka až při vyšších koncentracích, kdy dráždí sliznice a dýchací cesty.

A.2.2.1.4 Částice PM₁₀ a PM_{2,5}

Polévatý prach (PM z angl. particulate matter) je pojem pro mikročástice o velikosti několika mikrometrů. Částice PM₁₀ mají velikost menší než 10 μm a obdobně částice PM_{2,5} mají velikost menší než 2,5 μm.



Obr. 5 Ilustrace znázorňující velikost částic polévatého prachu (American lung association, 2017)

Polévatý prach může být přirozeného i antropogenního původu. Z přírodních zdrojů se jedná hlavně o výbuchy sopek, lesní požáry a prach unášený větrem. Velikost těchto částic je přibližně 10 μm. Mezi nejvýznamnější antropogenní zdroje polévatého prachu patří vysokoteplotní spalovací procesy (motory automobilů, tavení rud a kovů nebo svařování), odnos částic větrem ze stavebních ploch a ploch zbavených vegetace. Tyto procesy produkují částice o velikosti kolem 20 nm.

Částice polévatého prachu se usazují v dýchacích cestách a místo záchytu závisí především na velikosti částice. Větší částice jsou většinou zachyceny již na nosní sliznici a nezpůsobují větší potíže. Částice menší než 10 μm (PM₁₀) se mohou usazovat v průduškách a způsobovat zdravotní problémy. Částice menší než 2,5 μm (PM_{2,5}) mohou vstupovat až do plicních sklípků, což je velmi nebezpečné z hlediska koncentrací

těžkých kovů (olovo, arzen, kadmium, nikl) a benzo[a]pyrenu ve frakcích těchto částic. Dlouhodobé vystavení těmto látkám může mít na lidský organizmus karcinogenní účinky a poškozovat nervovou a oběhovou soustavu (WHO, 2013).

Tab. 5 Imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM₁₀ vyhlášené pro ochranu zdraví lidí

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit [μg.m ⁻³] LV
Arzen As	kalendářní rok	6
Kadmium Cd	kalendářní rok	5
Nikl Ni	kalendářní rok	20
Benzo[a]pyren	kalendářní rok	1

Mezi skupinu lidí, kteří jsou na zvýšené koncentrace poletavého prachu citliví nejvíc, patří děti. Vystavení polétavému prachu způsobuje akutní respirační onemocnění, astma a alergie (Grigg, 2012).

A.2.2.1.5 Benzen C₆H₆

Benzen je organická, sladce zapáchající sloučenina používaná jako rozpouštědlo a základní surovina pro výrobu řady dalších chemikálií.

Hlavním emisním zdrojem jsou výfukové plyny automobilů a činnosti spojené s tĕkáním benzínu (typické při tankování). Mezi další významné zdroje patří chemický průmysl, ropné a plynové rafinerie. Značné koncentrace benzenu obsahuje také cigaretový kouř.

Benzen vstupuje do lidského těla převážně inhalací. Částmi těla s nejvyšší koncentrací benzenu jsou orgány s vysokým zásobením krví (játra, ledviny), tkáň s vysokým obsahem tuků (mozek) a kostní dřeň. Při dlouhodobé expozici je poškozována centrální nervová soustava, imunitní systém a krevní tvorba. Může způsobit snížení počtu červených krvinek vedoucí až k anémii či leukémii (jde o prokázaný lidský karcinogen) (Janitz et al., 2017).

A.2.2.1.6 Radon

Radon je všudypřítomný přírodní radioaktivní plyn. Vzniká postupnou přeměnou uranu, který je v různých množstvích obsažen ve všech materiálech zemské kůry. Do budovy se radon nejčastěji dostává z podloží, odkud je vlivem podtlaku nasáván přes praskliny a netěsnosti v konstrukcích.

Radon se samovolně přeměňuje na radioaktivní atomy pevných prvků - ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi a ^{214}Po , které se ve vzduchu vyskytují jako volné ionty nebo zachycené na aerosolových částicích. Tyto částice jsou následně vdechovány, přičemž se některé usazují v průduškách a ostatní putují dále až do plic, kde se dále rozpadají na další prvky a ozařují okolní tkáň. Toto záření je podle mnoha studií považováno za příčinu vzniku rakoviny plic (Darby et al., 2005).

Koncentrace radonu uvnitř budov je legislativně omezena prováděcí vyhláškou č. 422/2016 Sb. zákona č. 263/2016 Sb. na hodnotu 300 Bq/m^3 , ovšem doporučená referenční úroveň podle WHO je 100 Bq/m^3 .

A.2.2.2 Škodliviny pocházející z vnitřního prostředí

Hlavními zdroji škodlivých látek ve vnitřním prostředí jsou jednak člověk, jednak stavební materiály a vybavení.

Tab. 6 Limitní hodinové koncentrace chemických látek a pevných částic ve vnitřním prostředí staveb

Ukazatelé	jednotka	limit
Oxid dusičitý NO ₂	μg.m ⁻³	100
Částice PM ₁₀	μg.m ⁻³	150
Částice PM _{2,5}	μg.m ⁻³	80
Oxid uhelnatý CO	μg.m ⁻³	5000
ozón	μg.m ⁻³	100
azbestová a minerální vlákna	počet vláken.m ⁻³	1000
amoniak	μg.m ⁻³	200
benzen	μg.m ⁻³	7
toluen	μg.m ⁻³	300
suma xylenu	μg.m ⁻³	200
styren	μg.m ⁻³	40
etylbenzen	μg.m ⁻³	200
formaldehyd	μg.m ⁻³	60
trichloretylen	μg.m ⁻³	150
tetrachloretylen	μg.m ⁻³	150

A.2.2.2.1 Oxid uhličitý CO₂

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn bez zápachu, jehož přirozeným zdrojem je dýchání aerobních organismů. Hlavním antropogenním zdrojem oxidu uhličitého je spalování fosilních uhlíkatých paliv.

Běžné venkovní koncentrace oxidu uhličitého se pohybují mezi 350 až 500 ppm, ve znečištěných oblastech to může být až 700 ppm. Koncentrace oxidu uhličitého ve vydechovaném vzduchu se pohybuje mezi 40 000 až 55 000 ppm (Zhang et al., 2016).

Koncentrace oxidu uhličitého ve vnitřním prostředí závisí především na míře obsazenosti, druhu vytápění a míře ventilace. Pro pobytové místnosti, je podle vyhlášky č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby, ve znění pozdějších předpisů, maximální přípustná koncentrace CO₂ 1500 ppm.

Oxid uhličitý se již od 19. století používá jako indikátor kvality vzduchu v budovách a jako ukazatel míry a kvality větrání (Zhang et al., 2016). Maximální přípustná koncentrace 0,1 % CO₂ (1000 ppm) v prostoru je podle tzv. Pettenkoferova kritéria používána pro výpočet množství přiváděného čerstvého vzduchu.

$$V_e = \frac{V_{vyd} \cdot C_{CO_2,vyd}}{C - C_p} = \frac{0,42 \cdot 0,04}{0,001 - 0,00035} = 25,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

kde je:

- V_{vyd} objem vydechovaného vzduchu pro osoby v bdělém stavu s mírnou fyzickou zátěží je 0,45 m³/h na osobu,
 $C_{CO_2,vyd}$ koncentrace CO₂ ve vydechovaném vzduchu 4,0 % (40 000 ppm),
 C doporučená maximální přípustná koncentrace CO₂ 0,15 % (1500 ppm),
 C_p koncentrace CO₂ ve venkovním vzduchu 0,035 % (350 ppm).

Koncentrace oxidu uhličitého je také často využívána jako proměnná pro automatickou regulaci větracích systémů, což má redukovat spotřebu elektrické energie ventilátory.

Zvýšené koncentrace oxidu uhličitého jsou často spojovány s příznaky jako ospalost, snižování pozornosti, letargie a bolest hlavy, avšak publikované toxikologické studie ukazují, že samotný oxid uhličitý je příčinou zdravotních problémů až při koncentracích nad 10 000 ppm (Guais et al., 2011). To, že samotný oxid uhličitý nemá v běžných koncentracích zásadní vliv na zdraví ani výkonnost, zkoumá také studie Zhanga et al. (2017b). Je tak zřejmé, že koncentrace oxidu uhličitého slouží především jako ukazatel míry znečištění vnitřního prostoru a kvality větrání.

A.2.2.2.2 Vlhkost a vodní zisky

Vysoká koncentrace vodní páry je navzdory jejímu přirozenému původu považována za škodlivinu (Zmrhal a Šťávová, 2011). Při nedostatečném větrání se zvyšuje relativní vlhkost φ [%], což ve spojení s povrchovými teplotami konstrukcí nižšími, než je teplota rosného bodu, může vést ke vzniku kondenzátu a s tím spojené vlhnutí konstrukcí. V takovém případě vzniká veliké riziko množení mikroorganismů a plísní.

Hlavními zdroji vodní páry ve vnitřním prostředí jsou lidé a činnosti, které v daném prostoru vykonávají. Produkce vodní páry a citelného tepla při typických činnostech ve školách jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Produkce tepla a vodní páry na 1 osobu pro různé druhy činnosti (při $t_a = t_r = 22^\circ\text{C}$, $I_{od} = 0,7 \text{ clo}$, $w = 0,1 \text{ m/s}$, 50% percentil) (Zmrhal et al., 2017)

Činnost	M [met]	Věk							
		6 let		10 let		15 let		18 let	
		Q_{cit} [W]	M_w [g/h]	Q_{cit} [W]	M_w [g/h]	Q_{cit} [W]	M_w [g/h]	Q_{cit} [W]	M_w [g/h]
Sezení uvolněné	1	41	11	57	14	83	19	91	20
Činnost vsedě	1,2	42	25	58	33	84	45	93	48
Lehká činnost vstoje	1,6	43	52	59	70	87	97	97	104
Chůze bez zátěže	1,9	44	73	61	98	89	136	99	147
Tělocvik	3 - 4	61	104	85	140	126	195	139	212

Relativní vlhkost v učebnách by se měla pohybovat mezi 30 až 65 %. Zejména v zimních měsících může vlivem suchého venkovního vzduchu docházet k poklesu relativní vlhkosti v interiéru pod 20 %, což může mít za následek zdravotní problémy spojené s vysycháním sliznic dýchacích cest, sníženou tvorbu hlenu a aktivitu řasinek na nosní sliznici, a tím celkově sníženou obranyschopnost organismu (Jokl, 2011; Derby a Pasch, 2017).

A.2.2.2.3 Těkavé organické látky VOC

Podle zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, je těkavou organickou látkou (VOC) jakákoli organická sloučenina nebo směs organických sloučenin, s výjimkou metanu, která při teplotě 20 °C má tlak par 0,01 kPa nebo více nebo má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití. Pro množství všech, ve vzduchu obsažených VOC, se používá zkratka TVOC (z angl. the Total of all Volatile Organic Compounds).

Hlavním zdrojem těkavých organických látek ve vnitřním prostředí jsou čisticí prostředky, spreje, nátěry, barvy, nevhodně skladované pohonné hmoty, rozpouštědla a lepidla, podlahové krytiny, cigaretový kouř apod.

Jelikož se jedná o velmi široké spektrum látek, tak i zdravotní dopady jsou různorodé. Jedním z nejběžnějších příznaků jsou podráždění očí a dýchacích cest, bolest hlavy, ztráta koordinace, poškození jater, ledvin a nervového systému.

A.2.2.2.4 Formaldehyd

Formaldehyd je přirozeně se vyskytující bezbarvý plyn s charakteristickým, velmi nepříjemným zápachem.

Do vnitřního ovzduší se formaldehyd uvolňuje hlavně z překližek, koberců, papírů, čisticích prostředků, izolačních materiálů, nábytku, textilií a prostředků na konzervaci dřeva.

Do těla se formaldehyd může dostávat inhalací nebo kontaktem s kůží a okem. Expozice malým dávkám formaldehydu vyvolává bolesti hlavy a zánět nosní sliznice. Vyšší koncentrace způsobují vážné podráždění sliznic a respirační problémy.

U citlivých jedinců může vyvolávat astma a vysušování kůže. Podle klasifikace EPA patří formaldehyd mezi pravděpodobné lidské karcinogeny. Patří také mezi látky mutagenní a vyvolává chromosomální změny plicních buněk (Integrovaný registr znečišťování, 2002).

A.2.3 Souvislost mezi kvalitou vnitřního prostředí, zdravím a produktivitou žáků

Vzhledem k nedokončenému vývoji imunitního a respiračního systému a vyššímu podílu potřeby kyslíku k tělesné hmotnosti jsou děti zranitelnější vůči škodlivým a znečišťujícím látkám v ovzduší. Mělo by proto být v našem nejlepším zájmu, aby byla kvalita vnitřního prostředí ve školách na co nejlepší úrovni. To, že tomu tak není, dokazuje i rozsáhlý celoevropský projekt SINPHONIE (2014), popisující znečištění vnitřního prostředí škol.

Podle Daisy et al. (2003) může špatná kvalita vnitřního prostředí vést ke zhoršení zdraví žáků, snížení jejich výkonnosti a také ke zvýšení absence. To dokázal ve své práci i Shendell et al. (2004), podle kterého nárůst koncentrace dCO_2 (rozdíl mezi vnitřní a vnější koncentrací) o 1000 ppm znamená zvýšení absence o 10-20 %. K podobným závěrům došel ve své studii i Mendell et al. (2013), který z výsledků měření na 28 Kalifornských školách v průběhu 2 let vyvodil závěr, že zvýšení dávky čerstvého vzduchu o $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ na osobu může vést ke snížení absencí až o 1,6 %.

Dalším cílem mnoha studií byla spojitost mezi špatnou kvalitou vnitřního prostředí, výkonností žáků a jejich akademickými výsledky.

Lineární závislost mezi objemem přiváděného čerstvého vzduchu (zkoumány byly dávky čerstvého vzduchu do $25 \text{ m}^3/\text{h}$ na osobu) a výsledky matematických a jazykových testů dokázal ve své práci Haverinen-Shaughnessy et al. (2010). Mendell a Heath (2005) z rozsáhlého přehledu studií zabývajících se touto problematikou vyvodili závěr, že špatná kvalita větrání je spojena, jak se zdravotními problémy, tak i s horšími studijními výsledky.

Stejně jako kvalita větrání je důležitá i vnitřní teplota vzduchu, což dokázali Wargocki a Wyon (2007). Pro potřeby experimentu nainstalovali do zkoumaného prostoru chladicí split jednotku a při postupném snižování teploty z $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na $20 \text{ }^\circ\text{C}$ vyhodnocovali výsledky matematických a jazykových testů. Ukázalo se, že snížení teploty, je spojeno s kratší dobou potřebnou pro vypracování testů. Stejného výsledku bylo také dosaženo při zvýšení dávky čerstvého vzduchu z $18 \text{ m}^3/\text{h}$ na $36 \text{ m}^3/\text{h}$ na žáka.

Výše uvedené studie jasně naznačují, že nejdůležitějším krokem ke zlepšení vnitřního prostředí ve školách je zajištění kvalitního větrání, čímž může být dosaženo nižší nemocnosti a lepších studijních výsledků.

A.3 Větrání škol

A.3.2 Legislativní požadavky na větrání škol

Základní požadavky na větrání škol jsou dány **vyhláškou č. 465/2016 Sb.**, kterou se mění vyhláška č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, ve znění vyhlášky č. 343/2009 Sb. Vyhláška stanovuje tyto požadavky na větrání:

- § 18 (1) *„Prostory zařízení pro výchovu a vzdělávání a provozoven pro výchovu a vzdělávání určených k pobytu musí být přímo větratelné. Požadavky na větrání čerstvým vzduchem (výměna vzduchu) v době využití interiéru jsou upraveny v příloze č. 3 k této vyhlášce“ (viz tab.8).*
- § 18 (4) *„Pokud venkovní stav prostředí neumožňuje využít přirozené větrání pro překročení přípustných hodnot škodlivin ve venkovním prostředí, musí být mikroklimatické podmínky a větrání čerstvým vzduchem zajištěny vzduchotechnickým zařízením“.*
- § 18 (5) *„Centrální šatny dětí a žáků bez přirozeného větrání musí být větrány nuceně podtlakově s výměnou vzduchu v souladu s požadavky upravenými v příloze č. 3 k této vyhlášce“ (viz tab.8).*
- § 18 (6) *„Přirozené větrání musí být v případě těsných oken zajištěno systémy mikroventilace nebo větracími štěrbinami“.*

Tab. 8 Množství přiváděného čerstvého vzduchu v učebnách, tělocvičnách, šatnách a hygienických zařízeních v zařízeních pro výchovu a vzdělávání a provozovnách pro výchovu a vzdělávání

Typ prostoru	Množství vzduchu [m ³ .h ⁻¹]
Učebny	20-30 na žáka
Tělocvičny	20-90 na žáka
Šatny	20 na žáka
Umývárny	30 na umyvadlo
Sprchy	150-200 na sprchu
Záchody	50 na kabinu, 25 na pisoár

Zmrhal et al. (2017) upozornil na to, že některá ustanovení v této vyhlášce jsou ve vzájemném rozporu. Jedná se především o § 18 (6) a požadavek množství vzduchu na žáka 20-30 m³/h. Mikroventilací ani větracími štěrbinami totiž nelze takový průtok zajistit.

Jelikož i školní prostory jsou považovány za prostory pobytové, vztahují se na ně požadavky **vyhlášky č. 323/2017 Sb.**, kterou se mění vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby, ve znění vyhlášky č. 20/2012 Sb. Požadavky na větrání jsou uvedeny v § 11 (5) takto:

„Pobytové místnosti musí mít zajištěno dostatečné přirozené nebo nucené větrání a musí být dostatečně vytápěny s možností regulace vnitřní teploty. Pro větrání pobytových místností musí být zajištěno v době pobytu osob minimální množství vyměňovaného venkovního vzduchu 25 m³/h na osobu, nebo minimální intenzita větrání 0,5 1/h. Jako ukazatel kvality vnitřního prostředí slouží oxid uhličitý CO₂, jehož koncentrace ve vnitřním vzduchu nesmí překročit hodnotu 1500 ppm“.

Výukové prostory jsou pro učitele pracovním prostorem, a je proto nutné brát v úvahu požadavky **nařízení vlády č. 93/2012 Sb.**, 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. Toto nařízení stanovuje minimální množství venkovního vzduchu na osobu 25 m³/h.

A.3.3 Systémy větrání pro vzdělávací zařízení

Vzhledem ke skutečnostem zmíněných v předchozích kapitolách je očividné, že zajištění odpovídající kvality vnitřního prostředí škol je podmíněno dostatečným přívodem čerstvého vzduchu a odvodem vzduchu znehodnoceného. Prostřednictvím několika studií bylo dokázáno, že tomu tak ve velkém procentu případů v rámci českých ani zahraničních vzdělávacích zařízení není, a že při rekonstrukcích škol je pozornost převážně věnována snížení energetické náročnosti budovy bez ohledu na možná rizika spojená se zhoršením kvality vnitřního prostředí. V případě vzdělávacích zařízení je systém větrání schopen zajistit jak odpovídající kvalitu a množství přiváděného vzduchu, tak i odvádění tepelné zátěže, což je další z problémů tížící budovy, které prošly renovací obvodového pláště.

A.3.3.1 Návrh větracího systému

Je nutné si uvědomit, že návrh větrání je velmi komplexní záležitost zahrnující řadu faktorů, které je potřeba splnit, aby výsledný systém zajistil požadované funkce.

Implementaci větracího systému do stávajících vzdělávacích zařízení se věnuje i studie Hviida a Petersena (2012), kteří uvedli, že systém větrání pro rekonstruované školy je primárně omezen stávajícími parametry budovy (technické prostory, systém nosných konstrukcí, výška místnosti, lokalita atd.) a sekundárně také kompromisy mezi investičními náklady, provozními náklady, požadovanou kvalitou vnitřního prostředí, předpokládanou energetickou náročností a estetikou.

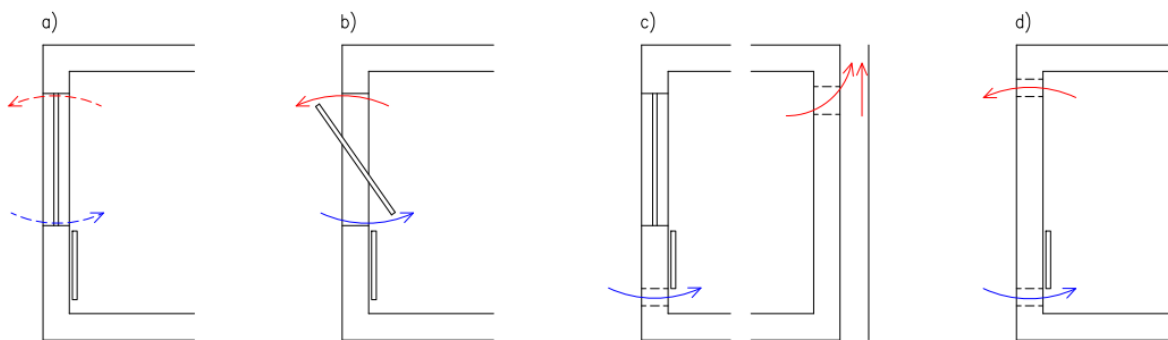


Obr. 6 Faktory ovlivňující návrh větrání (Hviida a Petersen, 2012)

A.3.3.2 Přehled větracích systémů

A.3.3.2.1 Přirozené větrání

Systémy přirozeného větrání jsou založeny na výměně vzduchu vlivem tlakového rozdílu, který je vyvolán účinkem přírodních sil vznikajících rozdílem měrných hmotností vnitřního a venkovního vzduchu o různé teplotě nebo dynamickým účinkem větru. Z tohoto plyne, že funkčnost přirozeného větrání je ve velké míře závislá na aktuálních klimatických podmínkách. Další nevýhodou je omezená možnost filtrace a ohřevu přiváděného vzduchu kvůli malému účinnému tlaku, který je nedostatečný pro překonání tlakových ztrát těchto prvků. Pokud vezmeme v úvahu rizika spojená se vznikem průvanů a tepelného diskomfortu je přirozené větrání pro většinu škol nevyhovující. Na obr. 7 jsou schematicky znázorněny základní druhy přirozeného větrání.



Obr. 7 Schematické znázornění druhů přirozeného větrání – a) infiltrace; b) provětrávání; c) šachtové větrání; d) aerace

Infiltrace

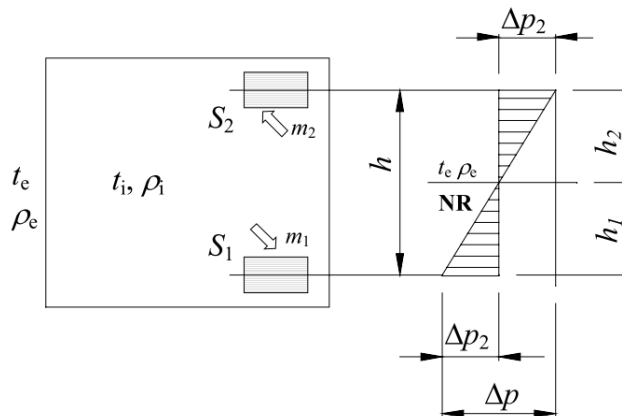
Infiltrace je přirozené větrání založené na výměně vzduchu nětěsným spárami obvodových konstrukcí (primárně oken a dveří). Účinnost je dána jak technickými parametry výplní otvorů (součinitel spárové průvzdušnosti), tak venkovními a vnitřními klimatickými podmínkami. Nejvyšší účinnost má infiltrace v zimních měsících, což je také spojeno s vyššími tepelnými ztrátami.

Provětrávání

Provětrávání je způsob větrání otevíratelnými okny umožňujícími výměnu vzduchu při rozdílu teplot a působení větru. Princip tohoto systému je analogický s aeračním větráním, kdy jediný otvor slouží jako přívod i odvod vzduchu. Za předpokladu, že hmotnostní průtok přívodního vzduchu je roven hmotnostnímu toku vzduchu odváděného, se vlivem rozdílných hustot obou proudů vzduchu posouvá neutrálná rovina do středu okna.

Aerace

Aerace je způsob větrání založen na dvojici otvorů umístěných nad sebou s dostatečným výškovým rozdílem. V případě dvou otvorů o ploše S_1 a S_2 umístěných v místnosti nad sebou vznikne při rozdílné teplotě v interiéru a exteriéru pro $t_i > t_e$ rozdíl tlaku Δp .



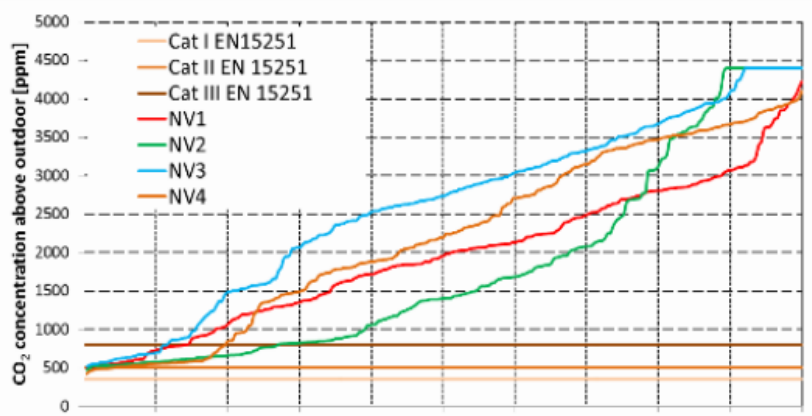
Obr. 8 Schéma větrání aerací (Hirš a Gebauer, 2005)

Šachtové větrání

Šachtové větrání je přirozené větrání založené na přívodu vzduchu do místnosti (přívodní sací šachtou), odvodu vzduchu z místnosti (odváděcí výtlačnou šachtou) nebo přívodu i odvodu prostřednictvím svislých proudů. Výškovým rozdílem sacího a výtlačného otvoru vznikne tlakový rozdíl Δp , který je spotřebován na překonání hydraulických ztrát při proudění vzduchu šachtou.

Dosavadní výzkum v oblasti přirozeného větrání vzdělávacích zařízení

Ohledně možnosti použití přirozeného větrání ve školách byla publikována řada studií. Například studie Allaba et al. (2016) zkoumala kvalitu větrání a tepelný komfort u čtyř různých variant přirozeného větrání – jednostranné provětrávání (NV1), příčné provětrávání (NV2), šachtové větrání s přívodem vzduchu infiltrací (NV3) a šachtové větrání s přívodem vzduchu otevřeným oknem (NV4). Je také důležité zmínit, že měření probíhalo v zimních měsících po dobu dvou týdnů. V rámci studie proběhlo taktéž měření průvzdušnosti budovy, tzv. blower door test, který stanovil výměnu vzduchu za tlakového rozdílu 50 Pa $n_{50} = 6,67 \text{ h}^{-1}$. Z hlediska tepelného komfortu je třeba poukázat na skutečnost, že v 80 % změřených hodnot byla teplota vzduchu nižší než 21 °C, přičemž strategie NV4 vykazovala ve 20 % případech teploty nižší než 19 °C. Z hlediska koncentrací CO₂ dopadla nejlépe varianta NV2, kdy se téměř 60 % naměřených hodnot pohybovalo pod 1500 ppm, zatímco ostatní varianty se pohybovaly pod hranicí 30 % (viz obr. 8).



Obr. 9 Frekvenční distribuce naměřených koncentrací CO₂ pro jednotlivé varianty (Allab et al., 2016)

Santamouris et al. (2008) uvedl, že je statisticky dokázána vyšší koncentrace CO₂ u přirozeně větraných tříd oproti třídám větraným mechanicky. Zmínil také fakt, že průměrná hodnota dávky čerstvého vzduchu na jednoho žáka se v přirozeně větraných školách pohybuje kolem 11 m³/h, zatímco u mechanicky větraných tříd to je 30 m³/h na žáka.

Porovnání simulovaných a reálných parametrů přirozeného větrání ve třídě nám ukazuje studie Mateuse et al. (2016), ve které byl zkoumán předpokládaný a reálný

objemový průtok vzduchu přiváděný do třídy šachtovým přirozeným větráním. Výsledky ukázaly, že testovaný simulovaný model je schopen předpovědět výsledek s chybou 16 %. Výsledky této studie podporují i myšlenku autora, že přirozené větrání škol může při důsledném návrhu zajistit odpovídající kvalitu vnitřního prostředí. U stávajících staveb je ovšem implementace systému přirozeného větrání často omezena nevyhovujícím dispozičním řešením tříd a venkovními klimatickými podmínkami (teplota, znečišťující látky a hluk).

Často uvažovaný systém přirozeného větrání nárazovým provětráváním otevíratelnými okny zkoumá studie Stabileho et al. (2017). Uvažovanými objekty jsou tři základní školy postavené v 60. a 80. letech. Měřeny byly koncentrace CO₂ a to v zimních i letních měsících. Výsledná data ukazují významnou expozici žáků vzduchem s koncentracemi CO₂ pohybujícími se v průměrných hodnotách 1400 až 3000 ppm se špičkovými koncentracemi dosahujícími 5000 ppm CO₂. Pro upřesnění je potřeba uvést, že tyto hodnoty byly naměřeny v zimních měsících, kdy bylo větrání omezeno na 15 minutové intervaly během přestávek. V letních měsících se naměřené průměrné hodnoty pohybovaly pod hranicí 1000 ppm CO₂.

Za zmínku stojí i studie Dhalluina a Limama (2014), kteří se zabývali porovnáním strategie přirozeného a hybridního větrání. Strategie přirozeného větrání byla v prvním případě založena na jednostranném provětrávání otevíratelnými okny a v případě druhém na automaticky otevíratelných oknech. Hybridní strategie byla založena na implementaci nuceného odvodu znečištěného vzduchu k oběma variantám přirozeného větrání. Z hlediska množství přiváděného čerstvého vzduchu byly podle očekávání nejúčinnější systémy hybridního větrání, a naopak nejméně účinným se ukázal být systém založený na jednostranném provětrávání.

A.3.3.2 Nucené větrání

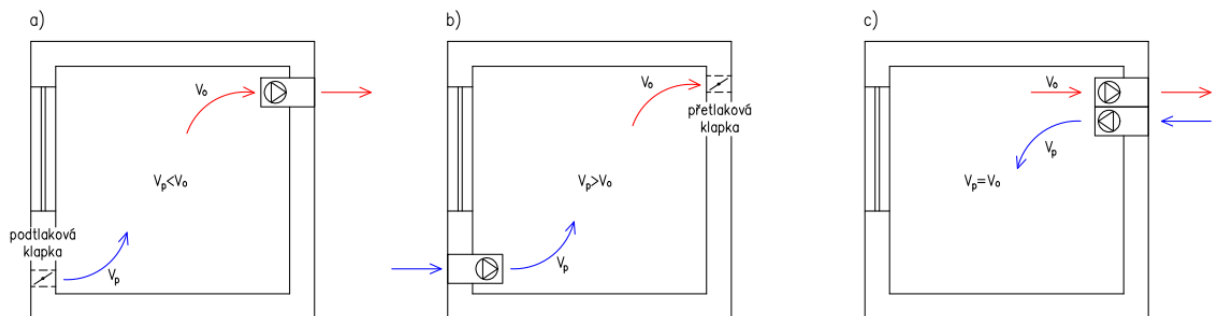
Systemy nuceného větrání jsou založeny na mechanické výměně znehodnoceného vzduchu v uvažovaném prostoru za vzduch čerstvý. Nucené větrání pracuje nezávisle na vnějších klimatických podmínkách a umožňuje filtraci a teplotní úpravu přiváděného vzduchu. U budov se specifickými požadavky je schopna zajistit požadované tlakové poměry a taktéž využívat zpětného získávání tepla. Systemy nuceného větrání lze rozdělit podle:

Tlakových poměrů:

- Podtlakové $V_o > V_p$
- Rovnotlaké $V_o = V_p$
- Přetlakové $V_o < V_p$

Podle dispozičního řešení:

- Centrální – společná centrální vzduchotechnická jednotka umístěna v prostorech strojovny nebo na střeše
- Decentrální – každý řešený prostor má vlastní vzduchotechnickou jednotku



Obr. 10 Schémata systémů nuceného větrání – a) podtlakové nucené větrání; b) přetlakové nucené větrání; c) rovnotlaké nucené větrání

Nucené větrání podtlakové

System nuceného podtlakového větrání se vyznačuje průtokem vzduchu, kdy objemový průtok přiváděného vzduchu je menší než objemový průtok vzduchu odváděného: $V_p < V_o [m^3/s]$. Obecně se tento systém uplatní v prostorech, kde je požadavek na omezení průniku vnitřního vzduchu do okolních prostor. Přívod vzduchu může být přirozený nebo nucený.

V prostorách škol se nejčastěji setkáváme se systémem založeným na odsávání lokálním ventilátorem s přívodem vzduchu okenními nebo parapetními štěrbinami. Použití tohoto systému je podmíněno dobrou kvalitou přiváděného venkovního vzduchu. S ohledem na riziko tepelného diskomfortu a vysokou energetickou náročnost se použití tohoto systému nedoporučuje.

Nucené větrání rovnotlaké

System rovnotlakého větrání je založen na rovnoměrném objemovém průtoku přiváděného i odváděného vzduchu: $V_p = V_o [m^3/s]$. Nucený odvod a přívod (mechanickými ventilátory) umožňuje použití systému zpětného získávání tepla. Obecně se tento systém používá v prostorech, kde není důvod pro podtlakové/přetlakové větrání.

Podle dispozičního řešení dělíme systémy nuceného větrání na centrální a decentrální (lokální). Lokální větrání může být zajištěno parapetní větrací jednotkou v obvodovém plášti, lokální potrubní podstropní větrací jednotkou nebo lokální větrací jednotkou umístěnou v učebně nebo vně učebny (Zmrhal et al., 2017). Centrální větrání je založeno na přívodu a odvodu vzduchu centrální vzduchotechnikou jednotkou, zpravidla umístěnou v technickém zázemí nebo vně budovy. Hlavní výhodou nuceného rovnotlakého větrání je možnost zajistit adekvátní kvalitu přiváděného vzduchu bez ohledu na vnější klimatické podmínky.

Nucené větrání přetlakové

System nuceného přetlakového větrání se vyznačuje průtokem vzduchu, kdy objemový průtok přiváděného vzduchu je větší než objemový průtok vzduchu odváděného: $V_p > V_o [m^3/s]$. Uplatnění nalezneme především u prostor s nároky na vysokou kvalitu vzduchu (např. operační sály).

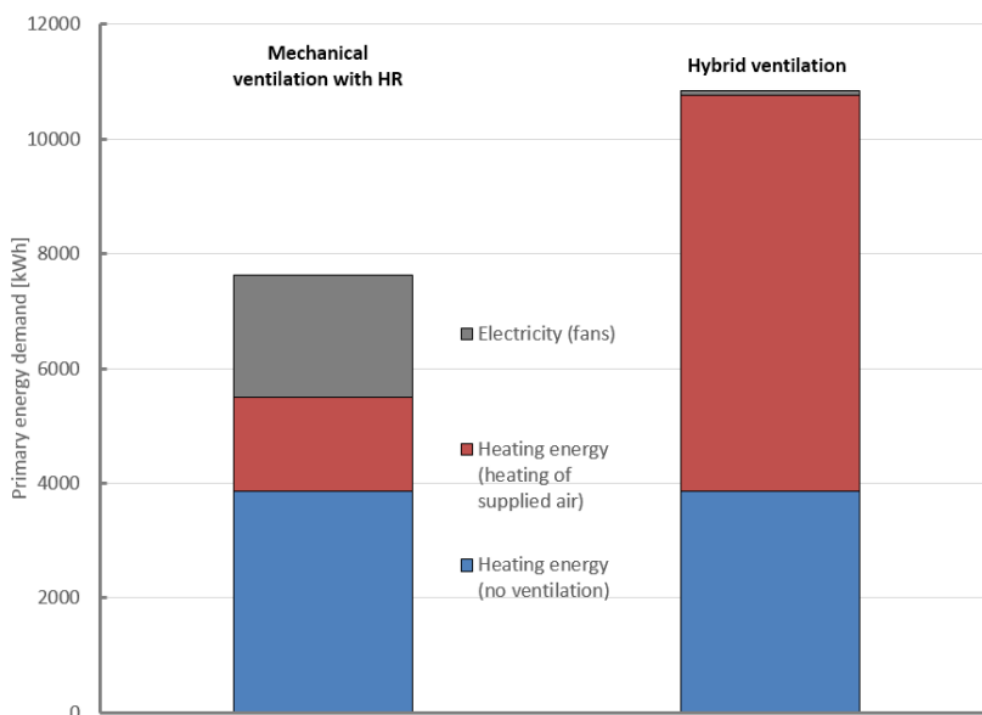
Dosavadní výzkum v oblasti nuceného větrání vzdělávacích zařízení

Zhang a Liu (2017a) zveřejnili studii týkající se strategie větrání na dvou dánských základních školách. Porovnáván byl systém přirozeného větrání (v práci zmíněn jako doposud nejčastěji používaný systém větrání) a systém nuceného větrání, který byl založen na přívodu vzduchu textilní půlkruhovou vyústkou umístěnou na stropě v ose místnosti, a odvodu prostřednictvím stěnových mřížek. Je nutné podotknout, že fungování systému je ovlivněno špatným umístěním odvodních elementů, které byly blokovány rozvodem vzduchotechniky a dále také špatnou údržbou vzduchotechnické jednotky. Důsledky těchto nedostatků se ukázali na naměřených koncentracích CO₂, které dosáhli až 2000 ppm, avšak oproti třídám větraným přirozeným způsobem, kde hodnoty koncentrace dosáhli až 4500 ppm, to může být považováno za uspokojivý výsledek. Měřena byla také teplota a rychlost proudění vzduchu v různých výškových úrovních za účelem zjistit, jestli v důsledku větrání nevzniká nežádoucí průvan. Ukázalo se, že v nuceně větrané třídě byla teplota i rychlost vzduchu uspokojivá, a že textilní vyústka dokázala zajistit dobré provětrávání. Naopak v přirozeně větraných třídách byla detekována zvýšená rychlost vzduchu s nízkou teplotou v oblasti kotníků 0,1 m nad zemí.

Další prací popisující fungování nuceného větrání v objektu základní školy je studie Gao et al. (2014). V porovnání se systémy přirozeného a hybridního větrání bylo nucené větrání schopno zajistit největší objem přiváděného čerstvého vzduchu. Zajímavým zjištěním ovšem bylo, že vnímaná úroveň kvality vzduchu byla nejhorší právě u mechanicky přiváděného vzduchu, což může být spojeno se špatnou údržbou vzduchotechnického zařízení. Toto téma rozsáhle popisuje Mysen (2005) v několika studiích popisujících vztah mezi filtrací přiváděného vzduchu a vnímanou kvalitou vnitřního vzduchu (PAQ — z angl. Perceived Air Quality). Na základě měření prováděném ve školách s různými strategiemi větrání (nucené, přirozené a hybridní) a porovnání výsledků bylo zjištěno, že žáci ve školách bez filtrace přiváděného vzduchu vnímali vzduchu jako více kvalitní než žáci navštěvující školy, kde byl přiváděný vzduch upravován. Další experiment byl založen na odstranění filtrace z běžně používaného systému nuceného větrání a sledování změn ve vnímání. Odstraněním filtrů se vnímaná kvalita vzduchu výrazně zlepšila. Mysen se dále zabýval vlivem řízeného systému větrání

a energetické náročnosti. Uvedl, že energetická úspora může být oproti systémům s konstantním průtokem vzduchu 38 – 51 %.

Porovnání energetické náročnosti systému nuceného větrání a větrání hybridního ukazuje studie Mijakowskeho a Narowskeho (2016). Při srovnatelné úrovni kvality vnitřního prostředí spotřebovalo mechanické větrání o 40 % méně primární energie (ohřev vzduchu a pohon ventilátorů). Autoři uvádí, že vyšší spotřeba primární energie hybridních systémů může být kompenzována nižšími investičními náklady.



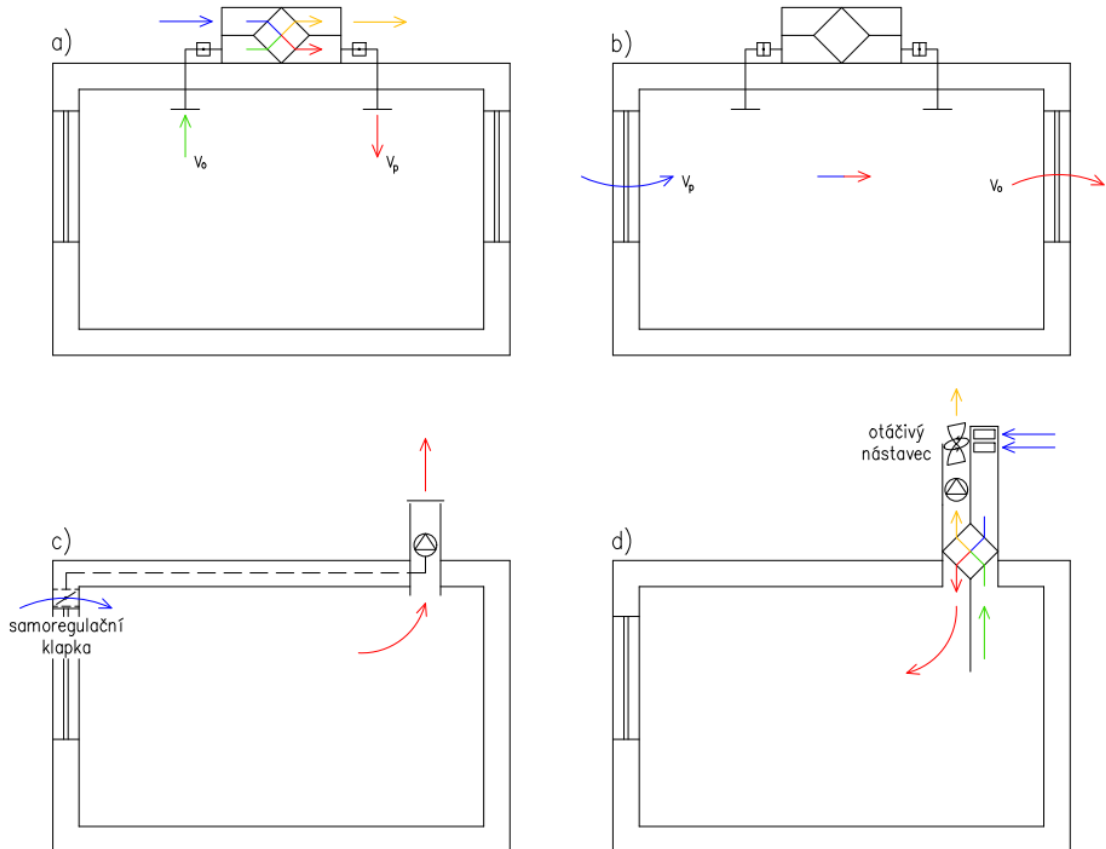
Obr. 11 Porovnání spotřeby primární energie systému nuceného větrání a větrání hybridního (Mijakowski a Narowski, 2016)

A.3.3.2.3 Hybridní větrání

Hybridní větrání je založeno na střídání režimu přirozeného a nuceného větrání. Cílem je zajistit adekvátní výměnu venkovního vzduchu při co největší úspoře elektrické energie na dopravu vzduchu. Řízeny jsou inteligentními systémy, které jsou schopny přepínat mezi oběma systémy tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší kvality vnitřního prostředí a tepelné pohody s co nejmenší spotřebou elektrické energie.

System hybridního větrání lze realizovat několika způsoby:

- systémy přirozeného a nuceného větrání pracující nezávisle na sobě,
- systém přirozeného větrání doplněný pomocným ventilátorem,
- systém nuceného větrání pracující s přirozenými tlakovými silami.



Obr. 12 Schémata znázorňující jednotlivé varianty hybridního systému — větrání a), b) systémy přirozeného a nuceného větrání pracující nezávisle na sobě; c) systém přirozeného větrání doplněný pomocným ventilátorem; d) systém nuceného větrání pracující s přirozenými tlakovými silami

V rámci veřejných budov je často využíván systém hybridního větrání s mechanicky otevíravými okny, kdy se v případě nedostatečného tlakového rozdílu uvede do chodu ventilátor, který zajistí podtlakové provětrávání řešeného prostoru. V případě příznivých klimatických podmínek je tento systém schopen zajistit požadovanou kvalitu prostředí a tepelný komfort, avšak v zimních měsících může být větrání spojeno s diskomfortem spojeným s nízkou teplotou přiváděného vzduchu a vznikajícím průvanem.

Dosavadní výzkum v oblasti hybridního větrání vzdělávacích zařízení

Hybridní systém větrání založený na automaticky otevíravých oknech a fasádní větrací jednotce popsali ve své studii Eggers et al. (2009). Větrací jednotka v parapetním provedení fungující buďto v přetlakovém nebo podtlakovém režimu byla vybavena systémem zpětného získávání tepla. Mechanické otevírání oken i větrací jednotka byla řízena kontrolním systémem. V případě vhodných klimatických podmínek může větrací jednotka fungovat pouze jako distribuční element přirozeného větrání. Výsledky ovšem ukázaly, že ani v režimu nuceného větrání nebyly jednotky schopny zajistit požadovanou kvalitu prostředí.

Systém přirozeného přívodu čerstvého vzduchu doplněný o ventilátor zajišťující dostatečný tlakový rozdíl zkoumá studie Mysena et al. (2005). Popisovaným objektem je střední škola nacházející se v Norsku, která byla v roce 2004 rekonstruována. Kvůli nedostatku financí na zavedení centrálního systému nuceného větrání se škola rozhodla pro hybridní systém skládající se z přívodního podstropního potrubí, z kterého byl čerstvý vzduch distribuován tryskovými difuzory. Odvod vzduchu byl realizován centrálně s tím, že každá třída byla vybavena regulátorem průtoku vzduchu řízeným čidly oxidu uhličitého a teploty vzduchu. Zkoumán byl především tepelný komfort v zimním období a riziko vzniku plísní v přívodním potrubí. Výsledky ukázaly, že už při teplotách venkovního vzduchu kolem 2 °C nebyly splněny požadavky na vnitřní prostředí z hlediska vzniku průvanů. Při teplotách nižších než -10 °C shledalo prostředí jako nekomfortní 50 až 75 % žáků. Dalším nežádoucím jevem byl zvýšený výskyt plísní v přívodním potrubí, což bylo způsobeno vznikající kondenzací.

Aplikaci šachtového větrání s využitím tzv. solárního komínu ve stávající škole popisují Wahlström a Nielsen (2001). Díky vztlaku vznikajícím rozdílem mezi teplotou vnitřního prostředí a teplotou v 6 m vysoké šachtě solárního komína je systém schopen fungovat i v podmínkách, ve kterých by klasické systémy kvůli nízké tlakové diferenci nebyly schopny pracovat. Pro případ, kdy není vyvolaný vztlak dostačující, je systém vybaven nízkotlakým ventilátorem. Čerstvý vzduch je do budovy přiváděn přes fasádní otvory, odkud je následně přes podlahové konvektory přiváděn do tříd. Toto řešení umožňuje v zimních měsících ohřev přiváděného vzduchu. Důležitým předpokladem

správného fungování systému je nízká tlaková ztráta odvodního vzduchotechnického potrubí, čehož je dosaženo důkladným návrhem dimenzí a omezením prvků s vysokou tlakovou ztrátou. Celý systém je řízen okamžitou koncentrací CO₂ ve vnitřním vzduchu. Prováděná měření prokázala, že systém je schopný zajistit požadavky na kvalitu vzduchu i rychlost proudění vzduchu. Učitelé i žáci vyjádřili spokojenost s fungováním systému, a to zejména s nízkou hladinou hluku. Spotřeba elektrické energie byla oproti původnímu systému nuceného větrání 55 %.

A.3.4 Příklady řešení větracích systémů u rekonstruovaných škol

A.3.4.1 Základní škola Slivenec (Česká republika)

Budova základní školy pochází z roku 1968. Má dvě nadzemní podlaží a jedno technické podzemní podlaží. V rámci rekonstrukce, která proběhla v roce 2009, byly zlepšeny tepelně-technické parametry obálky budovy a byla vybudována zelená bezúdržbová střecha s přesahem, která v kombinaci se slunolamy slouží k ochraně proti přehřívání tříd.



Obr. 13 Původní stav školy z roku 1968 a stav po rekonstrukci z roku 2009 (tzb-info, 2011)

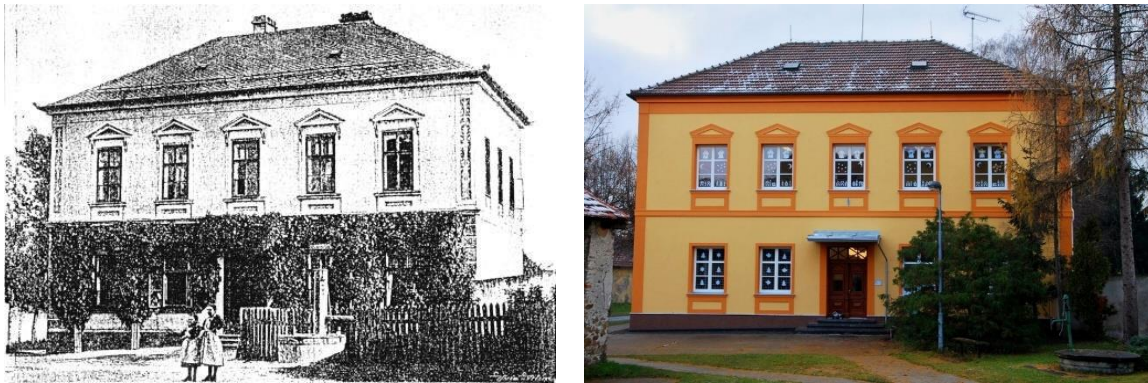
V rámci snižování energetické náročnosti a zlepšování kvality vnitřního prostředí byl ve škole zaveden centrální systém řízeného větrání, jehož jádrem je vzduchotechnická jednotka s rekuperací. Přívod a odvod vzduchu ve třídách je situován na protilehlých stěnách tak, aby docházelo k co nejúčinnějšímu provětrávání. Větrání je řízeno na základě přítomnosti žáků ve třídě.



Obr. 14 Ukázka vedení vzduchotechnických rozvodů a umístění distribučních prvků ve třídě (tzb-info, 2011)

A.3.4.2 Základní škola v Kostelní Lhotě (Česká republika)

Základní škola v Kostelní Lhotě byla postavena v roce 1879. V roce 2012 prošla škola zásadní rekonstrukcí, kdy byla rekonstruována obálka budovy, byl modernizován zdroj tepla – tepelné čerpadlo, spolu s novým systémem vytápění.



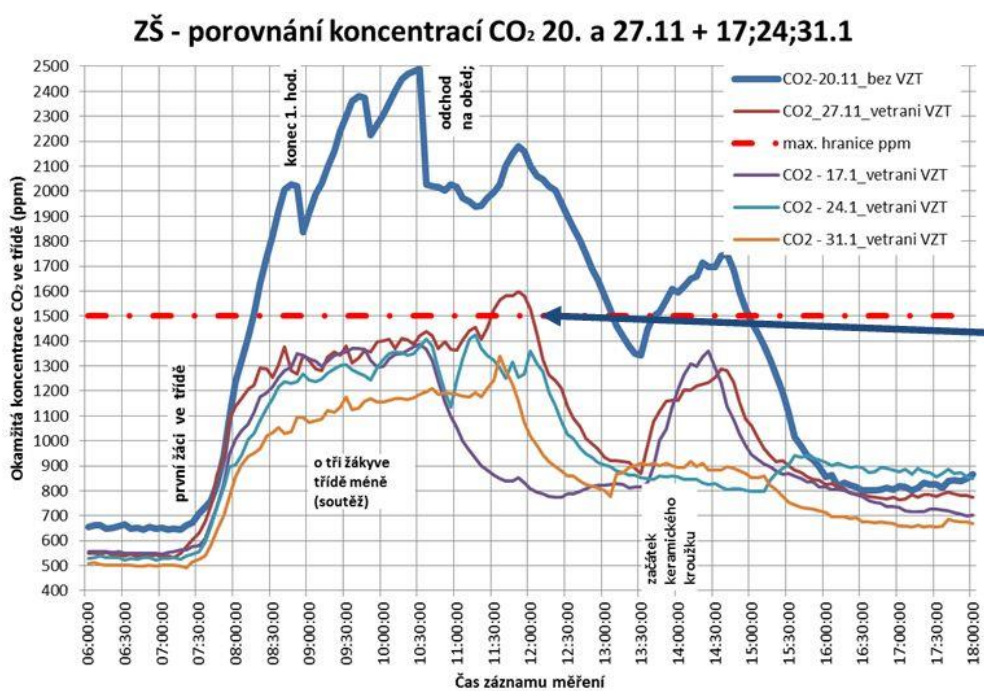
Obr. 15 Původní stav školy v roce 1879 a po rekonstrukci v roce 2012 (Atrea, 2012)

Na rozdíl od mnoha jiných případů se místní zastupitelstvo rozhodlo neignorovat legislativní požadavky na vnitřní prostředí škol a v rámci rekonstrukce byl nainstalován centrální systém řízeného větrání s rekuperací tepla. Vzhledem k velikosti školy mohla být zvolena kompaktnější jednotka, která se běžně používá pro větrání větších rodinných domů nebo kanceláří. Tato jednotka zajišťuje požadovaný průtok čerstvého vzduchu 470 m³/h. Čerstvý vzduch je nasáván přes fasádu objektu a přes vzduchotechnickou jednotku je dál distribuován do obou tříd. Systém je řízen okamžitou koncentrací CO₂.



Obr. 16 Přívodní distribuční prvky a stavební úpravy spojené s rozvody vzduchotechnického potrubí (Atrea, 2012)

Pro prokázání vlivu instalovaného zařízení probíhá ve třídách dlouhodobé měření parametrů vnitřního prostředí. Výsledky z těchto měření mohou být následně použity pro další optimalizaci větracího systému z hlediska snížení provozních nákladů.



Obr. 17 Graf znázorňující průběh koncentrací CO₂ (Atrea, 2012)

Průběhy koncentrací CO₂ ve třídě jasně ukazují zlepšení kvality vnitřního ovzduší po zavedení systému nuceného větrání.

A.3.4.3 Základní škola St. Leonhard (Rakousko)

Základní škola nacházející se v rakouském Arnoldsteinu byla postavena v roce 1964. Hlavním důvodem pro rozsáhlou rekonstrukci provedenou v roce 2010 byl špatný technický stav budovy a s tím související vysoká energetická náročnost.



Obr. 16 Původní stav školy z roku 1964 a stav po rekonstrukci z roku 2010 (renew school, 2017)

V rámci rekonstrukce byl obvodový plášť doplněn o dřevěnou provětrávanou konstrukci s tepelnou izolací a stará okna byla nahrazena moderními dřevohliníkovými.

Pro zajištění adekvátní kvality vnitřního prostředí byl ve škole zaveden centrální vzduchotechnický systém, který je poháněn jednotkou vybavenou rotačním výměníkem tepla s účinností přes 80 %. Jako protimrazová ochrana větrací jednotky slouží solankový výměník, který zároveň funguje jako zdroj chladu potřebný pro noční chlazení v letních měsících. Množství přiváděného čerstvého vzduchu je řízeno čidly CO₂ s minimálním průtokem 420 m³/h na třídu.



Obr. 17 Rozvody vzduchotechniky a distribuční prvky ve třídě (Renew school, 2017)

A.3.4.4 Základní škola Höttinger, Innsbruck (Rakousko)

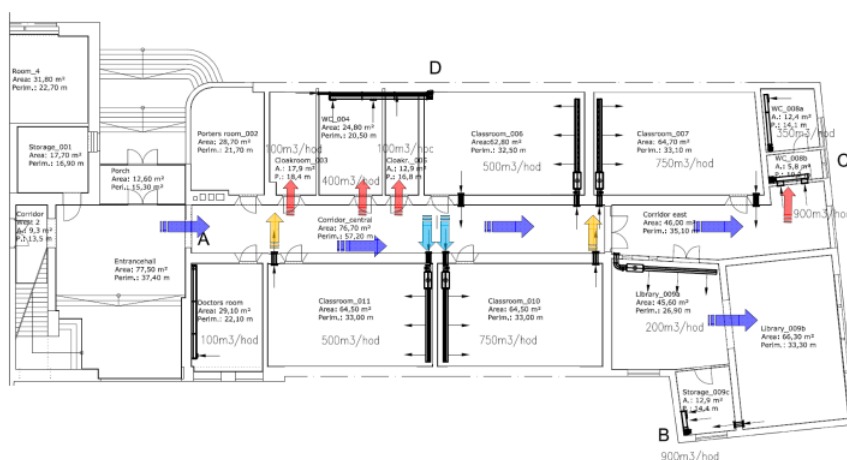
Základní škola situována nedaleko historického centra Innsbrucku byla postavena v roce 1930 a v roce 2008 byla označena jako historická památka.



Obr. 18 Základní škola Höttinger, Innsbruck (Pfluger, 2014)

Vzhledem k vysoké energetické náročnosti, letnímu přehřívání ve třídách a problémy s kvalitou vnitřního vzduchu začala v roce 2011 rekonstrukce obnášející vnitřní zateplení, výměnu oken a instalaci řízeného systému větrání.

Vzduchotechnický systém je vybaven centrální vzduchotechnickou jednotkou se zpětným získáváním tepla, která distribuuje čerstvý vzduch do schodišťového prostoru a chodeb. Do jednotlivých tříd je potom čerstvý vzduch přiváděn ventilátory opatřenými tlumičem hluku a textilním rukávem. Odvod vzduchu je realizován přes toalety a šatny. Tento systém byl použit především kvůli požadavku na co nejmenší stavební zásahy do stavebních konstrukcí. Jako jednu z největších nevýhod tohoto systému lze označit míchání odpadního vzduchu odváděného ze tříd s čerstvým vzduchem proudícím prostory chodeb.



Obr. 19 Funkční schéma vzduchotechnického systému a distribuční textilní rukáv (Pfluger, 2014)

A.3.4.5 Gymnázium Solitude, Stuttgart (Německo)

Komplex stuttgartského gymnázia se skládá z pěti budov, které byly postupně postaveny v letech 1966-1975. Především špatný technický stav budov byl důvodem k rozsáhlé rekonstrukci, kterou se vedení města později rozhodlo rozšířit o energeticky úsporná opatření. Toto obnášelo zlepšení tepelně-technických vlastností obálky budovy a nahrazení původního zdroje tepla kogenerační jednotkou doplněnou solárním fotovoltaickým systémem.



Obr. 20 Komplex budov Stuttgartského gymnázia (School of the future, 2017)

Stávající vzduchotechnické systémy školy byly buďto nahrazeny novými, nebo modernizovány. Přirozené větrání prostorů hlavní budovy bylo zhodnoceno jako neúčinné a bylo tedy nutné aplikovat systém nuceného větrání. V hlavní budově to je systém centrálního větrání v rámci auly a dalších společných prostor (6,700 m³/h, účinnost ZZT > 90 %, regulace na základě teploty vzduchu a koncentrace CO₂) a decentrální systém větrání v jednotlivých třídách (680 m³/h, účinnost ZZT > 80 %, regulace na základě koncentrace CO₂). Ve vědecké budově byl původní systém větrání doplněn o systém zpětného získávání tepla s účinností nad 90 %. Prostory velkého pavilonu jsou větrány přirozeně pomocí automaticky otevíracích oken na základě nastaveného časového rozvrhu nebo manuálně podle potřeby.

Větrací systém tělocvičny nemohl být kvůli dispozičním a statickým omezením rekonstruován.



Obr. 21 Centrální systém větrání hlavní budovy (School of the future, 2017)



Obr. 22 Decentrální systém větrání tříd (School of the future, 2017)



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE



FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



VĚTRÁNÍ REKONSTRUOVANÉ ŠKOLY

B EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Bc. Jan Hejlek

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

PRAHA 2017/2018

B.1 Experimentální měření kvality vzduchu ve třídě

Předmětným objektem je budova základní školy v Kostelci na Hané, která byla postavena v roce 1997. Budova má 4 nadzemní podlaží sloužící především pro výuku a jedno podlaží podzemní, kde se nachází technické zázemí budovy. Budova je vytápěna teplovodní otopnou soustavou s článkovými tělesy, zpravidla umístěnými pod okny. Větrání je v současné době řešeno jako přirozené, s výjimkou toalet a několika místností v podzemním podlaží, kde je instalován systém nuceného větrání. Osazena jsou stále původní plastová okna. Budova školy za období její existence neprošla žádnou významnou rekonstrukcí.



Obr. 23 Budova základní školy v Kostelci na Hané

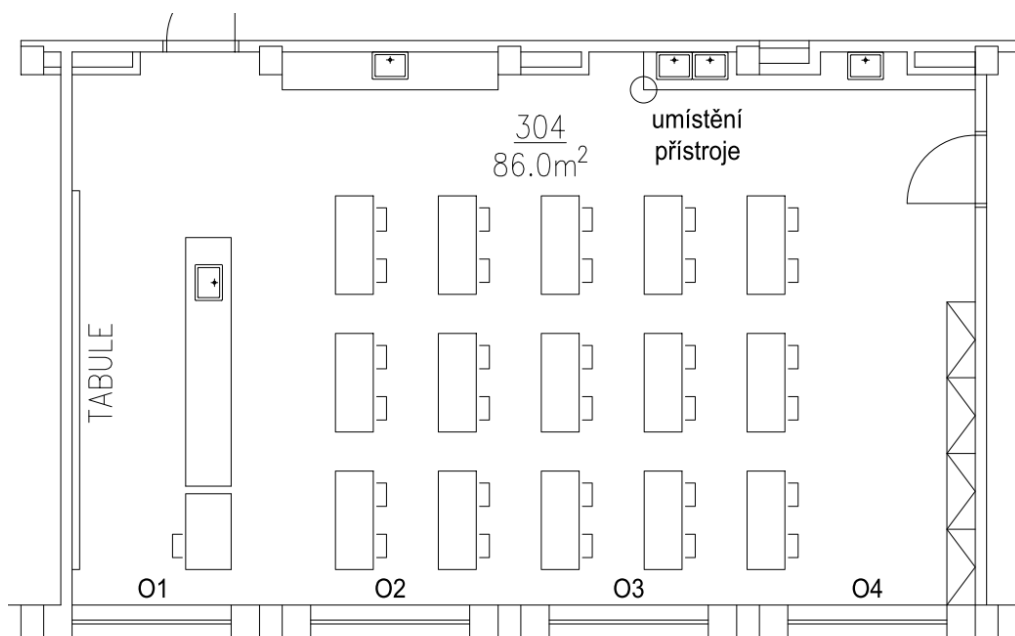
B.1.2 Popis třídy

Posuzovaná třída se nachází ve třetím nadzemním podlaží ve východním křídle. Třída má kapacitu pro 30 žáků a jednoho učitele. Větrání ve třídě je řešeno jako přirozené. Půdorysná plocha třídy je 86 m² se světlou výškou místnosti 3,3 m. V místnosti se nachází 4 jihovýchodně orientovaná okna o rozměrech 2,1 x 2,1 m, pod nimiž jsou umístěna článková otopná tělesa.

Místnost je v zadní části propojena dveřmi s vedlejší učebnou. Třída je vybavena klasickým školním nábytkem a bílou mazatelnou tabulí.



Obr. 24 Předmětná třída



Obr. 25 Půdorysné schéma předmětné třídy

B.1.3 Popis měření

Ve vybrané třídě probíhalo měření kvality vnitřního prostředí, konkrétněji koncentrací oxidu uhličitého, teploty vzduchu a relativní vlhkosti. Měření probíhalo v týdnu 10.12. – 14.12. a to každý den od 8:00 až do konce výuky. Měřena byla také venkovní koncentrace CO₂, a to před začátkem a na konci výuky. Přístroj byl umístěn ve výšce 1,0 m v zadní části učebny (viz obr. 24).

B.1.3.1 Měřící technika

Pro měření byl použit datalogger s označením Multilogger M1140, který zaznamenával hodnoty ze 3 připojených sond (2x teplotní sonda, 1x senzor CO₂). Hodnoty byly zaznamenávány v intervalu 15 s. Data byla posléze vyhodnocena pomocí programu dodávaného výrobcem a tabulkového procesoru excel.



Obr. 26 Datalogger Multilogger M1140

B.1.4 Výsledky měření

Cílem měření kvality vnitřního vzduchu na základní škole v Kostelci na Hané bylo zaznamenat a vyhodnotit koncentrace oxidu uhličitého, teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Výsledky a závěry jednotlivých měření jsou zpracovány ve formě protokolů, ve kterých jsou detailně popsány události ovlivňující měřené veličiny. V případě, kdy je popisováno otevírání oken, jsou tato okna číselně označena podle obr.25.

Protokol č. 1 z měření kvality vnitřního prostředí ve třídě základní školy v Kostelci na Hané

Datum: 11.12.2017

Doba měření: 8:00 - 10:45

Parametry venkovního vzduchu

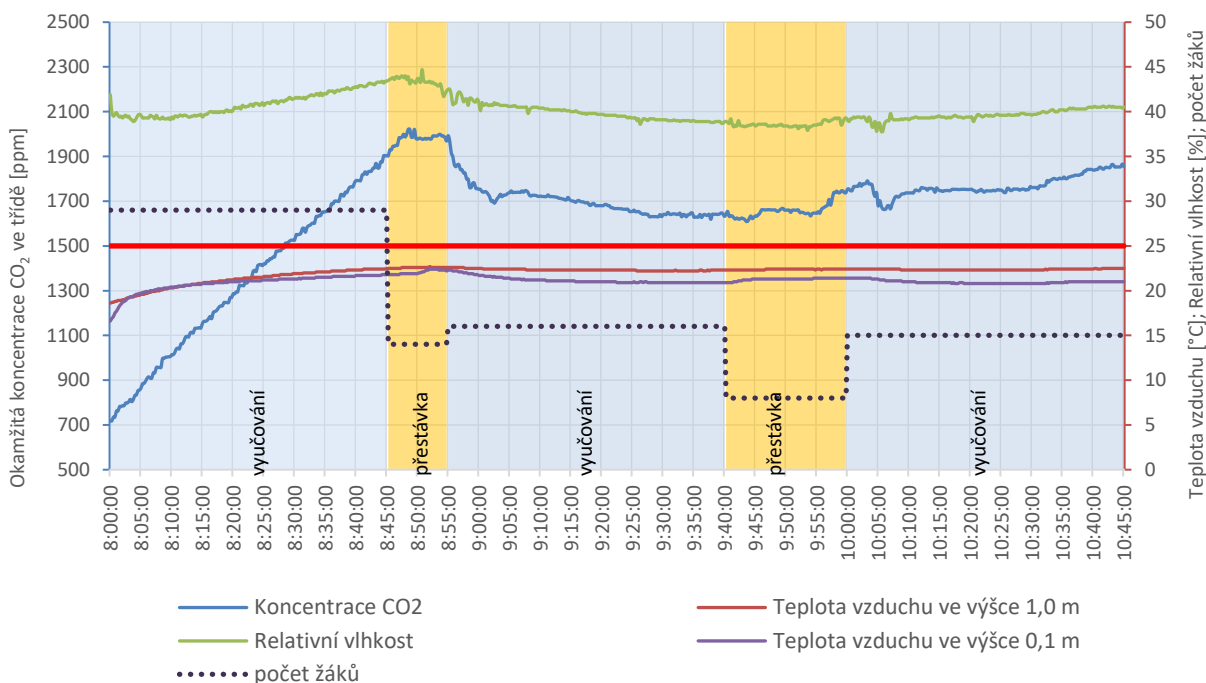
průměrná denní teplota: 8,8 °C

průměrná koncentrace CO₂: 362 ppm

průměrná relativní vlhkost: 78 %

průměrná rychlost větru: 10 km/h

Grafické znázornění průběhu měřených veličin vnitřního vzduchu



Průběh měření

8:00	Zahájení výuky, přítomno 29 žáků 6. třídy a učitel, před začátkem výuky byla okna zavřena
8:15	Otevřena okna (2,3) ve spodní části, která byla po půl minutě na žádost žáka zavřena
8:28	Překročena hodnota 1500 ppm, pocitově lze vzduch popsat jako těžký a vydýchaný
8:45	Konec hodiny, otevřeno okno (1)
8:55	Zahájení hodiny, přítomno 15 žáků 6. třídy a učitel, celou hodinu otevřeno okno (1)
9:40	Konec hodiny, okno (1) zavřeno, dveře otevřeny
10:00	Zahájení hodiny, přítomno 15 žáků 6. třídy a učitel, celou hodinu otevřeno okno (3)
10:45	Konec výuky

Vyhodnocení

Koncentrace oxidu uhličitého začala dle předpokladu ihned po začátku výuky prudce stoupat, což se projevilo zhoršením vnímané kvality vzduchu. V návaznosti na to otevřel přítomný učitel dvě okna, která ovšem v zápětí byla na žádost žáka sedícího v krajní řadě u oken zavřena. V průběhu hodiny tak dosáhla koncentrace CO₂ hranice 2000 ppm. Po ukončení hodiny byly otevřeny dveře na chodbu a protější okno (1) ve spodní části, které zůstalo otevřené i v průběhu další vyučovací hodiny. Toto ve spojení s odchodem poloviny žáků do jiné třídy způsobilo konstatní pokles koncentrace oxidu uhličitého, avšak pod maximální přípustnou hranici se hodnoty až do konce výuky nedostaly. Poměrně překvapivé byly výsledky měření v průběhu poslední vyučovací hodiny, kdy i navzdory otevřenému oknu v zadní části třídy a poloviční obsazenosti koncentrace oxidu uhličitého konstantně stoupaly až k hodnotě 1900 ppm. Vysvětlením můžou být klimatické podmínky způsobující nízkou účinnost přirozeného větrání.

Protokol č.2 z měření kvality vnitřního prostředí ve třídě základní školy v Kostelci na Hané

Datum: 12.12.2017

Doba měření: 8:00 - 14:40

Parametry venkovního vzduchu

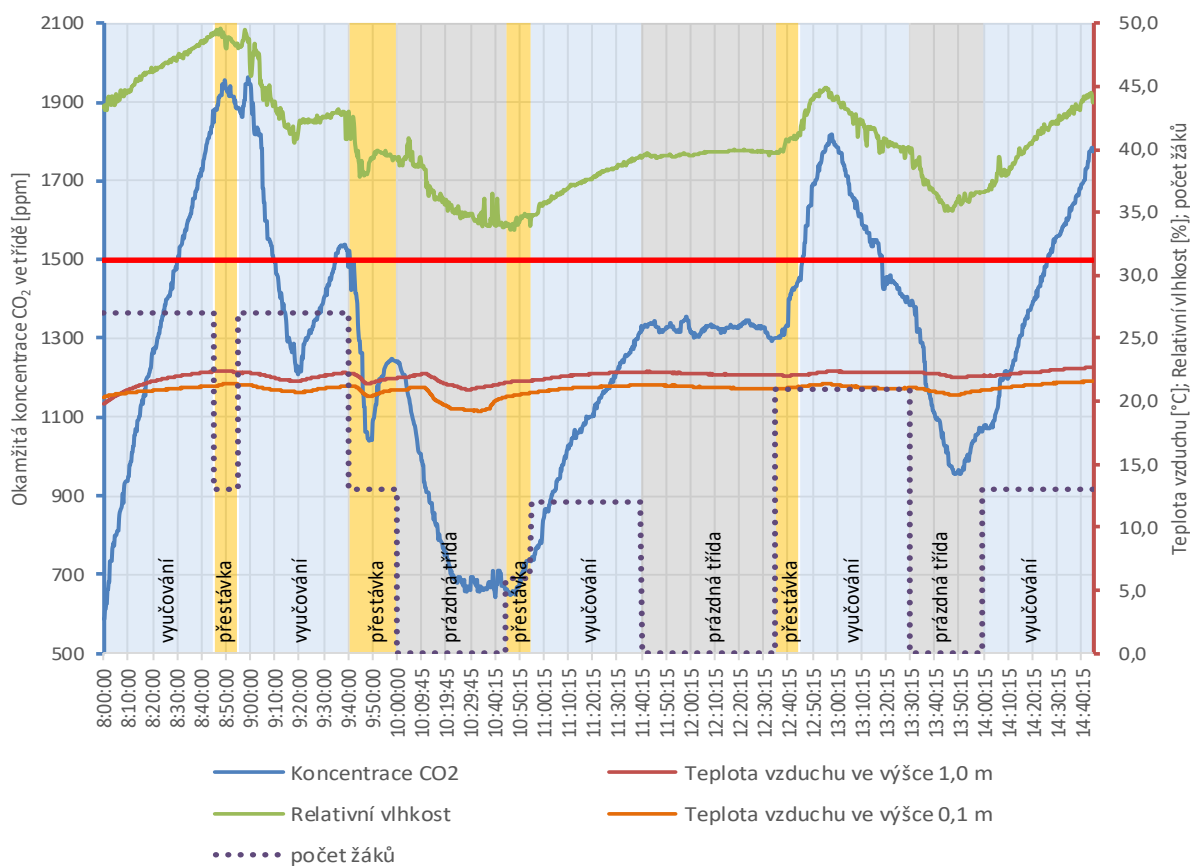
průměrná denní teplota: 7,3 °C

průměrná koncentrace CO₂: 356 ppm

průměrná relativní vlhkost: 69 %

průměrná rychlost větru: 24 km/h

Grafické znázornění průběhu měřených veličin vnitřního vzduchu



Průběh měření

8:00	Zahájení výuky, přítomno 27 žáků 6. třídy a učitel, před začátkem výuky byla okna zavřena
8:30	Překročena hodnota 1500 ppm CO ₂
8:45	Konec hodiny, v průběhu celé hodiny a přestávky byla okna zavřena
8:55	Zahájení hodiny, otevřena okna (1,3)
9:20	Okna zavřena
9:40	Konec hodiny, během přestávky otevřeny dveře a okno (3)
9:50	Žáci opustili třídu, okno zavřeno
10:00	Otevřena okna (1,3), zahájení měření pro potřeby výpočtu intenzity výměny vzduchu
10:30	Zavření oken
10:50	Příchod žáků do třídy
10:55	Zahájení hodiny, přítomno 12 žáků
11:40	Konec hodiny, v průběhu celé hodiny a přestávky byla okna zavřena, žáci opouští třídu
12:35	Příchod žáků do třídy
12:45	Zahájení hodiny, přítomno 21 žáků 8. třídy
12:55	Otevřena okna (1,2)
13:30	Konec hodiny, žáci opustili třídu

13:45	Okna zavřena
14:00	Zahájení hodiny, přítomno 13 žáků 9. třídy
14:40	Konec výuky

Vyhodnocení

Průběh koncentrace CO₂ byl během první vyučovací hodiny velmi podobný předchozímu dni. Otevření oken na dobu 20 minut během druhé vyučovací hodiny zajistilo dostatečné vyvětrání třídy. Na základě zkušeností z předchozího dne byly očekávány námitky žáků na diskomfort, avšak zřejmě i díky vysoké pocitové teplotě v důsledku intenzivního slunečního záření nezpůsobilo větrání pocitu nepohody. K dalšímu překročení limitu 1500 ppm došlo až v průběhu 5. vyučovací hodiny a po následném vyvětrání také na konci poslední 6. vyučovací hodiny. Všeobecně lze konstatovat, že pokud by učitelé byli informováni o průběhu koncentrací CO₂, bylo by za uvedených klimatických podmínek možné zajistit požadovanou kvalitu vnitřního vzduchu přirozeným provětráváním třídy bez vzniku diskomfortu. Teplotu vzduchu v průběhu celého dne lze označit jako komfortní.

Protokol č.3 z měření kvality vnitřního prostředí ve třídě základní školy v Kostelci na Hané

Datum: 13.12.2017

Doba měření: 8:00 - 13:30

Parametry venkovního vzduchu

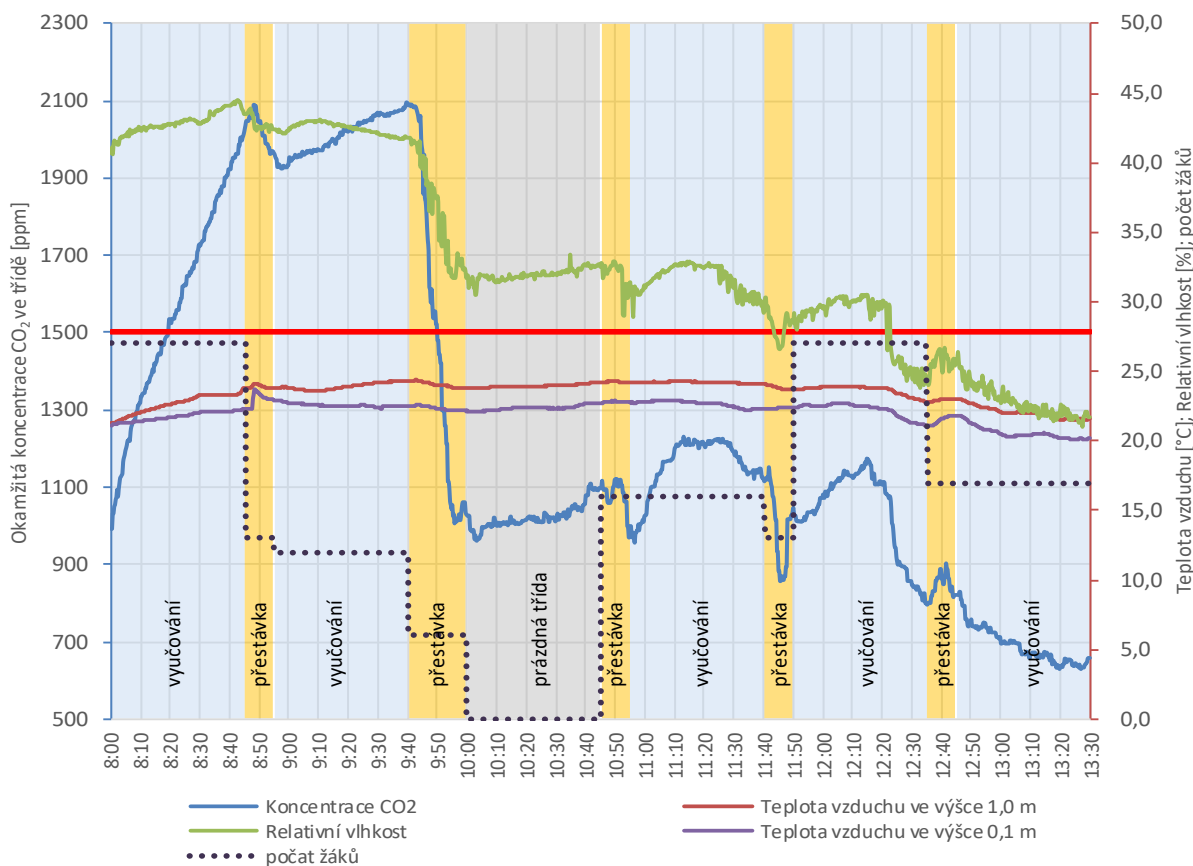
průměrná denní teplota: 2,68 °C

průměrná koncentrace CO₂: 348 ppm

průměrná relativní vlhkost: 74 %

průměrná rychlost větru: 15 km/h

Grafické znázornění průběhu měřených veličin vnitřního vzduchu



Průběh měření

8:00	Zahájení výuky, přítomno 27 žáků 6. třídy a učitel, před začátkem výuky byla okna zavřena
8:07	Otevřeno okno (1)
8:19	Překročena hodnota 1500 ppm CO ₂
8:45	Konec hodiny, okno zavřeno
8:55	Začátek hodiny, přítomno 12 žáků, otevřeno okno (1)
9:40	Konec hodiny, okno otevřeno i přes přestávku
9:50	Otevřeno okno (4)
9:55	Žáci opustili třídu, okna zavřena
10:45	Příchod žáků 9. třídy
10:50	Otevřeno okno (2)
10:55	Začátek hodiny, přítomno 16 žáků, otevřena okna (1,2)
11:40	Konec hodiny, okna otevřena po celou dobu přestávky
11:50	Začátek hodiny, přítomno 27 žáků, otevřena okna (1,2,3,4)
12:33	Ná žádost žáků zavřeno okno (2)
12:35	Konec hodiny, okna otevřena po celou dobu přestávky

12:45	Začátek hodiny, přítomno 17 žáků 8. třídy, po celou dobu hodiny otevřena okna (1,2,3,4)
13:30	Konec výuky

Vyhodnocení

Stejně jako v předchozích dvou dnech byla hranice 1500 ppm CO₂ překročena krátce po začátku první vyučovací hodiny. Poté, co žáci opustili třídu, se při otevřených oknech (1,4) koncentrace oxidu uhličitého v poměrně krátké době dostala pod hranici 1000 ppm. Díky příznivým klimatickým podmínkám bylo možné v průběhu další výuky intenzivně větrat, díky čemuž nebyl přípustný limit CO₂ v daný den překročen. V případě, kdy byla otevřena všechna okna ve třídě, vznikala v místě měření chladný průvan, což potvrdila i žádost jednoho z žáků o zavření jednoho z oken. Průběh teploty vzduchu během celého dne lze označit jako vyhovující.

Protokol č. 4 z měření kvality vnitřního prostředí ve třídě základní školy v Kostelci na Hané

Datum: 14.12.2017

Doba měření: 8:00 - 12:30

Parametry venkovního vzduchu

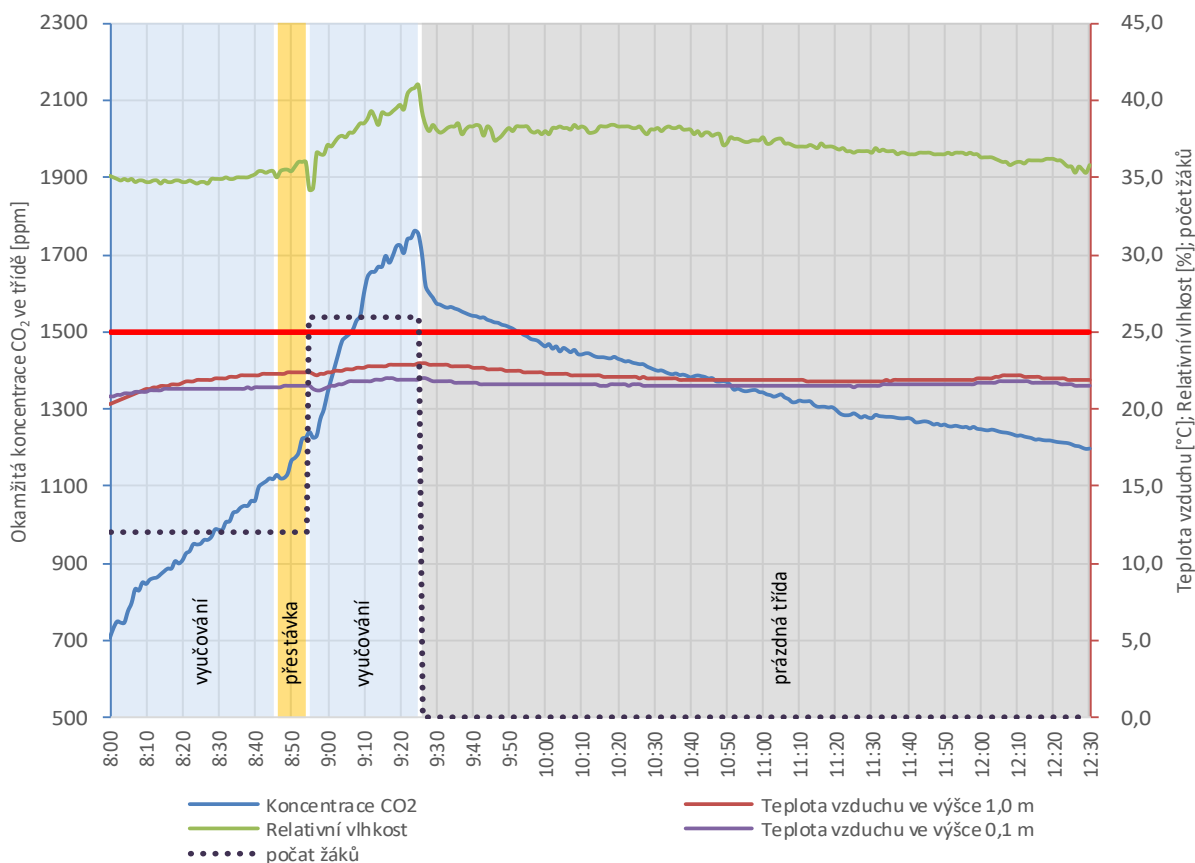
průměrná denní teplota: 2,58 °C

průměrná koncentrace CO₂: 355 ppm

průměrná relativní vlhkost: 75 %

průměrná rychlost větru: 30 km/h

Grafické znázornění průběhu měřených veličin vnitřního vzduchu



Průběh měření

8:00	Zahájení výuky, přítomno 12 žáků 6. třídy a učitel, před začátkem výuky byla okna zavřena
8:45	Konec hodiny, okna zavřena v průběhu celé hodiny i přestávky
8:55	Začátek hodiny, přítomno 26 žáků
9:25	Žáci opouští třídu, začátek měření hodnot pro výpočet intenzity větrání
12:30	Konec měření

Vyhodnocení

Na rozdíl od předchozích dnů nebyl přípustný limit koncentrace CO₂ překročen v průběhu první vyučovací hodiny, což bylo způsobeno nižším počtem žáků. Poté, co žáci opustili třídu bylo možné v průběhu 3 hodin měřit postupný pokles koncentrace CO₂. Výsledky tohoto měření budou později použity při výpočtu intenzity větrání ve třídě.

B.1.5 Výpočet intenzity větrání metodou klesající koncentrace oxidu uhličitého

Oxid uhličitý je jakožto plynou organickou sloučeninu jednoduše detekovatelnou ve vzduchu možné využít jako detekční plyn při měření intenzity větrání vnitřních prostor. Značné množství oxidu uhličitého (40 000 ppm) ve vydechovaném vzduchu může způsobit velmi rychlý nárůst koncentrace tohoto plynu ve vnitřním ovzduší. Navíc také splňuje řadu požadavků, které jsou kladeny na detekční plyny jako chemickou stabilitu a inertnost, hustotu srovnatelnou se vzduchem, nehořlavost v uvažovaných koncentracích atd. Výměna vzduchu může být stanovena na základě venkovních a vnitřních koncentrací, jelikož větrání je jediný prokazatelný způsob jak koncentrace oxidu uhličitého snížit. Použitelnost metody klesající koncentrace je podmíněna řádným směřováním vnitřního vzduchu.

Měření v uvažované třídě probíhalo poté, co žáci po dvou vyučovacíh hodinách opustili třídu. Během této doby vystoupala koncentrace oxidu uhličitého na hranici 1800 ppm. V průběhu 3 hodin byl pak zaznamenáván postupný pokles koncentrace. Cílem měření je stanovení intenzity větrání při klimatických podmínkách znemožňujících přirozené provětrávání třídy, tudíž okna byla v průběhu měření zavřena.

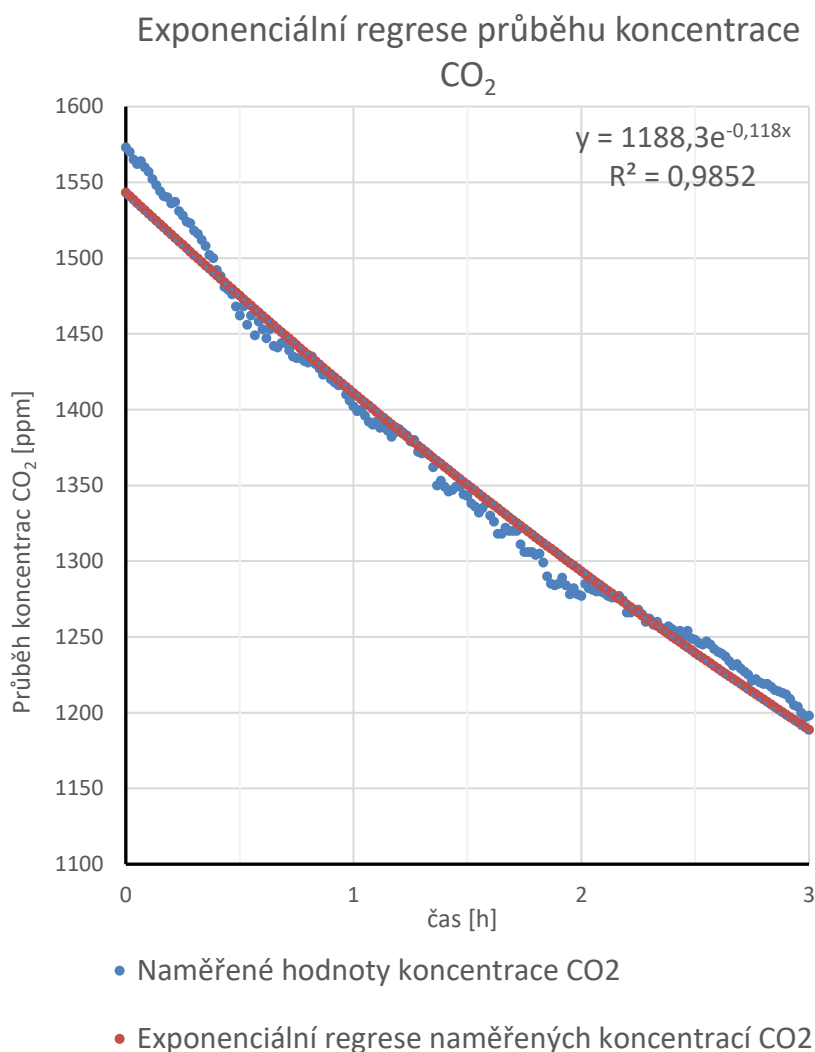
Tato metoda byla zvolena na základě již publikovaných studií (Cui et al., 2015; Turanjanin et al., 2014; Laussmann a Helm, 2011). Pro výpočet intenzity větrání byl využit vztah:

$$C(t) = (C_0 - C_a) * e^{-\lambda * t} + C_a$$

kde je:

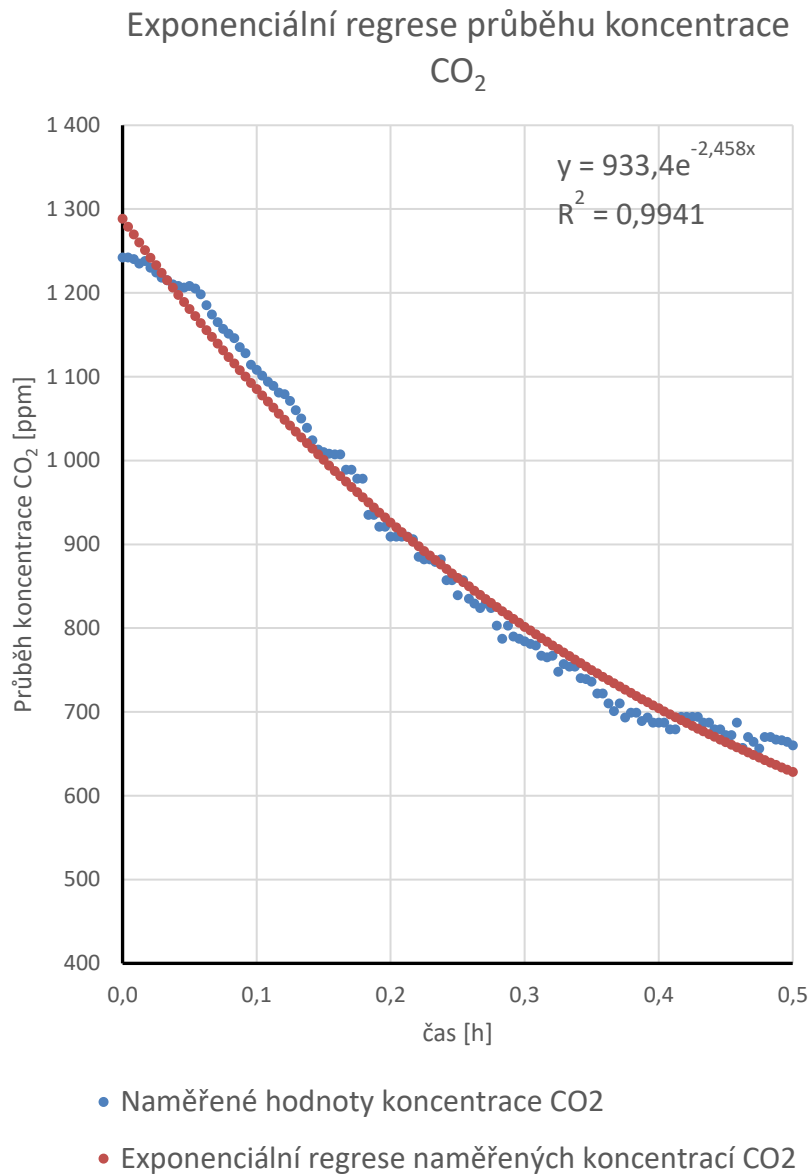
C_t	koncentrace CO ₂ ve vnitřním vzduchu v čase t [ppm]
C_0	počáteční koncentrace CO ₂ ve vnitřním vzduchu [ppm]
C_a	koncentrace CO ₂ ve venkovním vzduchu [ppm]
t	čas [h]
λ	hledaný parametr intenzity větrání [h ⁻¹]

Hledaný parametr intenzity větrání λ byl poté vypočítán pomocí exponenciální regrese s využitím tabulkového procesoru excel. Kvůli nemožnému měření venkovní koncentrace CO_2 v průběhu dne byla hodnota pro výpočet stanovena jako průměr hodnot naměřených před (353 ppm) a po skončení výuky (357 ppm).



Výsledná hodnota intenzity větrání vypočítaná exponenciální regresí naměřených koncentrací oxidu uhličitého se rovná $0,12 \text{ h}^{-1}$. To v případě uvažované třídy o vnitřním objemu $283,8 \text{ m}^3$ znamená objemový průtok přiváděného čerstvého vzduchu $34,1 \text{ m}^3/\text{h}$, resp. $1,1 \text{ m}^3/\text{h}$ na osobu, což jsou hodnoty několikanásobně nižší než požadované.

Pro porovnání byla vypočítána také intenzita větrání při dvou otevřených oknech. Použita byla data z měření, které probíhalo 12.12.2017 (viz protokol z měření č. 2). Měření probíhalo po dobu 30 min v prázdné třídě.



V případě otevřených oken umožňujících přirozené provětrávání třídy byla vypočítána hodnota intenzity větrání 2,5 h⁻¹, což znamená objemový průtok přiváděného čerstvého vzduchu 709,5 m³/h, resp. 22,9 m³/h na osobu.

B.1.6 Závěr měření

Měření prováděné ve třídě základní školy v Kostelci na Hané ukázalo, že funkčnost a použitelnost přirozeného systému provětrávání závisí především na venkovních klimatických podmínkách. V týdnu, kdy měření probíhalo, bylo převážně jasné, slunečné počasí doprovázené teplotami vzduchu, které se pohybovaly nad měsíčním průměrem. Díky tomu bylo možné třídu provětrávat otevřenými okny bez vzniku tepelného diskomfortu. Podle hodnot naměřených při zavřených oknech lze předpokládat, že v zimních měsících, kdy venkovní teploty znemožňují tak časté provětrávání, se budou hodnoty koncentrací oxidu uhličitého pohybovat nad maximálním přípustným limitem 1500 ppm. Naměřená data byla nakonec použita pro výpočet intenzity větrání. V případě, kdy okna byla zavřená, byla hodnota intenzity větrání stanovena jako $0,12 \text{ h}^{-1}$, což znamená přívod čerstvého vzduchu s objemovým průtokem $1,1 \text{ m}^3/\text{h}$ na osobu. V případě otevřených oken byla vypočítána intenzita větrání $2,5 \text{ h}^{-1}$, resp. $22,9 \text{ m}^3/\text{h}$ na osobu.

Závěr

Teoretická část této diplomové práce si kladla za cíl popsat faktory ovlivňující kvalitu vnitřního vzduchu ve školách. Podrobně byly popsány škodlivé látky pocházející jak z venkovního, tak i vnitřního prostředí a jejich působení na zdraví. Zmíněna byla také přímá souvislost mezi kvalitou vnitřního vzduchu, zdravím a produktivitou žáků. V části zabývající se větráním škol byly zmíněny legislativní požadavky, jednotlivé větrací systémy použitelné ve vzdělávacích zařízeních a příklady škol, kde byl při rekonstrukci systém větrání implementován. Teoretickou část práce uzavírá experimentální měření prováděné na základní škole v Kostelci na Hané, kde byly měřeny koncentrace oxidu uhličitého CO_2 , teplota a relativní vlhkost vzduchu. Měření ukázalo závislost mezi použitelností přirozeného provětrávání třídy a venkovními klimatickými podmínkami. Poznatky získané při zpracování teoretické části diplomové práce a při experimentálním měření mohly být následně použity při zpracování prováděcího projektu systému větrání základní školy v Kostelci na Hané, jehož hlavní úlohou je zajištění dostatečného množství přiváděného čerstvého vzduchu do výukových prostor a kabinetů.

Seznam použitých zdrojů

Literatura

ALLAB, Y., KINDINIS, A., CAUSONE, F., TATTI, A., SIMONET, S. a BAYEUL-LAINÉ A.C., (2016). Ventilation rates and thermal comfort assessment in a naturally ventilated classroom.

ASHRAE Standard 62.1., (2010). Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta: American society of heating, refrigerating, and air conditioning engineers.

CIHELKA, J. a kol., (1975). *Vytápění a větrání*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.

CUI, S., COHEN, M., STABAT, P. a MARCHIO, D., (2015). CO₂ tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. In: *Building and Environment*, vol. 84, s. 162-169.

ALFANO, F.R., BELLA, L., BOERSTRA, A., van DIJKEN, F., IANNIELLO, E., LOPARDO, G., MINICHIELLO, F., ROMAGNONI, P. a GAMEIRO DA SILVA, M.C., (2010). REHVA Indoor environment and energy efficiency in schools. In: *REHVA Guidebook no 13 – Part 1 Principles*.

DAISEY, J. M., ANGELL, W. J. a APTE, M. G., (2003). Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. In: *Indoor Air*, vyd. 13 s. 53–64.

DARBY, S., HILL, D., AUVINEN, A., BARROS-DIOS, J.M., BAYSSON, H., BOCHICCHIO, F., DEO, H., FALK, R., FORASTIERE, F., HAKAMA, M., HEID, I., KREIENBROCK, L., KREUZER, M., LAGARDE, F., MÄKELÄINEN, I., C MUIRHEAD, C., OBERAIGNER, W., PERSHAGEN, G., RUANO-RAVINA, A., RUOSTEENOJA, E., SCHAFFRATH ROSARIO, A., TIRMARCHE, M., TOMÁBEK, L., WHITLEY, E., WICHMANN, H.E. a R DOLL, R., (2005). *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*, s. 223-227.

DERBY, M.M., PASCH, R.M., (2017). Effects of low humidity on health, comfort & IEQ. In: *ASHRAE Journal*.

DHALLUIN, A., LIMAM, K., (2014). Comparison of natural and hybrid ventilation strategies used in classrooms in terms of indoor environmental quality, comfort and energy savings. In: *Indoor and built environment*, roč. 23, s. 527-542.

EGGERS, I., MATTHES, P., PANAŠKOVÁ, J., MÜLLER, D., (2009). Facade integrated hybrid ventilation system with automated windows for school buildings. In: *Proceedings of healthy buildings*.

- FÖLDEVÁRY, V., BEKÖ, G., LANGER, S., ARRHENIUS, K. a PETRÁŠ, D., (2017). Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. In: *Building and Environment*, roč. 122, s. 363-372.
- GAO, J., WARGOCKI, P., WANG, Y., (2014). Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils' perceptions and symptoms. In: *Building and Environment*, roč. 75, s. 46-57.
- GRIGG, J., (2012). New insights into air pollution and children's health. In: *Paediatrics and Child Health*, roč. 22, s. 198-200.
- GUAIS, A., BRAND, G., JACQUOT, L., KARRER, M., DUKAN, S., GREVILLOT, G., (2011). *Toxicity of carbon dioxide: a review*. In: *Chem Res Toxicol*, roč. 24, s. 2061-2070.
- HAVERINEN-SHAUGHNESSY, U., MOSCHANDREAS, D. J. a SHAUGHNESSY, R. J., (2010). Association between substandard classroom ventilation rates and students academic achievement. In: *Indoor Air*, roč. 21, s. 121-131.
- HIRŠ, J. a GEBAUER G., (2005). *TZB - vzduchotechnika*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební.
- HVIID, CH.A., PETERSEN, S., (2012). Implementation of ventilation in existing schools: a design criteria list towards passive schools. Paper presented at Passive House Symposium, Brussels, Belgium.
- JANITZ, A.E., CAMPBELL, J.E., MAGZAMEN, S., PATE, A., STONER, J.A., PECK, J.D., (2017). Benzene and childhood acute leukemia in Oklahoma. In: *Environmental Research*, roč. 158, s. 167-173.
- JOKL, M., (1991). *Teorie vnitřního prostředí budov*. 2. přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické.
- LAUSSMANN, D. a HELM, D., (2011). Air change measurements using tracer gases. In: *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality*, s. 365-406.
- MATEUS, N.M., SIMÕES, G.N., LÚCIO, C. a da GRAÇA, G.C., (2016). Comparison of measured and simulated performance of natural displacement ventilation systems for classrooms. In: *Energy and Buildings*, roč. 133, s. 185-196.
- MENDELL, M. J. a HEATH, G. A., (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. In: *Indoor Air*, vyd. 15, s. 27-52.

- MENDELL, M. J., ELISEEVA, E. A., DAVIES, M. M., SPEARS, M., LOBSCHIED, A., FISK, W. J. a APTE, M. G., (2013). Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in California elementary schools. In: *Indoor Air*, vyd. 23, s. 515–528.
- MIJAKOWSKI, M. a NAROWSKI, P., (2016). Indoor climate and energy standard of school buildings with different ventilation strategy.
- MYSEN, M., (2005). Ventilation Systems and their Impact on Indoor Climate and Energy Use in Schools: Studies of air filters and ventilation control. Dizertační práce. Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Technology.
- MYSEN, M., SCHILD, P.G., HELLSTRAND, V., THUNSHELLE, K., (2005). Evaluation of simplified ventilation system with direct air supply through the facade in a school in a cold climate. In: *Energy and Buildings*, vyd. 37, s. 157-166.
- NABINGER, S., PERSILY, A., (2011). Impacts of airtightening retrofits on ventilation rates and energy consumption in a manufactured home. In: *Energy and Buildings*, roč. 43, s. 3059-3067.
- SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., ASSIMAKOPOULOS, M., LIVADA, I., PAVLOU, K., PAPAGLASTRA, M., GAITANI, N., KOLOKOTSA, D. a ASSIMAKOPOULOS, V., (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. In: *Energy and Buildings*, roč. 40, s. 1833-1843.
- SHENDELL, D. G., PRILL, R., FISK, W. J., APTE, M. G., BLAKE, D. a FAULKNER, D., (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. In: *Indoor Air*, vyd. 14, s. 333–341.
- SCHWEIZER, CH., EDWARDS, R.D., BAYER-OGLESBY, L., GAUDERMAN, W.J., ILACQUA, V., JANTUNEN, M.J., LAI, H.K., NIEUWENHUIJSEN, M. a KÜNZLI, N., (2007). Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe. In: *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, roč. 17, s. 170-181.
- SKÁCEL F., GUSCHLOVÁ Z., TEKÁČ V., (2012). *Azbestová a minerální vlákna ve vnitřním prostředí*. In: *Chemické listy*, roč. 106, s. 961-970.
- STABILE, L., DELL'ISOLA, M., RUSSI, A., MASSIMO, A. a BUONANNO, G., (2017). The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. In: *Science of the Total Environment*, vyd. 595, s. 894-902.
- TURANJANIN, V., VUČIĆEVIĆ, B., JOVANOVIĆ, M., MIRKOV, N. a LAZOVIĆ, I., (2014). Indoor CO₂ measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation. In: *Energy Volume*, vol. 77, s. 290-296.
- WAHLSTRÖM, A. M., NIELSEN, J. R., (2001). *Hybrid ventilation retrofit in a school setting*.

WARGOCKI, P. a WYON, D. P., (2007). The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children. In: *HVAC & RESEARCH*, vyd. 13. s. 193-220.

WELLS, E.M., BERGES, M., METCALF, M., KINSELLA, A., FOREMAN, K., DEARBORN, D.G. a GREENBERG, S., (2015). Indoor air quality and occupant comfort in homes with deep versus conventional energy efficiency renovations. In: *Building and Environment*, roč. 93, s. 331-338.

ZACHOVAL, M., (2016). *Vzduchotechnika školského objektu*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Pavel Uher, PhD.

ZHANG X., WARGOCKI, P. a LIAN, Z., (2016). Human responses to carbon dioxide, a follow-up study at recommended exposure limits in non-industrial environments. In: *Building and Environment*, roč. 100, s. 162-171.

ZHANG, C. a LIU, L., (2017a). Ventilation strategies and indoor environment in classrooms: A case study in Denmark. In: *Proceedings of the Healthy Buildings*, s. 310-315.

ZHANG, X., WARGOCKI, P., LIAN, Z. a THYREGOD, C., (2017b). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. In: *Indoor Air*, vyd. 27, s. 47–64.

ZMRHAL, L. a ŠTÁVOVÁ, P., (2011). Balance vlhkosti v obytném prostředí. In: *Vytápění, větrání, instalace*, roč. 20.

ZMRHAL, L., BEGENI, M., HEMERKA, J., JIRÁNEK, M., KUČERA, M. a SKÁCEL, F., (2017). *Větrání škol v souvislostech*. 1. vyd. Praha: Společnost pro techniku prostředí.

Internetové zdroje

American lung association, (2017). *Particle Pollution* [online]. Dostupné z: <http://www.lung.org/our-initiatives/healthy-air/outdoor/air-pollution/particle-pollution.html>

BAŽANT, M., (2015). Úspěšné realizace systémů řízeného větrání ve školských objektech. In: *Tzb-info.cz* [online]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/12374-uspesne-realizace-systemu-rizeneho-vetrani-ve-skolskych-objektech>

BROTÁNEK, A., (2011). Dostavba a rekonstrukce školní budovy ZŠ Slivenec. In: *Tzb-info.cz* [online]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/nizkoenergeticke-stavby/7092-dostavba-a-rekonstrukce-skolni-budovy-zs-slivenec>

DOLEŽÍLKOVÁ, H., (2010). *Kvalita vnějšího a vnitřního vzduchu* [online]. Informační portál TZB-info. Dostupný z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/6486-kvalita-vnejsiho-a-vnitriho-vzduchu>

Integrovaný registr znečišťování, (2002). *Formaldehyd* [online]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/repository/latky/formaldehyd.pdf>

Integrovaný registr znečišťování, (2002). *Oxid uhelnatý* [online]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/oxid_uhelnaty.pdf

Integrovaný registr znečišťování, (2002). *Oxidy síry* [online]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_siry.pdf

MATHAUSEROVÁ, Z., (2007). *Mikroklimatické podmínky vnitřního prostředí pracovišť* [online]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/mikroklimaticke-podminky-vnitriho-prostredi-pracovist>.

PFLUGER, R., (2014). Primary School Hötting, Innsbruck. In: *3encult.eu* [online]. Dostupné z: http://www.3encult.eu/en/casestudies/Documents/3ENCULT_Case%20Study%205.pdf

RENEW SCHOOL, (2017). *ST. LEONHARD PRIMARY SCHOOL AND KINDERGARTEN* [online]. Dostupné z: http://www.renew-school.eu/wp-content/uploads/2015/01/11_St.Leonard_folder.pdf

SCHOOL OF THE FUTURE, (2017). *Germany: Solitude Gymnasium, Stuttgart* [online]. Dostupné z: <https://school-of-the-future.eu/index.php/stuttgart-germany>

WHO, (2013). *Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia.* [online] Dostupné z: http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf?ua=1

Zákonné předpisy

Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší.

Nařízení vlády č. 93/2012 Sb., 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.

Nařízení vlády č. 217/2016 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.

Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.

Vyhláška č. 465/2016 Sb., kterou se mění vyhláška č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, ve znění vyhlášky č. 343/2009 Sb.

Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby, ve znění pozdějších předpisů (vyhláška č. 323/2017 Sb.).

Technické normy a směrnice

ČSN EN 13779 Větrání nebytových budov – Základní požadavky na větrací a klimatizační systémy. ÚNMZ 2010.

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.

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obr. 1 Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí (d'Ambrosio Alfano et al., 2010) ..	9
Obr. 2 Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí	10
Obr. 3 Stupnice odérových hladin koncentrací CO ₂ (Jokl, 1991)	14
Obr. 4 Antropogenní zdroje NO _x (Integrovaný registr znečišťování, 2002)	19
Obr. 5 Ilustrace znázorňující velikost částic polévatého prachu (American lung association, 2017)	20
Obr. 6 Faktory ovlivňující návrh větrání (Hviida a Petersen, 2012)	30
Obr. 7 Schematické znázornění druhů přirozeného větrání	31
Obr. 8 Schéma větrání aerací (Hirš a Gebauer, 2005)	32
Obr. 9 Frekvenční distribuce naměřených koncentrací CO ₂ pro jednotlivé varianty (Allab et al., 2016)	33
Obr. 10 Schémata systémů nuceného větrání	35
Obr. 11 Porovnání spotřeby primární energie systému nuceného větrání a větrání hybridního (Mijakowski a Narowski, 2016)	38
Obr. 12 Schémata znázorňující jednotlivé varianty hybridního systému	39

Obr. 13 Původní stav školy z roku 1968 a stav po rekonstrukci z roku 2009 (tzb-info, 2011)	42
Obr. 14 Ukázka vedení vzduchotechnických rozvodů a umístění distribučních prvků ve třídě (tzb-info, 2011).....	43
Obr. 15 Původní stav školy v roce 1879 a po rekonstrukci v roce 2012 (Atrea, 2012)...	43
Obr. 16 Původní stav školy z roku 1964 a stav po rekonstrukci z roku 2010 (Renew school, 2017).....	45
Obr. 17 Rozvody vzduchotechniky a distribuční prvky ve třídě (Renew school, 2017)..	46
Obr. 18 Základní škola Höttinger, Innsbruck (Pfluger, 2014)	46
Obr. 19 Funkční schéma vzduchotechnického systému a distribuční textilní rukáv (Pfluger, 2014)	47
Obr. 20 Komplex budov Stuttgartského gymnázia (School of the future, 2017)	48
Obr. 21 Centrální systém větrání hlavní budovy (School of the future, 2017).....	49
Obr. 22 Decentrální systém větrání tříd (School of the future, 2017)	49
Obr. 23 Budova základní školy v Kostelci na Hané	51
Obr. 24 Předmětná třída	52
Obr. 25 Půdorysné schéma předmětné třídy	52
Obr. 26 Datalogger Multilogger M1140	53

Seznam tabulek

Tab. 1 Požadavky na tepelný stav prostředí podle vyhlášky č. 465/2016 Sb.	12
Tab. 2 Energetický výdej pro různé lidské činnosti ve školách (Zmrhal, 2017)	12
Tab. 3 Výskyt a koncentrace mikrobů v ovzduší.....	15
Tab. 4 Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení.....	18
Tab. 5 Imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM ₁₀ vyhlášené pro ochranu zdraví lidí.....	21
Tab. 6 Limitní hodinové koncentrace chemických látek a pevných částic ve vnitřním prostředí staveb	23

Tab. 7 Produkce tepla a vodní páry na 1 osobu pro různé druhy činnosti (Zmrhal et al., 2017)	25
Tab. 8 Množství přiváděného čerstvého vzduchu v učebnách, tělocvičnách, šatnách a hygienických zařízeních v zařízeních pro výchovu a vzdělávání a provozovnách pro výchovu a vzdělávání	29

Seznam příloh a výkresů

Příloha č. 1 Technická zpráva a položkový výpis prvků

Příloha č.2 Výpočty a technická specifikace vzduchotechnických jednotek

Složka č.1 Výkresová dokumentace

– Výkres 01 Dimenzační schéma 1.PP	M 1:100
– Výkres 02 Dimenzační schéma 1.NP	M 1:100
– Výkres 03 Dimenzační schéma 2.NP	M 1:100
– Výkres 04 Dimenzační schéma 3.NP	M 1:100
– Výkres 05 Dimenzační schéma 4.NP	M 1:100
– Výkres 06 Půdorys 1.PP, řez A-A', B-B'	M 1:50
– Výkres 07 Půdorys 1.NP, řez A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F'	M 1:50
– Výkres 08 Půdorys 2.NP, A-A', B-B', C-C', D-D'	M 1:50
– Výkres 09 Půdorys 3.NP, A-A', B-B', C-C', D-D'	M 1:50
– Výkres 10, Půdorys 4.NP, A-A', B-B', C-C', D-D', E-E'	M 1:50



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA
TECHNICKÝCH
ZAŘÍZENÍ
BUDOV

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

VĚTRÁNÍ REKONSTRUOVANÉ ŠKOLY

C PROVÁDĚCÍ PROJEKT SYSTÉMU VĚTRÁNÍ

VIZ SAMOSTATNÉ SLOŽKY DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Bc. Jan Hejlek

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

PRAHA 2017/2018