

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

VĚTRÁNÍ BUDOVY ZÁKLADNÍ ŠKOLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Adamus** Jméno: **Marián** Osobní číslo: **419800**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Technika životního prostředí**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Větrání budovy základní školy**

Název bakalářské práce anglicky:

**Ventilation of a Basic School Building**

Pokyny pro vypracování:

Provedte tepelnou bilanci učebny základní školy. Zvolte průtok venkovního vzduchu s ohledem na hygienické podmínky a odvod tepelné zátěže. Navrhněte centrální a lokální systém větrání učeben základní školy a vzájemně je porovnejte z pohledu investičních nákladů, potřeby energie a provozních nákladů. Výpočet a návrh proveďte na zadané základní škole, nebo její ucelené části.

Seznam doporučené literatury:

BEGENI, M., ZMRHAL, V. Potřeba energie na větrání učeben a energetický přínos zpětného získávání tepla. In: Simulace budov a techniky prostředí 2016 ? sborník 9. konference IBPSA-CZ. Brno: IBPSA-CZ, 2016, s. 7-14. ISBN 978-80-270-0772-1.  
ZMRHAL, V., DRKAL, F., JIRANOVÁ, J., MATHAUSEROVÁ, Z., ŠIMÁNEK, V. Metodický pokyn pro návrh větrání škol. SFŽP. 2015.  
ZMRHAL, V. (ed.) Větrání škol v souvislostech. Praha: STP 2016, 2016. 60 s. ISBN 978-80-02-02682-2.  
ZMRHAL, V. Historie, současnost a budoucnost požadavků na větrání škol. Portál TZB - info. 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

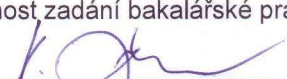
**doc. Ing. Vladimír Zmrhal Ph.D., ústav techniky prostředí FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

20.4.2017

Datum převzetí zadání

Adamus

Podpis studenta

## **Souhrn**

Předmětem bakalářské práce je studie zaměřená na větrání ucelené části základní školy. Byla zpracována tepelná bilance a v návaznosti na ní byla navržena vhodná řešení větrání učeben. Bilance škodlivin poukazuje na důležitost větrání v učebnách kvůli zdraví dětí a vyučujících. Součástí práce je návrh dvou systémů větrání – lokálního a centrálního. Tyto varianty řešení byly navzájem porovnány z hlediska akustiky, potřeby energie, investičních a provozních nákladů.

## **Summary**

The subject of this bachelor thesis is a study focused on the ventilation of the integral part of elementary school. A heat balance was developed here, and appropriate solutions were proposed. Furthermore, a pollutant balance was carried out, which points to the importance of ventilation in classrooms due to the health of children and teachers. At the end of this thesis, a draft of two systems - local and central - is being developed. These variants of solution have been compared to each other in terms of acoustics, energy needs, investment and operating costs.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Větrání budovy základní školy“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Zmrhala, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 23. 6. 2017

Marián Adamus

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Vladimíru Zmrhalovi Ph.D. za jeho ochotu, čas, cenné rady a připomínky při psaní mé bakalářské práce. Panu Ing. Martinovi Bartákovi Ph.D. jsem vděčný za pomoc při práci v simulačním programu Contam. Dále bych chtěl poděkovat panu Mgr. Davidovi Korandovi, který mi poskytl cenné informace z praxe. Samozřejmě také hlavně děkuji rodičům, že mne podporovali v průběhu celých mých studií. Děkuji.

## Obsah

Seznam veličin.....	3
1. Úvod do problematiky .....	5
1.1. Energetická náročnost budov .....	5
1.2. Zdraví osob.....	6
1.3. Ekonomika .....	8
1.4. Možná řešení větrání .....	8
1.4.1. Přirozené větrání.....	8
1.4.2. Nucené větrání.....	9
2. Tepelná bilance učebny .....	10
2.1. Úvod.....	10
2.2. Model .....	11
2.3. Výpočtová část – základní škola.....	15
2.3.1. Případ 1.....	15
2.3.2. Případ 2.....	17
2.3.3. Případ 3.....	18
2.3.4. Případ 4.....	19
2.3.5. Srovnání případů 1–4 .....	19
2.3.6. Srovnání případů 5-7 .....	20
2.4. Výpočtová část – střední škola.....	21
2.4.1. Srovnání případů 8-10 .....	22
2.4.2. Srovnání případů 11-12 .....	23
2.5. Závěr .....	23
3. Škodliviny a koncentrace CO <sub>2</sub> .....	25
3.1. Přirozené větrání – simulace .....	27
3.2. Nucené větrání – simulace .....	34
3.3. Shrnutí.....	38
4. Návrh lokálního a centrálního systému větrání a porovnání provozních a investičních nákladů.....	39
4.1. Návrh a volba vzduchotechnických jednotek a jejich provedení.....	39
4.2. Decentralizovaná lokální jednotka.....	39
4.3. Centrální jednotka .....	40
4.4. Potřeba energie na větrání .....	41
4.4.1. Potřeba energie na pohon ventilátoru .....	41

4.4.2. Potřeba energie na ohřev vzduchu.....	42
4.5. Provozní náklady.....	43
4.6. Investiční náklady .....	44
4.7. Shrnutí.....	45
5. Závěr .....	48
Použitá literatura .....	49

## Seznam veličin

$E_{el}$	- potřeba energie na pohon ventilátoru	[Wh/rok]
$H$	- výška člověka	[m]
$M$	- měrný metabolický tok	[met]
$P_{AHU}$	- příkon jednotky	[W]
$P_i$	- příkon ventilátoru v daném čas. úseku	[W]
$P_o$	- příkon odvodního ventilátoru	[W]
$P_p$	- příkon přívodního ventilátoru	[W]
$Q_{celkem}$	- celkový tepelný výkon	[W]
$Q_{cit,u}$	- tepelný zisk od vyučujícího	[W]
$Q_{cit,ž}$	- tepelný zisk od žáků	[W]
$Q_{prostupem}$	- ztráty prostupem	[W]
$Q_{větráním}$	- ztráty větráním	[W]
$Q_{zisky}$	- zisky od osob	[W]
$S$	- plocha potrubí	[m <sup>2</sup> ]
$S_j$	- plocha	[m <sup>2</sup> ]
$SFP_{AHU}$	- měrný příkon ventilátoru	[W · s/m <sup>3</sup> ]
$U_j$	- součinitel prostupu tepla	[W/m <sup>2</sup> · K]
$\dot{V}$	- průtok vzduchu jednotkou	[m <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_{CO_2}$	- produkce metabolického $CO_2$	[l/h]
$V_m$	- objem místnosti	[m <sup>3</sup> ]
$V_u$	- průtok vzduchu na učitele	[m <sup>3</sup> /h · os]

$V_e$	- průtok vzduchu na žáka	$[\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{os}]$
$c$	- měrná tepelná kapacita	$[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$
$m$	- hmotnost člověka	$[\text{kg}]$
$n_H$	- intenzita větrání	$[\text{h}^{-1}]$
$n_u$	- počet vyučujících	$[-]$
$n_{\check{z}}$	- počet žáků	$[-]$
$t_e$	- teplota venkovního vzduchu	$[\text{°C}]$
$t_{ej}$	- venkovní výpočtová teplota	$[\text{°C}]$
$t_i$	- teplota vnitřního vzduchu	$[\text{°C}]$
$t_p$	- teplota přiváděného vzduchu	$[\text{°C}]$
$v$	- rychlost	$[\text{m}/\text{s}]$
$\rho$	- hustota vzduchu	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\tau_i$	- časový úsek	$[\text{h}]$



# 1. Úvod do problematiky

Na problematiku větrání škol je potřeba se dívat z trochu širší perspektivy, protože se dotýká více než jednoho tématu.

## 1.1. Energetická náročnost budov

V posledních letech většina základních a středních škol podstoupila v rámci revitalizace různé formy rekonstrukcí. Kvůli snaze ušetřit své finanční zdroje (alespoň z hlediska dlouhodobého) se jednalo především o zateplení obvodových konstrukcí budov. Pokud však v těchto školách není optimalizovaný systém větrání, pak představa o šetrném zacházení s energiemi, a tudíž i finančním rozpočtem školy, bývá bohužel velmi zkreslená.

Problém nastává ve chvíli, kdy žák, nebo učitel, kvůli potřebě vyvětrat otevře okno. Je pochopitelně nezbytné vyměnit vzduch znečištěný větší koncentrací škodlivých látek, které se produkují během pobytu osob v místnostech školy, nebo vnikají z venkovního prostředí. Řádné větrání vede na spotřebu energie na ohřev větracího vzduchu, proto je snaha teplo obsažené v odpadním vzduchu využít pro předehřev vzduchu venkovního.

Dobře navržený a optimalizovaný systém větrání může poskytnout konečně smysluplné řešení otázky reálných úspor po energetické stránce. Naopak bez tohoto opatření je vysoce pravděpodobné, že investice, které škola vložila do nákladného zateplování budov, nebudou plnohodnotně využity, protože kvůli úniku energie otevřenými okny nemusí vůbec přinášet předpokládané úspory. Jako příhodné se zdá přirovnání, které zde můžeme brát poměrně doslovně: „Škola bez řádného větracího systému vyhazuje peníze ven oknem“.

## 1.2. Zdraví osob

Někdo by mohl namítnout, že problém se zbytečným únikem energie by bylo možné vyřešit pouhou rozumnější manipulací s okny jako například dbát na to, aby byla okna otevřena pouze kratší dobu. Dalším protiargumentem může být prohlášení, že v létě se v učebnách stejně netopí. To je pravda. V létě je možné okna klidně používat. Vzduch v místnostech však není potřeba vyměňovat jen kvůli jeho teplotě. Příliš vysoká teplota ovzduší, například v letním období, je samozřejmě také důvod k větrání, ale hlavním důvodem je velmi rychlé znečišťování vzduchu oxidem uhličitým, což se týká jak období zimního, tak i letního. Proto je nutné vzduch vyměňovat průběžně a hlavně kontrolovaně. Lidský faktor nemůže působit jako objektivní vyhodnocovač obsahu škodlivin v ovzduší. Stejně tak člověk nedokáže řídit větrání stejně spolehlivě a šetrně jako automatický provoz.

Větrání je nutné provádět zejména kvůli nečistotám v ovzduší, které mohou ovlivňovat zdraví pobývajících osob. Škodliviny produkované osobami, z nábytku a podobně, se v nevětraných prostorech koncentrují. Jejich vyšší koncentrace na lidi působí negativním způsobem a při překročení některých limitů, ohrožují jejich zdraví.

Množství vzduchu, které je potřeba vyměnit, závisí na několika faktorech. Důležité je znát obsazenost místnosti, kterou je potřeba větrat. Kromě počtu osob je nutné znát také druh aktivity, kterou budou tyto osoby vykonávat a dále také jejich věk a fyzické proporce. Pro přehled je zde uvedena tabulka 1, která znázorňuje doporučené množství přiváděného venkovního vzduchu na žáka v  $\text{m}^3/\text{h}$ . Údaje z tabulky 1, které určují množství větracího vzduchu právě na základě věku, jsou použity pro výpočetní návrh (viz dále). Velmi dobře poslouží při výběru větrací jednotky právě dle orientačních výkonnostních požadavků, které má splňovat. Závazným však je hygienický předpis [10] udávající množství přiváděného venkovního vzduchu do učebny 20 až 30  $\text{m}^3/\text{h}$  na žáka. Optimalizace samotné větrací jednotky pak spočívá v nastavení práce jednotky podle čidla  $\text{CO}_2$  a aktuálních hodnot o koncentraci  $\text{CO}_2$ .

Tab. 1 - Minimální množství venkovního vzduchu [8]

<b>Množství venkovního vzduchu [m<sup>3</sup>/h.žáka]</b>			
<b>3 – 6 let</b>	<b>6 – 10 let</b>	<b>10 – 15 let</b>	<b>15 – 18 let</b>
<b>Školka</b>	<b>1. stupeň ZŠ</b>	<b>2. stupeň ZŠ</b>	<b>SŠ</b>
10	12	18	20

Hlavní informací, kterou je vhodné se při výpočtech, celkovém návrhu a výběru větracích jednotek řídit, je však maximální přípustná hodnota ppm, předepsaná vyhláškou č. 268/2009 Sb. dle platného znění [1], dle které koncentrace oxidu uhličitého nesmí v obytných prostorách přesahovat 1500 ppm.

Jednotka ppm je fyzikálně bezrozměrná jednotka, která slouží jako pomůcka k vyjádření objemové koncentrace nějaké látky (pochází z anglického parts per million). Tato jednotka se využívá u nízkých koncentrací a vyjadřuje počet částic látky, která je hodnocená na 1 milion částic ostatních.

Pro zajímavost je zde uvedena tabulka č. 2, znázorňující koncentraci CO<sub>2</sub> v ovzduší a její vliv na člověka.

Tab. 2 - Koncentrace CO<sub>2</sub> a vliv na člověka [5]

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

### **1.3. Ekonomika**

Ve chvíli, kdy si vedení školy opravdu uvědomuje důležitost větrání a přeje si pro zlepšení studijních podmínek svých žáků něco udělat, vstupuje do popředí problematiky otázka finanční. Stejně jako u zateplování obvodových konstrukcí budov, je i u větrání, počáteční investice poměrně nákladná. Proto je nutné celý větrací systém řešit komplexně nejen z pohledu šetrnosti energií a provozních nákladů, ale také z pohledu počátečních investic. Vybírat z větracích jednotek se bude tedy nejen podle jejich výkonnostních charakteristik, ale také podle jejich ceny a provozu.

### **1.4. Možná řešení větrání**

Pro lepší rozhodování o tom, který větrací systém je nejvhodnější, je dobré mít přehled o možných řešení. Proto je zde uvedeno základní rozdělení větracích systému spolu s obecným popisem.

Větrací systémy se běžně dělí na dva základní typy, kterými jsou přirozené a nucené větrání.

#### **1.4.1. Přirozené větrání**

Tento způsob výměny vzduchu je tvořen přirozenými zdroji pohybu vzduchu, kterými jsou rozdíly teplot uvnitř a vně místnosti, svislé vzdálenosti větracích otvorů a tlakové účinky větru. Na první pohled je zjevné, že tyto zdroje pohybu vzduchu jsou zcela nespolehlivé, a proto není možné tímto způsobem trvale zajistit požadovanou kvalitu vnitřního prostředí. Další významnou nevýhodou tohoto systému je neřízená lokální distribuce chladného vzduchu, což s sebou přináší nepohodlí. Zároveň je tato metoda ochuzena o možnost filtrace. Nutno

podotknout, že při větrání otevřenými okny se zde objevuje také bezpečnostní riziko pro žáky.

V souhrnu se dá říct, že ačkoliv je přirozené větrání nejlevnějším řešením a prakticky nic nestojí, zdaleka nepřináší vyhovující řešení daných požadavků. Jak později vyplyne z tepelné bilance, větrání přirozeným způsobem neobsahuje technologii zpětného získávání tepla a tím pádem nesplňuje ani požadavek na snížení energetické náročnosti budovy.

### 1.4.2. Nucené větrání

Nucené větrání se dále dělí na větrání podtlakové, přetlakové a rovnotlaké.

**Podtlakové větrání** se využívá například v místnostech jako jsou toalety, kde je nežádoucí, aby unikal zápach do vedlejších prostor.

**Přetlakové větrání** se používá v případech, kde je požadavek na zajištění opravdu čistého prostředí, jako jsou například operační sály, aby bylo zaručeno, že do místnosti nebudou přiváděny nežádoucí látky, nebo mikroorganismy. Tento způsob vyžaduje relativně vysoké průtoky vzduchu pro zajištění potřebného přetlaku.

Pro případ, který zde bude rozveden, je možno použít klasické **rovnotlaké větrání**, protože na větrání učeben nejsou, kromě odvodu škodlivin a dodávání čerstvého vzduchu, žádné další speciální požadavky.

Výhody a nevýhody nuceného rovnotlakého větrání jsou přesně opačné než u přirozeného větrání. Na rozdíl od přirozeného větrání, zdrojem pohybu vzduchu je ventilátor, což umožňuje přivádět vzduch kontinuálně v takovém množství, jaké je zrovna zapotřebí. Navíc je zde možnost distribuovat přiváděný vzduch takovým způsobem, aby nijak nenarušoval pohodlí a pozornost lidí uvnitř místnosti. Díky těmto vlastnostem je snadné zajistit požadavky na kvalitu vnitřního prostředí. Navíc se tímto způsobem dá přiváděný vzduch filtrovat od případných nečistot a v neposlední řadě lze využít zpětné získávání tepla. Díky všem těmto mechanickým

a elektronickým prvkům jsou investiční náklady oproti přirozenému větrání, značně vyšší.

Při návrhu tohoto systému je nutné dbát zásad umístění nasávání venkovního vzduchu tak, aby přiváděný vzduch do systému byl co možná nejméně znehodnocený škodlivinami ze silniční komunikace, různými pachy, vyšší koncentrací prachu, nebo jinými látkami. Takto znehodnocený vzduch by bylo nutné nějakým způsobem upravit, což by zbytečně navýšilo finanční náklady. Případně by byl dodávaný vzduch jen méně kvalitní než vzduch uvnitř budovy. Ideální umístění sání venkovního vzduchu je v méně osluněných místech.

Stejně tak je vhodné dodržovat doporučení o umístění výdechů, odvádějících znehodnocený vzduch. Ty by měly být co nejdál od míst, kde se vzduch nasává.

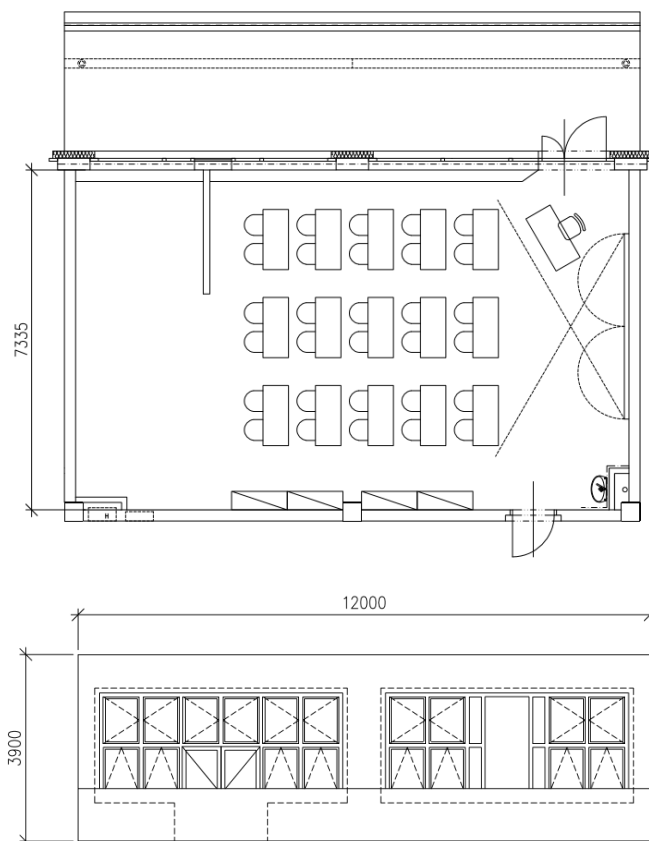
## **2. Tepelná bilance učebny**

### **2.1. Úvod**

Pro návrh větracích systémů ať už lokálních, nebo centrálních, je třeba znát vlastnosti prostoru, ve kterém bude navrhovaný systém realizován. Pro analýzy bude vytvořen model učebny, na kterém budou provedeny potřebné výpočty. V této části práce bude znázorněno, jak tepelnou bilanci učebny ovlivní množství přiváděného venkovního vzduchu do učebny dané hygienickým předpisem [10] (20 až 30 m<sup>3</sup>/h na žáka), metodickým pokynem [8] a množství vzduchu odpovídající přirozenému větrání infiltrací (aktuální stav).

## 2.2. Model

Pro analýzy v rámci bakalářské práce bude použita učebna základní školy na Zličíně, která je ve fázi projektu.



Obr. 2 – Půdorys učebny s pohledem na fasádu otočenou na sever

Na obr. 1 je znázorněna řešená učebna ZŠ (půdorys a pohled na fasádu). Celkový objem místnosti činí na  $343,28 \text{ m}^3$  a plocha stěny fasády je  $46,8 \text{ m}^2$ . Tato učebna je obklopena dalšími učebnami se stejnými teplotami vzduchu ( $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ), a proto je tepelný tok mezi nimi v tepelné bilanci brán jako nulový. Je počítáno s plochou fasády a plochou, která sousedí s chodbou o teplotě vzduchu  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro výpočet je nutné znát prostup tepla jednotlivých obvodových konstrukcí. Tabulka 3 znázorňuje součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí, jak je pro tento případ udává norma ČSN 73 0540-2 [2].

Tab. 3 - Součinitele prostupu tepla pro dané konstrukce

Konstrukce	U [W/m <sup>2</sup> K]
stěny-fasáda	0,25
okna	1,5
stěny-chodba	2

Pro výpočty je zapotřebí znát počet osob a jejich produkci tepla. V tomto případě se bude počítat s 30 dětmi a 1 vyučujícím. Jejich orientační tepelné zisky je možno vyčíst z tabulky 4.

Tab. 4 – Tepelné zisky žáka ZŠ a SŠ [7]

Typ učebny	Věk dětí	$Q_{cit,os}$ [W/os]	$V_{e,os}$ [m <sup>3</sup> /h.os]
ZŠ – I. st.	10 let	57	12
SŠ	18 let	95	20

Tepelná bilance bude provedena tak, že se sečtou veškeré tepelné zisky a ztráty, které v modelové situaci hrají roli, čímž bude zjištěn celkový tepelný výkon (značeno  $Q_{celkem}$ ). Tento tepelný výkon bude vyjadřovat, jak bude situace vypadat za daných podmínek. Navolením různých podmínek vznikne průběh celkového tepelného výkonu v místnosti, právě v závislosti na veličinách, které lze ovlivnit. Tepelná bilance místnosti ukáže, zda je místnost tepelně zatížena, nebo zda je nutné teplo dodávat. Tepelná bilance je dána součtem následujících členů:

$$Q_{celkem} = Q_{zisky} + Q_{větráním} + Q_{prostupem} \quad [W] \quad (1)$$



Kde jednotlivé členy znamenají:

- $Q_{celkem}$  - celkový tepelný výkon [W]
- $Q_{zisky}$  - zisky od osob [W]
- $Q_{větráním}$  - ztráty větráním [W]
- $Q_{prostupem}$  - ztráty prostupem [W]

Pokud se jedná o tepelnou ztrátu, člen v rovnici bude mít záporné znaménko. Zisk má znaménko kladné.

$$Q_{zisky} = n_z \cdot Q_{cit,z} + n_u \cdot Q_{cit,u} \quad [W] \quad (2)$$

Kde jednotlivé členy znamenají:

- $Q_{zisky}$  – zisky od osob [W]
- $n_z$  - počet žáků [–]
- $Q_{cit,z}$  - tepelný zisk od žáků [W]
- $n_u$  - počet vyučujících [–]
- $Q_{cit,u}$  - tepelný zisk od vyučujícího [W]

Pro výpočet ztrát větráním je zapotřebí znát průtok vzduchu na osobu a rozdíl mezi teplotou vnitřního vzduchu a teplotou vzduchu přiváděného. Na teplotu vnitřního vzduchu je požadavek, aby byla konstantní a to 22 °C. Protože návrh je prováděn na zimní extrém, s venkovní teplotou začínáme na -15 °C. Bilance byla realizována do teploty venkovního vzduchu  $t_e=13$  °C. Při této teplotě vzduchu již není třeba větrat nuceně a stačí větrat přirozeným způsobem – otevřenými okny.

$$Q_{\text{větráním}} = \frac{(n_z \cdot V_e + n_u \cdot V_u)}{3600} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i - t_p) \text{ [W]} \quad (3)$$

Kde jednotlivé členy znamenají:

- $Q_{\text{větráním}}$  - ztráty větráním [W]
- $V_e$  - průtok vzduchu na žáka [ $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$ ]
- $V_u$  - průtok vzduchu na učitele [ $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$ ]
- $\rho$  - hustota vzduchu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $c$  - měrná tepelná kapacita [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]
- $t_i$  - teplota v místnosti [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $t_p$  - venkovní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Aby bylo možné vypočítat ztráty prostupem, je nutné znát jednotlivé součinitele prostupu tepla povrchů, které se ve výpočtech objevují. Jak již bylo výše zmíněno, pro bilanci jsou zajímavé plochy stěn sousedící s chodbou a s venkovním prostředím. Plocha sousedící s venkovním prostředím se navíc rozdělí na plochu stěny a plochu zasklení. Jednotlivé součinitele prostupu tepla jsou uvedeny v tabulce 3.

$$Q_{\text{prostupem}} = \sum_1^n U_j \cdot S_j \cdot (t_{ij} - t_{ej}) \text{ [W]} \quad (4)$$

Kde jednotlivé členy znamenají:

- $Q_{\text{prostupem}}$  - ztráty prostupem [W]
- $U_j$  - součinitel prostupu tepla [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]
- $S_j$  - plocha [ $\text{m}^2$ ]
- $t_{ij}$  - vnitřní požadovaná teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $t_{ej}$  - venkovní výpočtová teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Tab. 5 – Zkoumané případy

Případ	Škola	Ve - průtok vzduchu na žáka	n - intenzita větrání	ZZT
		[m <sup>3</sup> /h · os]	[h <sup>-1</sup> ]	[%]
1	ZŠ	-	0,1	0
2	ZŠ	12	-	0
3	ZŠ	20	-	0
4	ZŠ	30	-	0
5	ZŠ	12	-	80
6	ZŠ	20	-	80
7	ZŠ	30	-	80
8	SŠ	-	0,1	0
9	SŠ	20	-	0
10	SŠ	30	-	0
11	SŠ	20	-	80
12	SŠ	30	-	80

## 2.3. Výpočtová část – základní škola

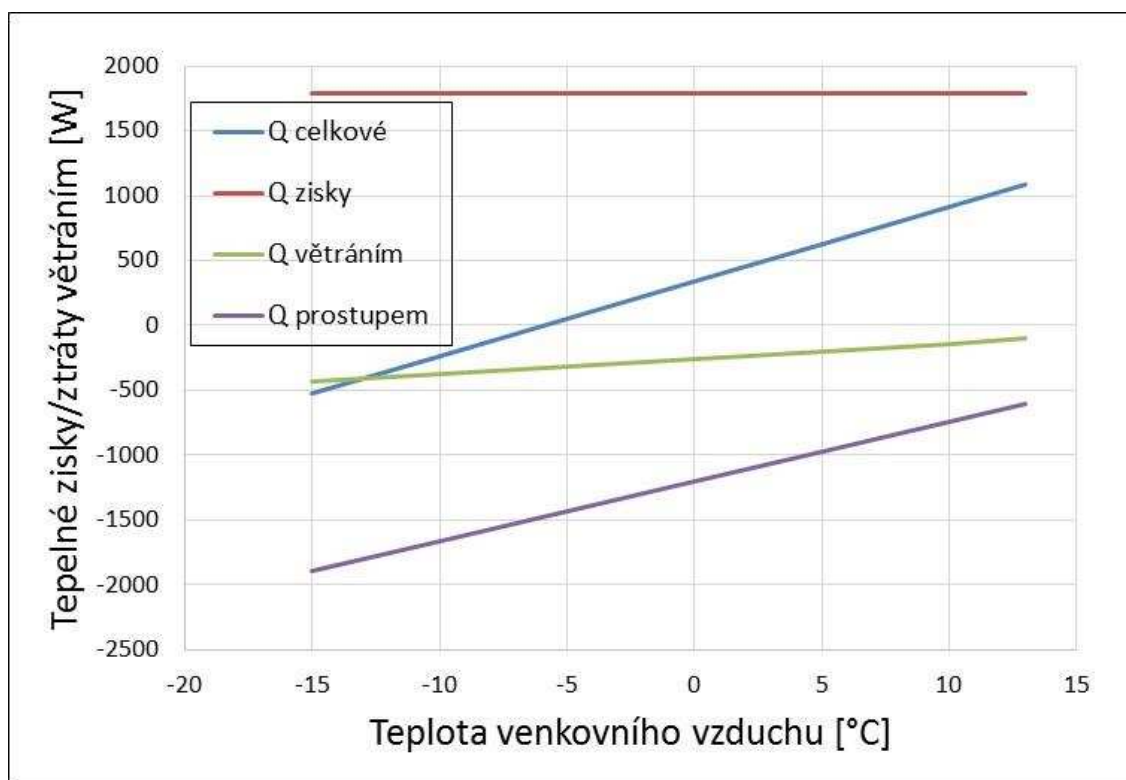
### 2.3.1. Případ 1

Případ 1 popisuje aktuální stav většiny učeben v Čechách. Množství přiváděného vzduchu v tomto případě je nedostatečné z hlediska hygienických předpisů (intenzita větrání  $n = 0,1 \text{ h}^{-1}$ ). Jedná se o přirozené větrání infilrací. Pro konstantní teplotu  $t_i = 22 \text{ °C}$  a měnící se teplotu  $t_e$  uvádí tabulka 6 výsledky tepelných zisků a ztrát.

Tab. 6 – Tepelné zisky a ztráty pro případ 1

$t_i$ [°C]	$t_e$ [°C]	Q celkové [W]	Q zisky [W]	Q větráním [W]	Q prostupem [W]
22	-15	-525	1790	-427	-1887
22	-10	-237	1790	-370	-1658
22	-5	50	1790	-312	-1428
22	0	338	1790	-254	-1198
22	5	625	1790	-196	-968
22	10	913	1790	-139	-739
22	13	1085	1790	-104	-601

Pokud se vynesou vypočítané hodnoty tepelných zisků a ztrát do grafu v závislosti na teplotě  $t_e$ , vznikne následující obr. 2.

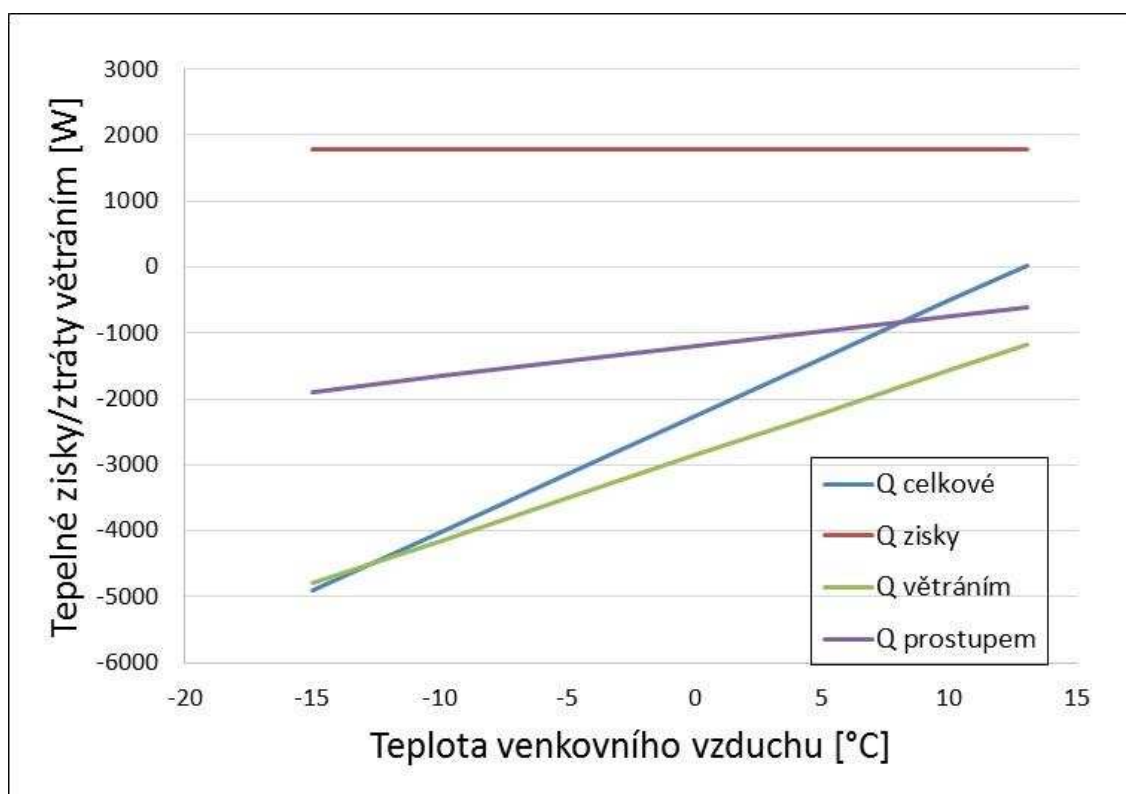


Obr. 2 – Příklad 1

Na obr. 1 jsou vidět tepelné zisky od žáků. Ty zůstávají stále konstantní. Dále jsou zde tepelné ztráty prostupem. Pro základní školu se tyto hodnoty nebudou již lišit. Jediné změny budou vidět pouze na přímce, která znázorňuje tepelné zisky/ztráty větráním a na přímce znázorňující celkové zisky/ztráty, která je jí ovlivněná. V případě 1 se přímka „Q větráním“ ve zkoumaném teplotním rozsahu vyskytuje v oblasti ztrát po celou dobu, avšak tyto ztráty jsou díky nízkému průtoku malé. „Q celkové“ se tak do oblasti zisků dostane okolo -6 °C.

### 2.3.2. Případ 2

Případ 2 popisuje stav, kdy je do učebny přiváděno  $12 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os.}$  Spolu s učitelem činí objemový průtok vzduchu  $385 \text{ m}^3/\text{h.}$  Není zde použité zpětné získávání tepla. Výpočty proběhly obdobným způsobem jako u předchozího případu. Následuje již pouze grafické znázornění vypočítaných hodnot.

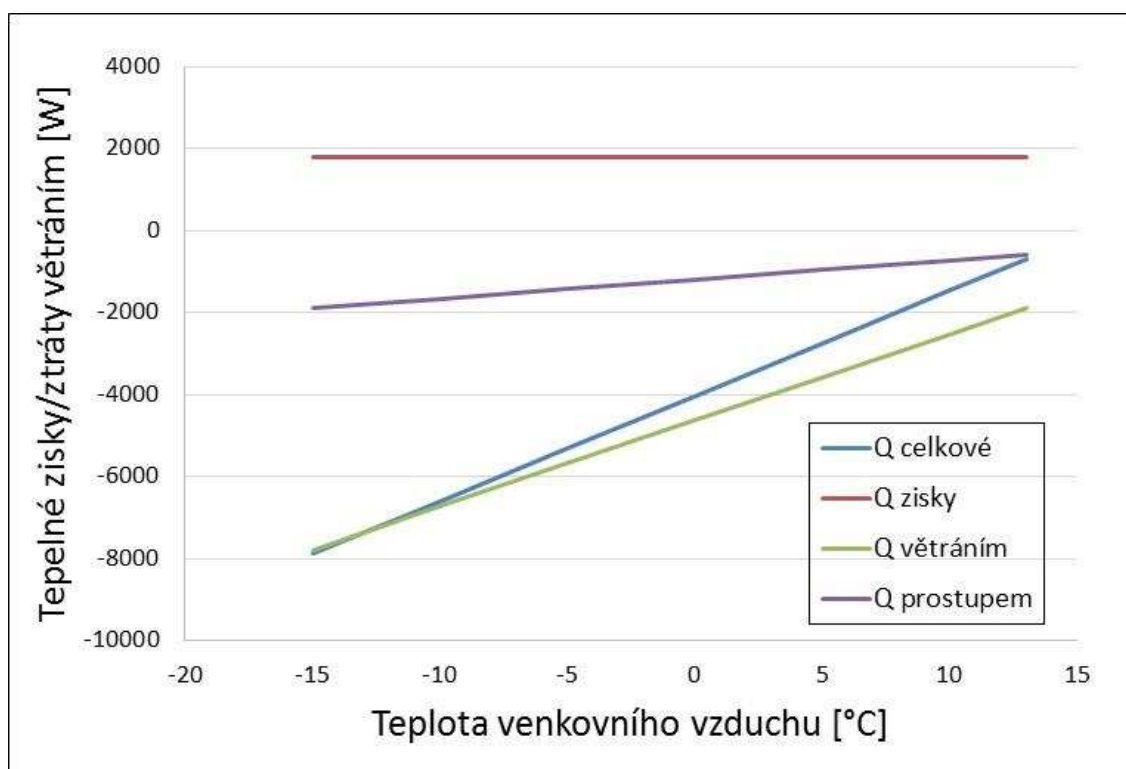


Obr. 3 – Případ 2

V případě 2 je objemový průtok přiváděného vzduchu výrazně větší, než v případě 1. Díky tomu je vidět, jak se tepelné ztráty větráním zvětšily. „Q celkové“ se tak do oblasti zisků dostává až při  $13 \text{ °C}$ , kdy již není nutné využívat nuceného větrání a lze větrat okny. Tepelné zisky od osob a ztráty prostupem zůstávají stále stejné.

### 2.3.3. Příklad 3

Příklad 3 popisuje stav, kdy je do učebny přiváděno  $20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os.}$  Spolu s učitelem činí objemový průtok vzduchu  $625 \text{ m}^3/\text{h.}$  Není zde použité zpětné získávání tepla. Výpočty proběhly obdobným způsobem jako u předchozího případu. Následuje již pouze grafické znázornění vypočítaných hodnot.



Obr. 4 – Příklad 3

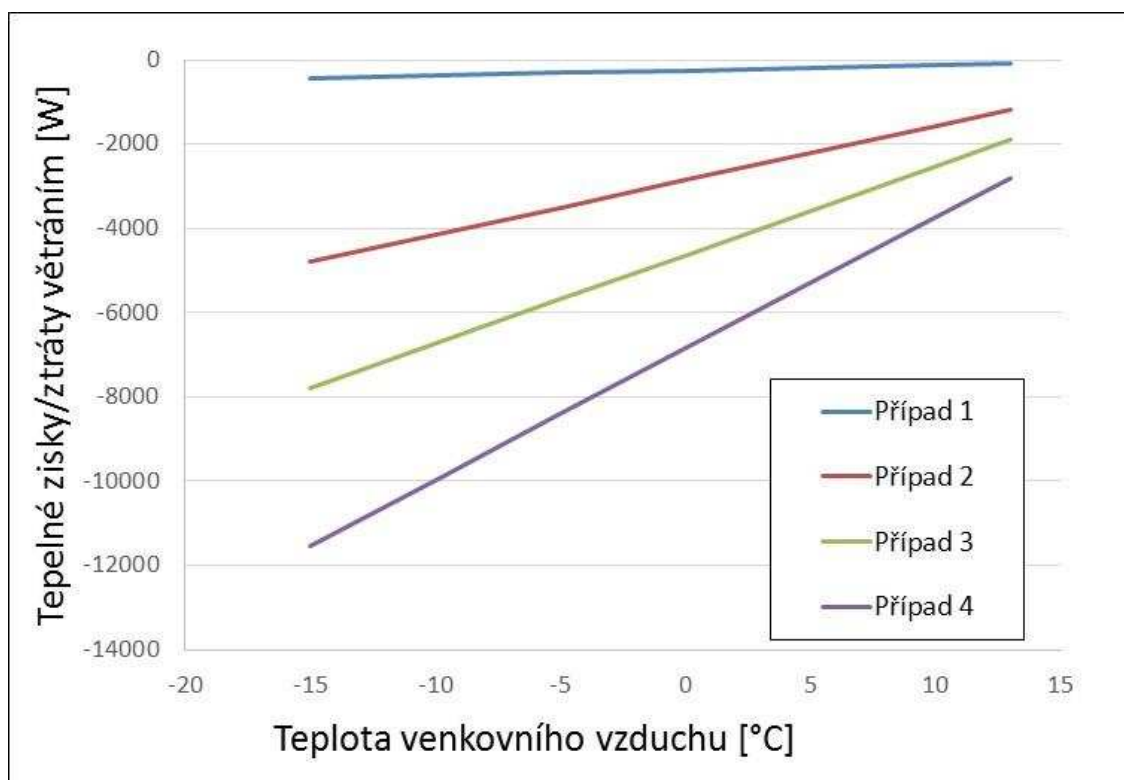
Příklad 3 má opět objemový průtok přiváděného vzduchu výrazně větší, než je v případě 2. Díky tomu jsou zde větší tepelné ztráty a do oblasti zisků se celková bilance ve zkoumaném teplotním rozsahu vůbec nedostane.

### 2.3.4. Příklad 4

Příklad 4 popisuje stav, kdy je do učebny přiváděno  $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os.}$  Spolu s učitelem činí objemový průtok vzduchu  $925 \text{ m}^3/\text{h.}$  Není zde použité zpětné získávání tepla. Výpočty proběhly obdobným způsobem jako u předchozího případu. Z předchozích případů je jasné, že případ 4, který má větší objemový průtok přiváděného vzduchu než všechny předchozí, se do oblasti zisků také vůbec nedostane. Není nutné ho proto vykreslovat.

### 2.3.5. Srovnání případů 1–4

Pro srovnání následuje obrázek 5, na kterém jsou znázorněny průběhy tepelných zisků a ztrát větráním.

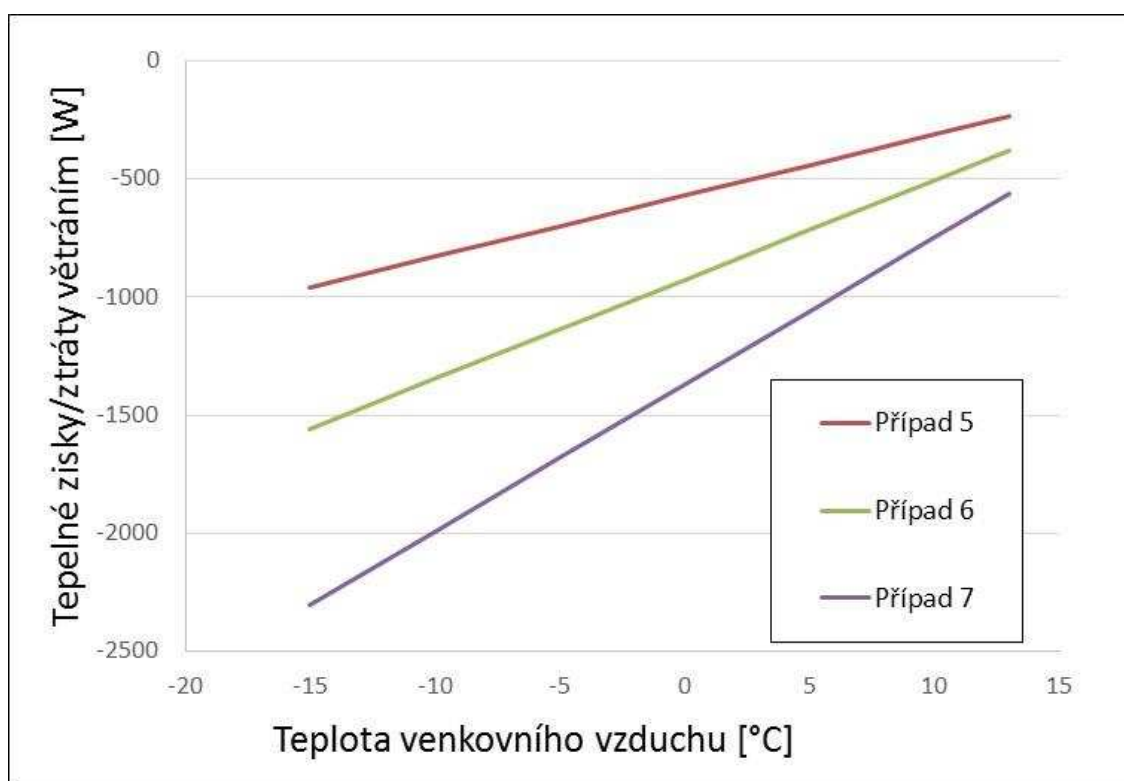


Obr. 5 – Srovnání případů 1–4

Všechny případy jsou počítány pro stejnou učebnu s 30 žáky a jedním vyučujícím. Příklad 1, znázorňuje situaci, kdy větrání probíhá přirozeně infiltrací. Tepelné ztráty proto nejsou vysoké, ale z hlediska hygienických požadavků je toto větrání zcela nevyhovující. V případě 2 byl objemový průtok přiváděného vzduchu  $12 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$  stanoven dle metodického pokynu [8]. Objemové průtoky  $20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$  a  $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$  v případech 3 a 4 jsou stanoveny hygienickým předpisem [10].

### 2.3.6. Srovnání případů 5-7

Případy 5, 6, a 7 jsou v podstatě stejné jako případy předchozí, až na to, že je navíc použito zpětné získávání tepla viz tab. 5. Na případ 1, kde se jednalo o přirozené větrání, nelze zpětné získávání tepla aplikovat.



Obr. 6 – Srovnání případů 5–7



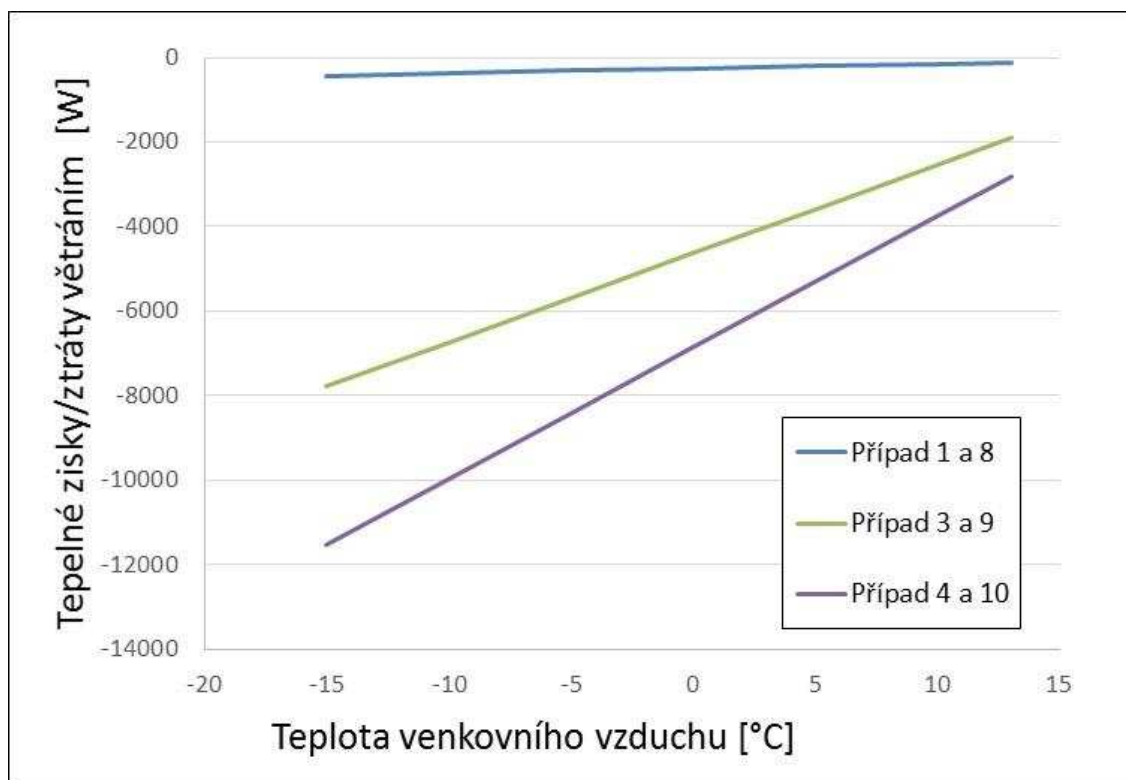
Z obr. 6 je vidět, že díky zpětnému získávání tepla se tepelné ztráty výrazně snížily. Konkrétně o 80 %, což je účinnost výměníku tepla, která byla použita ve výpočtech.

#### **2.4. Výpočtová část – střední škola**

Při snaze zhodnotit stejným způsobem i střední školu, by jedinou změnou ve vstupních parametrech při provádění analýzy byl tepelný výkon, který vydávají studenti. Oproti 58 W na žáka by se počítalo s 80 W na studenta. Zvýšením výkonu studentů se zvýší tepelné zisky v učebně z výpočetních 1790 W na 2480 W. Pokud by byl objemový průtok přiváděného vzduchu na základní škole stanoven dle metodického pokynu [8] na  $12 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$ , na střední škole by se tepelné ztráty větráním téměř zdvojnásobily kvůli vyšším hygienickým nárokům na průtok vzduchu (a to ze  $12 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$  na  $20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$ ). Ve výsledku to znamená, že tepelné ztráty učebny na střední škole budou větší než na základní škole, a to i přesto, že tepelný zisk od studentů bude vyšší.

### 2.4.1. Srovnání případů 8-10

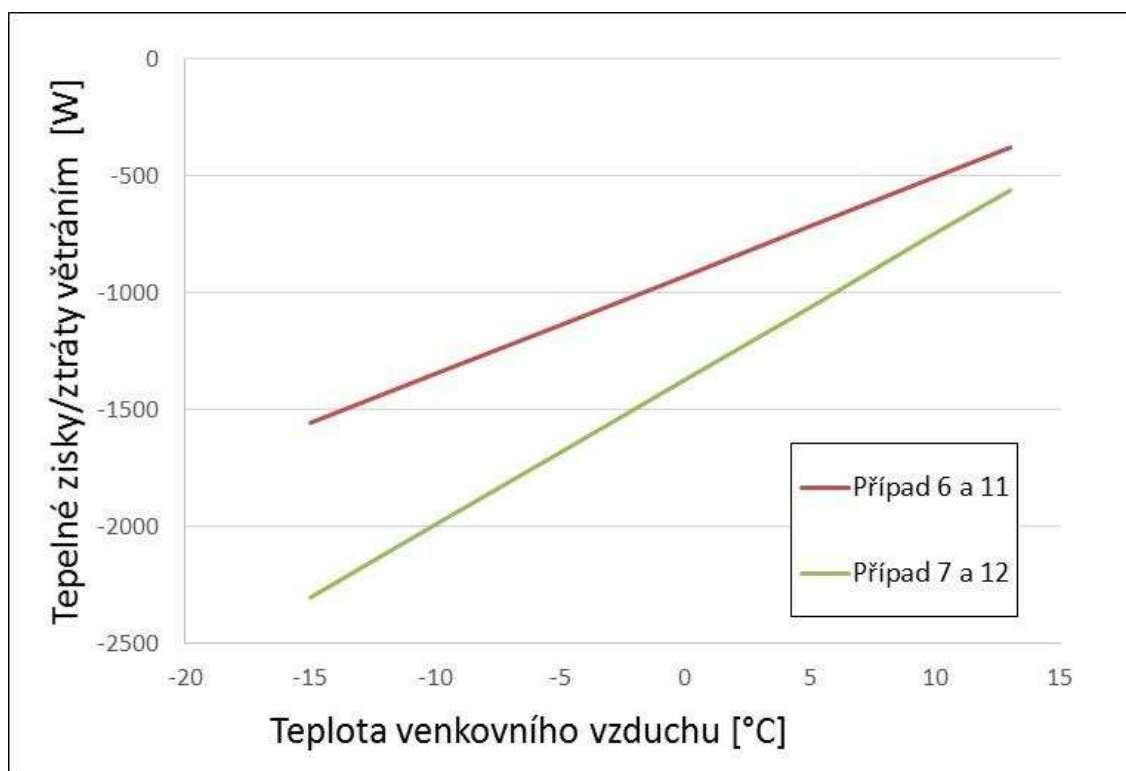
Protože jedinou změnou ve vstupních parametrech bude vyšší tepelný výkon studentů, který při výpočtech neovlivní tepelné ztráty větráním, budou některé případy stejné pro základní i střední školu. Například případy 1, 3 a 4 se rovnají případům 8, 9 a 10 viz tabulka 5.



Obr. 7 – Srovnání případů 8–10

## 2.4.2. Srovnání případů 11-12

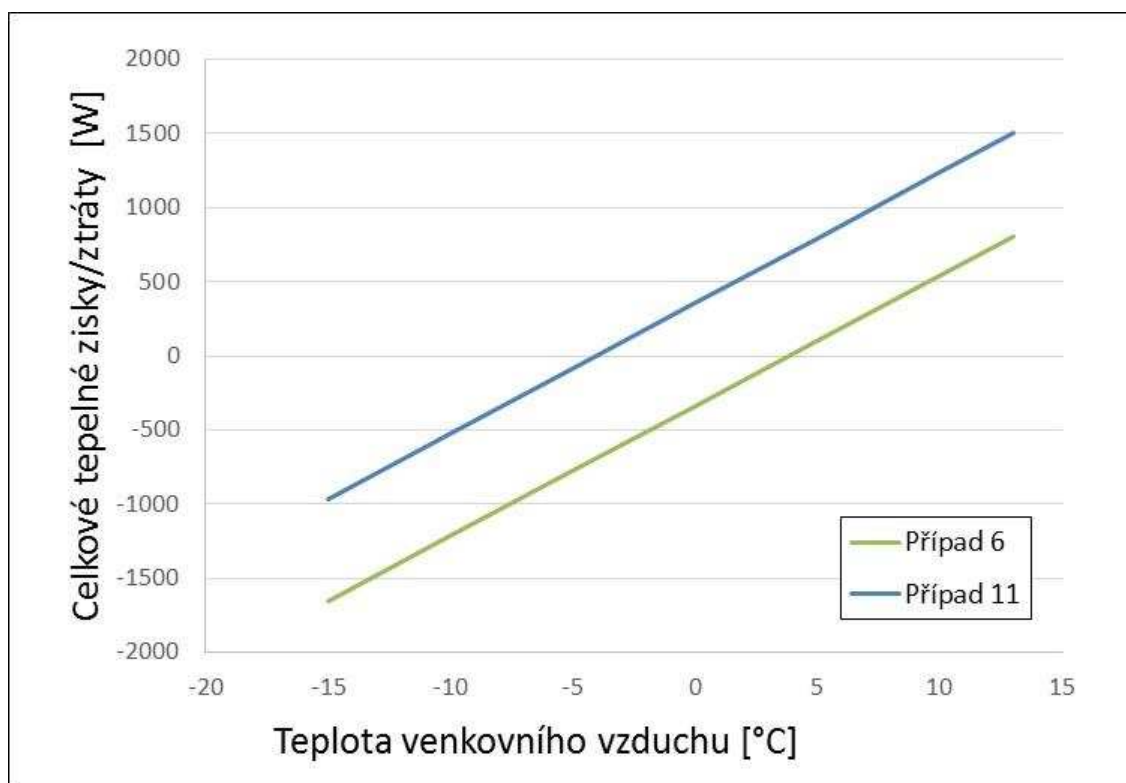
V případě použití zpětného získávání tepla se budou opět případy 6, 7 rovnat případům 11, 12.



Obr. 8 – Srovnání případů 11-12

## 2.5. Závěr

Protože závazným je hygienický předpis [10] udávající objemový průtok přiváděného vzduchu 20 až 30 m<sup>3</sup>/h · os, je nutno ho zvolit v tomto rozmezí. Jelikož při objemovém průtoku venkovního přiváděného vzduchu 30 m<sup>3</sup>/h · os jsou ztráty vyšší, je vhodné zvolit spíše variantu s objemovým průtokem 20 m<sup>3</sup>/h · os. I tato varianta však není z hlediska tepelných ztrát příliš příznivá. Proto je vhodné použít zpětné získávání tepla. Tomu odpovídá pro základní školu případ 6 a pro střední školu případ 11.



Obr. 9 – Celkové tepelné zisky/ztráty pro případy 6 a 11

Příklad 11 se z oblasti ztrát dostane do oblasti zisků na  $-4$  °C. Příklad 6 se do oblasti zisků dostane při  $4$  °C. V obou případech se musí tepelné ztráty hradit ohřevem přiváděného vzduchu. Ve chvíli, kdy se případ dostane do oblasti zisků je nutné teplo odvádět, neboť je vnímáno jako tepelná zátěž. To lze provést například bypassem u zpětného získávání tepla, které již není tolik zapotřebí.

### 3. Škodliviny a koncentrace CO<sub>2</sub>

„Škodliviny jsou příměsi vzduchu, které způsobí pokles produktivní činnosti člověka a mohou poškozovat jeho zdraví, působí škodlivě na výrobní zařízení, na budovy a poškozují přírodní prostředí. Jejich zdrojem je výrobní činnost (průmyslové škodliviny), nebo jsou produkovány člověkem (biologické příměsi). Obsah příměsí ve vzduchu je nežádoucí, neboť mají účinek toxický na lidský organismus, případně karcinogenní, alergenní, fibrogenní, nebo radioaktivní. Je úkolem větrání zajistit odvod vzniklých škodlivin z pracovní oblasti (oblasti, v níž se pohybují lidé) a přivádět čerstvý venkovní vzduch. Technická opatření a intenzita větrání musí zajistit, aby obsah škodlivin nepřestoupil nejvýše přípustné koncentrace, stanovené hlavním hygienikem státu.“ [3]

Pro lepší představu o tom, co se ve třídě skutečně děje po stránce produkce CO<sub>2</sub>, byla provedena simulace celé situace v programu CONTAMW3. Simulace byly vypracovány pro dva případy, a to pro stav bez použití větrací jednotky (tzn. přirozené větrání) a stav s použitím větrací jednotky (tzn. nuceného větrání). Simulace na zadaném modelu je posléze porovnána s reálnými naměřenými daty jiné učebny. Aby bylo možné dobře zadat parametry modelu, je zejména nutné zjistit produkci metabolického CO<sub>2</sub> od dětí a učitele. Výpočtem bude ukázáno, jak se k této informaci dostat.

„Oxid uhličitý je bezbarvý plyn bez barvy a zápachu, běžně se vyskytující ve vzduchu. Venkovní koncentrace závisí na stupni urbanizace v dané oblasti a případně i na denní době. V literatuře najdeme rozmezí 350 až 500 ppm. Při výpočtech uvažujeme běžně koncentrace 400 ppm a vyšší. Zdrojem oxidu uhličitého jsou především spalovací a metabolické procesy. Produkce metabolického CO<sub>2</sub> závisí na fyzické aktivitě a proporcích člověka (hmotnost, výška). Pro výpočet lze použít následující vztah.“ [4]

$$\dot{V}_{CO_2} = 1,742 \cdot H^{0,725} \cdot m^{0,425} \cdot M \quad [l/h] \quad (5)$$

Kde jednotlivé členy znamenají:

- $\dot{V}_{CO_2}$  - produkce metabolického  $CO_2$  [l/h]
- $H$  - výška člověka [m] (viz tabulka číslo 8)
- $m$  - hmotnost člověka [kg] (viz tabulka číslo 8)
- $M$  - měrný metabolický tok [met] (viz tabulka číslo 7)

Tab. 7 – Energetický výdej (produkce tepla a vodní páry) pro různé druhy činností dětí [4]

Činnost	M [met]	Věk							
		6 let		10 let		15 let		18 let	
		Qcit [W]	Mw [g/h]	Qcit [W]	Mw [g/h]	Qcit [W]	Mw [g/h]	Qcit [W]	Mw [g/h]
Sezení uvolněné	1,0	41,0	11,0	57,0	14,0	83,0	19,0	91,0	20,0
Činnost vsedě	1,2	42,0	25,0	58,0	33,0	84,0	45,0	93,0	48,0
Lehká činnost vstoje	1,6	43,0	52,0	59,0	70,0	87,0	97,0	97,0	104,0
Chůze bez zátěže	1,9	44,0	73,0	61,0	98,0	89,0	136,0	99,0	147,0
Tělocvik	3,0	61,0	104,0	85,0	140,0	126,0	195,0	139,0	212,0

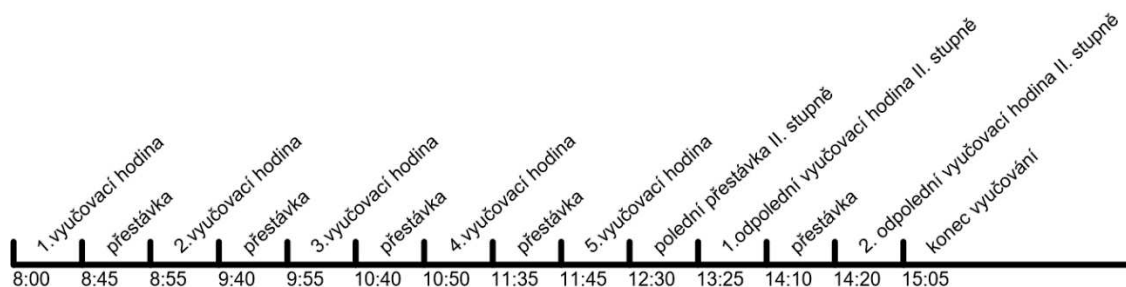
Tab. 8 – Výška a váha dětí dle věku [9]

Věk	chlapci			dívky		
	váha [kg]	výška [cm]	Produkce m. $CO_2$ [m <sup>3</sup> /h]	váha [kg]	výška [cm]	Produkce m. $CO_2$ [m <sup>3</sup> /h]
po narození	3,2	51,0	0,002	3,2	50,0	0,002
3 měsíce	5,9	61,0	0,003	5,4	60,0	0,003
6 měsíců	7,9	68,0	0,004	7,3	66,0	0,004
9 měsíců	9,3	72,0	0,004	8,6	70,0	0,004
1 rok	10,3	76,0	0,005	9,6	74,0	0,004
2 roky	13,1	88,0	0,006	12,4	87,0	0,006
3 roky	15,2	98,0	0,007	15,0	96,0	0,006
4 roky	17,2	106,0	0,007	16,9	104,0	0,007
5 let	19,3	113,0	0,008	18,8	112,0	0,008
6 let	21,9	119,0	0,009	21,4	118,0	0,009
7 let	24,5	125,0	0,010	23,8	124,0	0,009
8 let	27,1	131,0	0,010	26,9	130,0	0,010
9 let	30,4	136,0	0,011	29,8	136,0	0,011
10 let	33,7	141,0	0,012	33,2	141,0	0,012
11 let	37,4	147,0	0,013	37,3	148,0	0,013
12 let	41,0	153,0	0,014	42,3	154,0	0,014
13 let	46,0	160,0	0,015	47,8	160,0	0,015

Pro chlapce ve věku 10 let o výšce 1,41 m a váze 33,7 kg by produkce metabolického CO<sub>2</sub> vycházela na 0,012 m<sup>3</sup>/h · os. Pro chlapce ve věku 13 let o výšce 1,60 m a váze 46 kg by z rovnice vycházelo, že jeho produkce CO<sub>2</sub> se pohybuje zhruba okolo 0,015 m<sup>3</sup>/h · os. U starších dětí na střední škole (15 a více let) se tato produkce již o tolik neliší. Kvůli tomu bude v simulaci použita právě tato hodnota, aby nebyly uváděny téměř stejné grafy zbytečně dvakrát. Simulace tedy bude prováděna pro žáky druhého stupně základní školy. Dospělý člověk produkuje 0,017 m<sup>3</sup>/h · os CO<sub>2</sub>.

### 3.1. Přirozené větrání – simulace

Aby bylo možné provést simulaci je nutné opět vytvořit model, který se co možná nejlépe přibližuje skutečnosti. Jako v předchozích modelových případech se bude počítat s třiceti studenty a jedním učitelem. Jejich produkce CO<sub>2</sub> již byla určena v předchozí části bakalářské práce (studenti produkují 0,015 m<sup>3</sup>/h · os a učitel 0,017 m<sup>3</sup>/h · os). Objem místnosti činí opět 343,3 m<sup>3</sup>. Teplota vzduchu v místnosti je nastavena na 22 °C. Teplota venkovního vzduchu je -15 °C. Tato hodnota je volena proto, že je to extrém, na který je větrání v místnosti dimenzováno. Ve skutečném případě by se teplota venkovního vzduchu měnila a většinu času by navíc byla pravděpodobně vyšší. Tím, že se nastaví v simulaci stacionární, méně příznivé podmínky, se výpočty přikloní na stranu bezpečnosti. Tlak venkovního prostředí je nastaven na 101325 Pa a čerstvý vzduch má hodnotu 400 ppm. Produkce CO<sub>2</sub> (44 kg/kmol; 850 J/kg·K) je dána přítomností zdrojů těchto škodlivin v místnosti. Jak již bylo zmíněno, produkce škodlivin žáků druhého stupně základní školy je téměř srovnatelná s produkcí studentů středních škol. Proto bylo rozhodnuto použít rozvrh žáků pro druhý stupeň. Rozdíl mezi rozvrhem žáků prvního a druhého stupně je pouze v tom, že druhý stupeň má v tomto případě delší vyučování (odchází na odpolední přestávku o hodinu později). Obsazenost třídy žáky i učitelem byla nastavena dle rozvrhu hodin na základních školách následujícím způsobem (obr. 10).

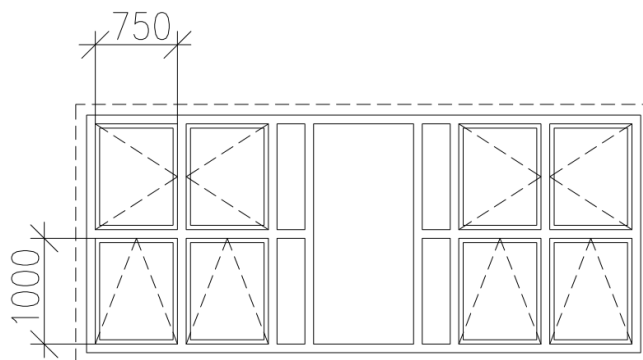


Obr. 10 – Rozvrh výuky studentů základní školy

Během přestávek mnoho studentů/žáků ve třídě vůbec nebývá a dveře na chodbu bývají celou dobu otevřené. Je tedy považováno za důležité tyto faktory nějakým způsobem zohlednit. Průtok vzduchu je dán u přirozeného větrání rozdílem teplot vzduchu mezi vnitřním a vnějším prostředím. V tomto případě se jedná o rozdíl teplot vzduchu mezi učebnou a chodbou, která však příliš rozdílnou teplotu vzduchu nemá. Okna během přestávek bývají z důvodu bezpečnosti zavřená, a tak by nemělo dojít ani k průvanu. Navíc alespoň malá část studentů, kteří  $\text{CO}_2$  produkují, ve třídě obvykle během přestávky stále zůstává. Kvůli tomu bylo rozhodnuto tuto výměnu v simulaci vykompenzovat pouze úplným vypnutím produkce  $\text{CO}_2$  během přestávek.

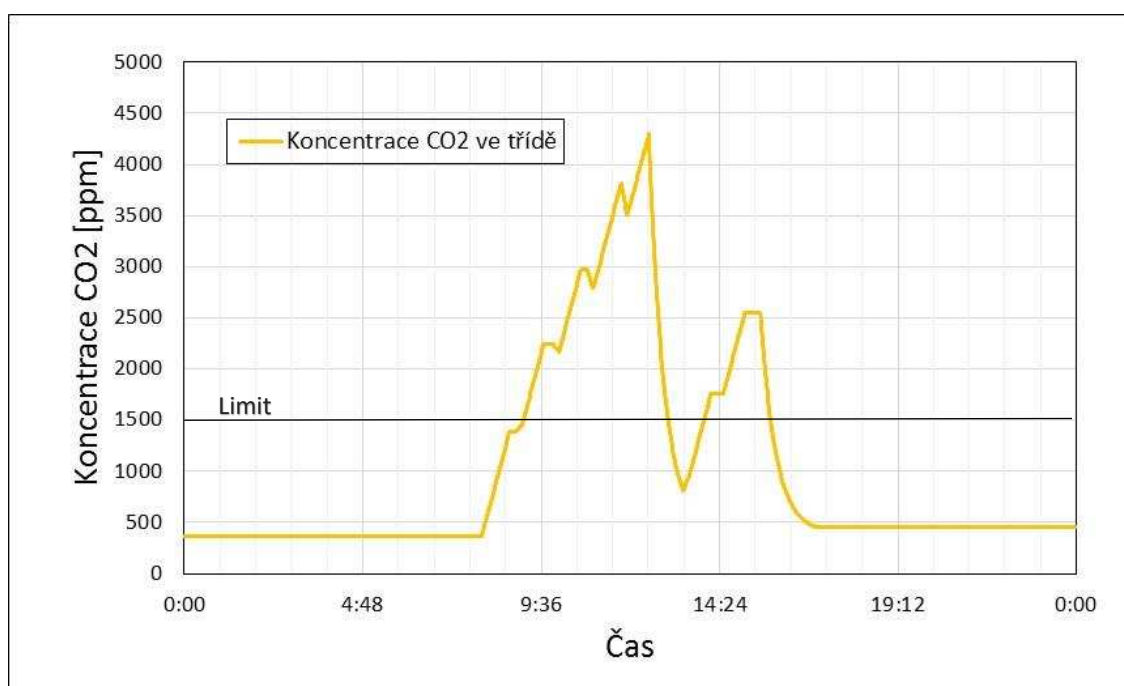
Protože nejsou známy zvyky vyučujících a každý má navíc jiné, bylo rozhodnuto obecně nastavit jejich aktivitu větrání stejným způsobem podle toho, jak se to zdálo pravděpodobné. Na začátku každé vyučovací hodiny je nastaveno, že okno někdo na 10 minut otevře dokořán. V tomto případě to znamená větrací otvor o výměře  $1 \times 0,75$  m viz obrázek 11.





Obr. 11 Rozměry oken ve třídě

Během odpolední přestávky je více oken ponecháno otevřené na ventilační polohu (bez dozoru) celou dobu, čímž dojde k výraznějšímu poklesu CO<sub>2</sub> ve třídě.



Obr. 12 – Simulace stavu s nedostatečným přirozeným větráním

Simulace začala z neutrálního stavu, kde vnitřní vzduch byl definován stejně jako vnější (400 ppm). V 8 hodin přišli všichni studenti najednou, včetně učitele. V reálném případě by samozřejmě přechod zvýšení koncentrace CO<sub>2</sub> byl hladší, neboť studenti začínají přicházet již dříve a hlavně postupně. Protože ve třídě byl

vzduch čerstvý, vyučující začal větrat až na začátku druhé hodiny. Stejně se postupovalo až do konce dopoledního vyučování. Na grafu je možné si povšimnout, že zuby propadu na křivce, vytvořené větráním vyučujícími, nemají stejný průběh.

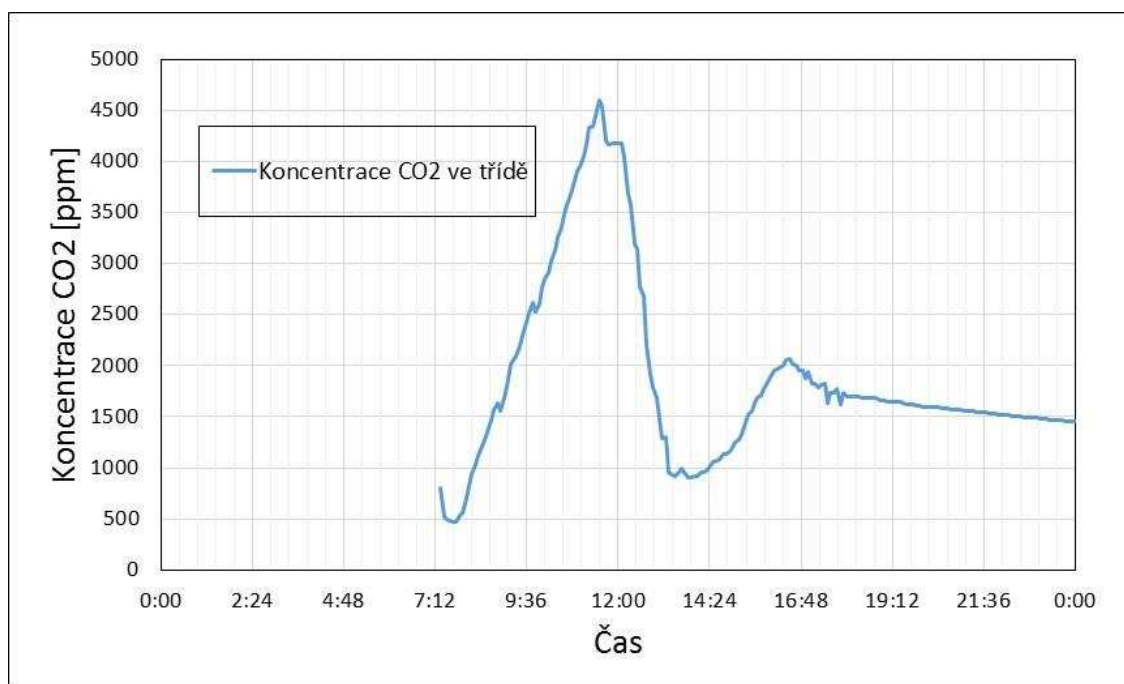
Na začátku druhé vyučovací hodiny díky větrání zůstala koncentrace téměř konstantní a na konci páté vyučovací hodiny šla křivka koncentrace díky vyvětrání strmě dolů. Z toho vyplývá, že čím je vyšší koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti, tím více škodlivin se za stejnou dobu odvětrá.

Co je ale nejzajímavější, jsou dvě věci. První je fakt, že během dne se koncentrace nepříznivých látek vyšplhá až ke 4500 ppm, což je vysoko nad hranicí povolenou zákonným předpisem. Druhá věc je fakt, že maximální přípustná hranice (1500 ppm) je téměř dosažena již po první hodině výuky a zbytek dne jsou tak studenti, žáci i vyučující vystaveni nepříznivému prostředí, které vyvolává únavu až ospalost, je příčinou nesoustředěnosti, letargie nebo bolesti hlavy. Navíc s hodnotou 4500 ppm se koncentrace CO<sub>2</sub> nebezpečně blíží hodnotě 5000 ppm, což je hranice, kdy začíná být zdraví nebezpečná.

Během odpolední přestávky se místnost poměrně dobře vyvětrala, ale na konci odpolední výuky je hodnota koncentrace opět téměř dvojnásobná, než je hodnota povolené přípustné hranice. Po skončení vyučování je v simulaci naplánována situace, kdy do třídy přijde uklízečka a vyvětrá celou místnost, až na počáteční koncentraci 400 ppm, což může trvat hodinu nebo půl hodiny. Doba větrání závisí od intenzity větrání tzn. kolik oken otevře.

Pro simulaci v programu CONTAM pro přirozeného větrání byl použit „Two-way model – Single opening“. Nejdříve programu při výpočtech dělaly potíže nevyrovnané tlaky vnitřního a vnějšího prostředí. Proto byla do modelu zaimplementována spára tzv. „Quadratic Model – Crack“, která zajistila dostatečné netěsnosti pro vykompenzování tlakových rozdílů.

Pro srovnání zde nyní bude uveden reálný případ měření ze základní školy, kde se pravděpodobně jednalo také o výuku s odpoledním vyučováním.



Obr. 13 – Měření reálného případu třídy ZŠ

Při porovnání simulace s obrázkem 13, je možné si všimnout několika věcí. Například strmost je velmi podobná. Zatímco v simulaci se začínalo v 8 hodin na 400 ppm a v 9 hodin se koncentrace pohybovala okolo 1500 ppm, v reálném případě se začínalo v 8 hodin s 730 ppm a v 9 hodin byla koncentrace na 1800 ppm. Rozdíl koncentrací vzniklých za jednu hodinu se pohybuje okolo 1000 ppm v obou případech. Lze tedy říci, že nastavení produkce škodlivin v simulaci je podobné jako ve skutečnosti a lze mu tak důvěřovat.

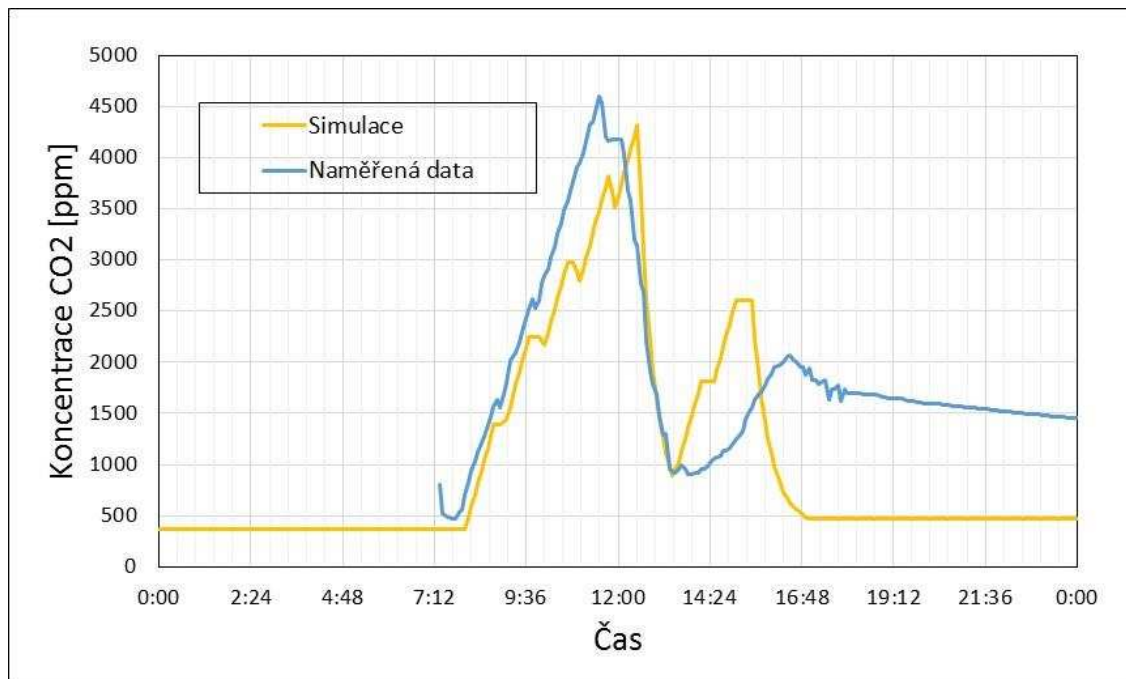
Při prozkoumání odpolední pauzy, která by měla správně trvat od 12:30 do 13:15, je v simulaci jasně vidět strmý a plynulý pokles škodlivin. To znamená, že studenti i učitel třídu opustili a nechali ji vyvětrat. Je nutné připomenout, že při měření nebyla zaznamenávána aktivita studentů ani vyučujícího, takže není možné vědět, co se ve třídě dělo. Je možné se to však pokusit alespoň odhadnout. Při analýze dat z měření se zdá, že třída byla opuštěna již mezi 11:31 a 11:41, což by odpovídalo konci 4. vyučovací hodiny v 11:35. To potvrzuje i informace o tom, že žáci ve třídě, ve které měření proběhlo, byli z 2.B. (to znamená z prvního stupně). Rozvrh prvního stupně, jak již bylo zmíněno, končí dopolední vyučování o 1 vyučovací hodinu dříve než rozvrh druhého stupně. Křivka se chvíli držela na

konstantní úrovni. To znamená, že ve třídě nikdo nebyl. Klesat pak začala až ve 12:05 kdy do třídy někdo vešel a zřejmě otevřel okna. Další vyučovací hodina by správně měla začít již ve 12:30. Z grafu je však vidět, že křivka přestává rychle klesat až po 13. hodině. Podle naměřených dat senzor tuto změnu zaznamenal přesně mezi 13:11 a 13:16. To by odpovídalo začátku přestávky před 2. odpolední vyučovací hodinou. To by mohlo například znamenat, že vyučující přišel do třídy zavřít okna a nechal ji otevřenou pro příchod žáků. Křivka během přestávky stoupala, poté na chvíli opět klesla a pak začala stoupat podobným tempem jako předtím. To by mohlo znamenat, že vyučující na začátku odpoledního vyučování opět vyvětral. Vyučování by mělo skončit v 15:05. Koncentrace však stoupala téměř až do 17. hodiny. Je možné že v tento den vůbec nedošlo k odpolednímu vyučování a třída byla využita úplně jiným způsobem. Ve třídě mohl například probíhat nějaký zájmový kroužek.

Nejvyšší hladina koncentrace CO<sub>2</sub> se v obou případech příliš neliší. Reálný případ zaznamenal nejvyšší hodnotu CO<sub>2</sub> 4602 ppm, zatímco v simulaci tato hodnota dosáhla na 4316 ppm. Tato odchylka zhruba 300 ppm není, vzhledem k tomu, jak rychle je CO<sub>2</sub> produkováno, příliš velká. Díky vyšším naměřeným hodnotám by se však dalo říci, že ve třídě ve skutečnosti nedochází k tak častému, nebo tak intenzivnímu provětrávání. Ještě by se dalo pomyslet na fakt, že v reálné situaci ve třídě nebývá plný stav 30 studentů, což by tento závěr o méně častém provětrávání pouze potvrzovalo, neboť vyšší maximální hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> by tak bylo dosaženo i za nižší produkce škodlivin. Stejně tak to potvrzuje fakt, že žáci prvního stupně produkují méně CO<sub>2</sub>.

Poslední věcí, která je na první pohled vidět a vytváří znatelný rozdíl v tom, jak se navzájem liší oba grafy, je doba kdy do třídy přijde uklízečka a místnost vyvětrá. V simulaci se toto odehrálo každý den vždy, po konci výuky. Díky tomu se hladina koncentrace držela na konstantní hodnotě 400 ppm (stejná, jako venkovní) až do začátku výuky dalšího dne. V měřené třídě po skončení výuky nikdo nevyvětral. Koncentrace škodlivin byla postupně velmi pomalu snižována, pravděpodobně díky netěsnostem v různých spárách (dveře apod.). Tento jev začal od chvíle, kdy žáci a učitel opustili třídu po konci výuky, pokračoval během noci, a skončil až ve chvíli, kdy v 7:16 do třídy přišla právě uklízečka, která před vyučováním vždy vyvětrá. „Zajímavý je pokles koncentrace CO<sub>2</sub> cca 1 hodinu před

zahájením vyučování každý den, kdy do učebny přichází uklízečka a do vyučování dochází k příčnému provětrání třídy“ [5].

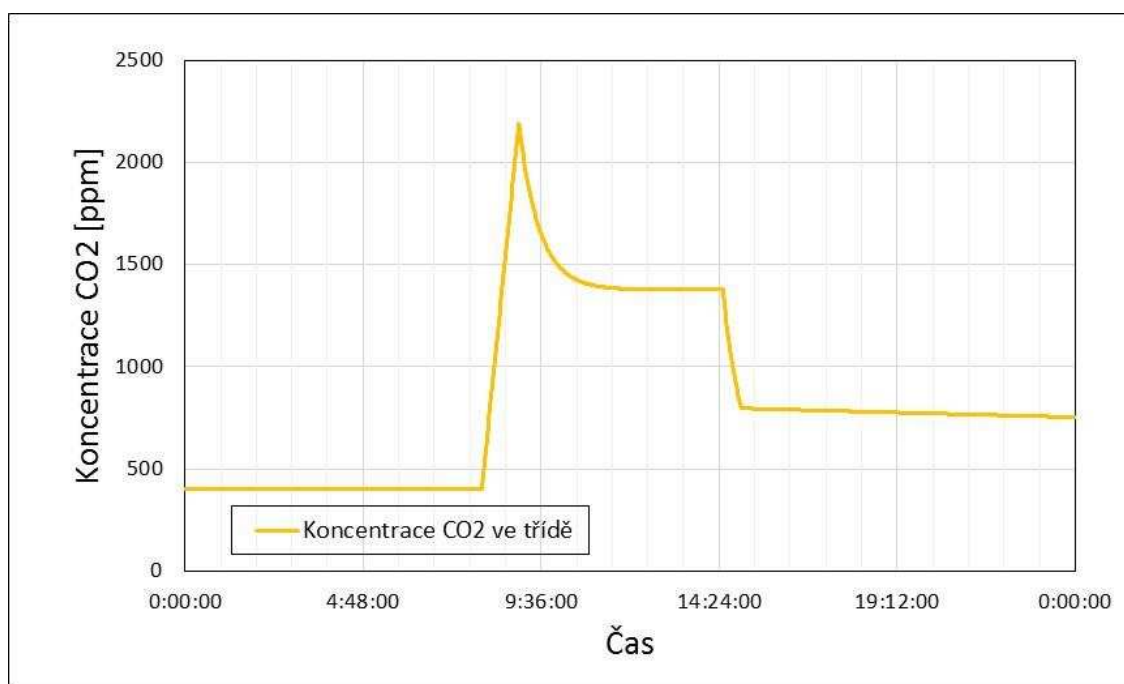


Obr. 14 – Porovnání měření reálného případu třídy ZŠ a simulace

Pro zajímavost jsou zde uvedeny obě křivky v jednom grafu. Na první pohled je zřetelné, že strmost produkce koncentrace je opravdu velmi podobná v obou případech. Začátek produkce je v simulaci opožděn, protože obsazenost třídy je nastavena zlomově od 8 hodin. Křivka během větrání přes odpolední přestávku je téměř shodná. Odpolední průběhy koncentrací jsou poměrně značně rozdílné, což potvrzuje předpoklad, že v reálném případě ve třídě místo odpoledního vyučování probíhaly jiné aktivity s jinými zdroji škodlivin (bližší okrajové podmínky nejsou známy).

### 3.2. Nucené větrání – simulace

Nucené větrání má oproti předcházející variantě několik velkých výhod. Tou hlavní je automatický provoz. Člověk je velmi nepředvídatelným faktorem při jakékoliv snaze zajistit spolehlivé větrání. Díky nucenému větrání lze tuto „nespolehlivou“ složku vyřadit a je možné se spolehnout pouze na autonomní provoz. Ta se dá nastavit přesně podle požadavků, které jsou dány rozvrhem výuky. Aby bylo možné vědět, jaké nastavení takového nezávislého provozu je vhodné, kromě rozvrhu je dobré znát také charakteristiky nuceného větrání. Proto bylo rozhodnuto udělat také několik simulací, na kterých lze vidět, jakou mají tyto charakteristiky podobu.

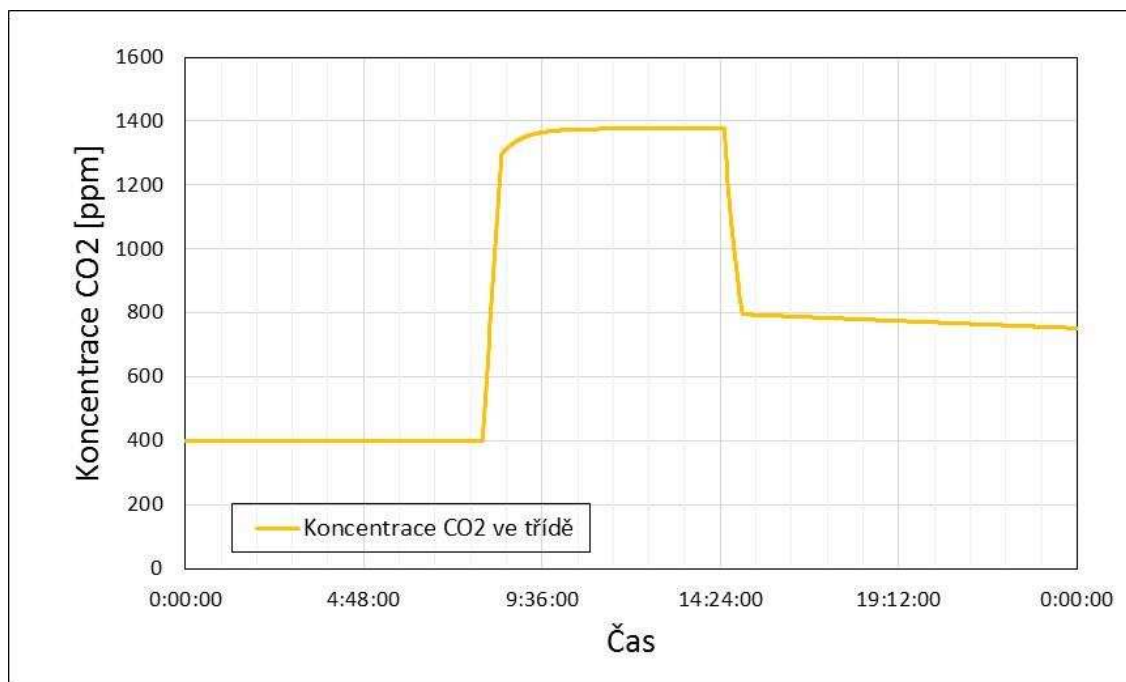


Obr. 15 – Nucené větrání – Začátek v 9:00, konec v 15:00

Jako první je zde uvedena situace, kdy byl začátek nuceného větrání nastaven na 9. hodinu. To znamená hodinu po začátku vyučování. Jak je vidět, rychlost koncentrace roste velmi rychle. Dokonce rychleji než v případě přirozeného větrání. Je to však způsobeno tím, že nyní je účelem popsat pouze charakteristiku nuceného

větrání, a ne zjistit průběh koncentrace  $CO_2$ . U přirozeného větrání byly v simulaci nastaveny přestávky, kdy nedocházelo k produkci škodlivin, na začátku výuky se větralo, a navíc ve třídě byly nastaveny drobné spáry, aby výpočet fungoval. V simulaci nuceného větrání jsou vynechány tyto detaily a pozornost je zaměřena pouze na to, jak koncentrace reaguje na chod ventilátoru. Opět se tak simulace přiklání na stranu bezpečnosti, neboť jsou nastaveny méně příznivé podmínky.

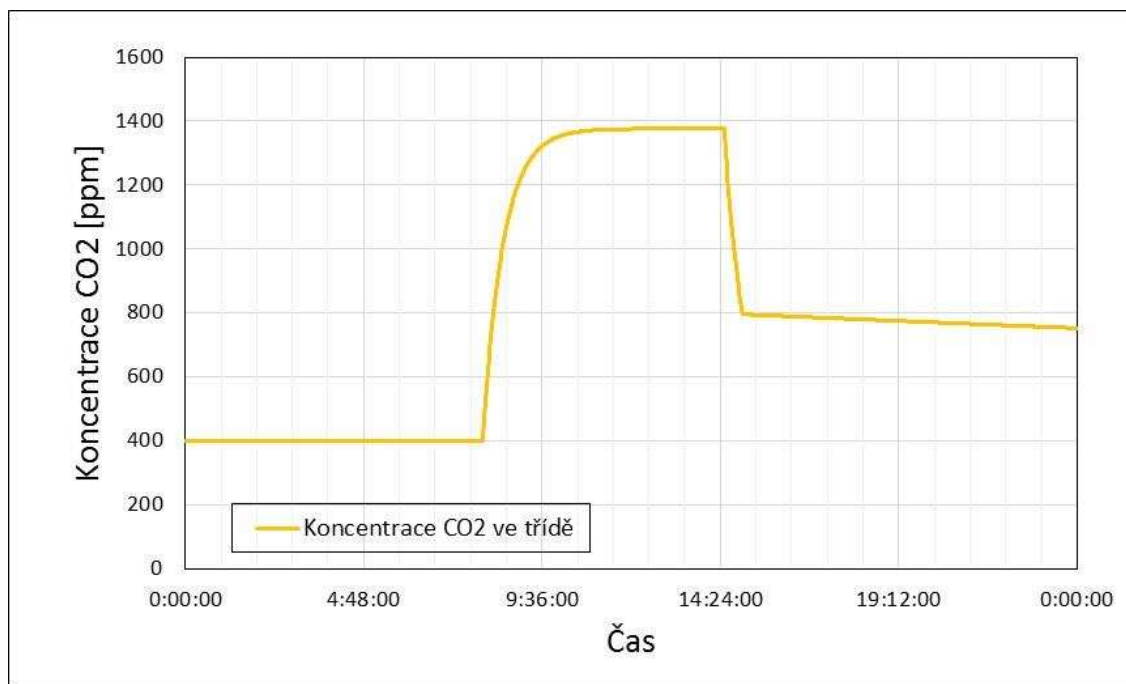
Velmi výrazný je vrchol křivky, která v 9 hodin po zapnutí ventilátoru zcela mění směr a z tendence strmého růstu se stává strmý pokles. Následně se koncentrace ustálí na hodnotě okolo 1400 ppm. Znovu se tak ukazuje, že čím vyšší je v objemu vzduchu koncentrace škodlivin, tím rychleji se odvětrávají, protože objemový průtok přiváděného vzduchu je konstantní. Třídou žáci i učitel opustí ve 14:30, což má za příčinu ukončení produkce škodlivin, zatímco ventilátor je stále spuštěn. Jeho vypnutí je nastaveno na 15:00. Když se porovná pokles při spuštění ventilátoru za přítomnosti zdrojů škodlivin a bez jejich přítomnosti, lze si všimnout, že křivka bez zdrojů škodlivin má téměř lineární průběh. Po vypnutí ventilátoru v místnosti zůstává stále vyšší koncentrace  $CO_2$  než v okolí třídy, což má za následek postupné snížení koncentrace provětráváním spárami stejně jako v situaci, kdy byl popisován případ s naměřenými daty. Tento fakt je zajímavý, protože pro tento případ v simulaci spáry nastaveny nebyly.



Obr. 16 – Nucené větrání – Začátek v 8:30, konec v 15:00

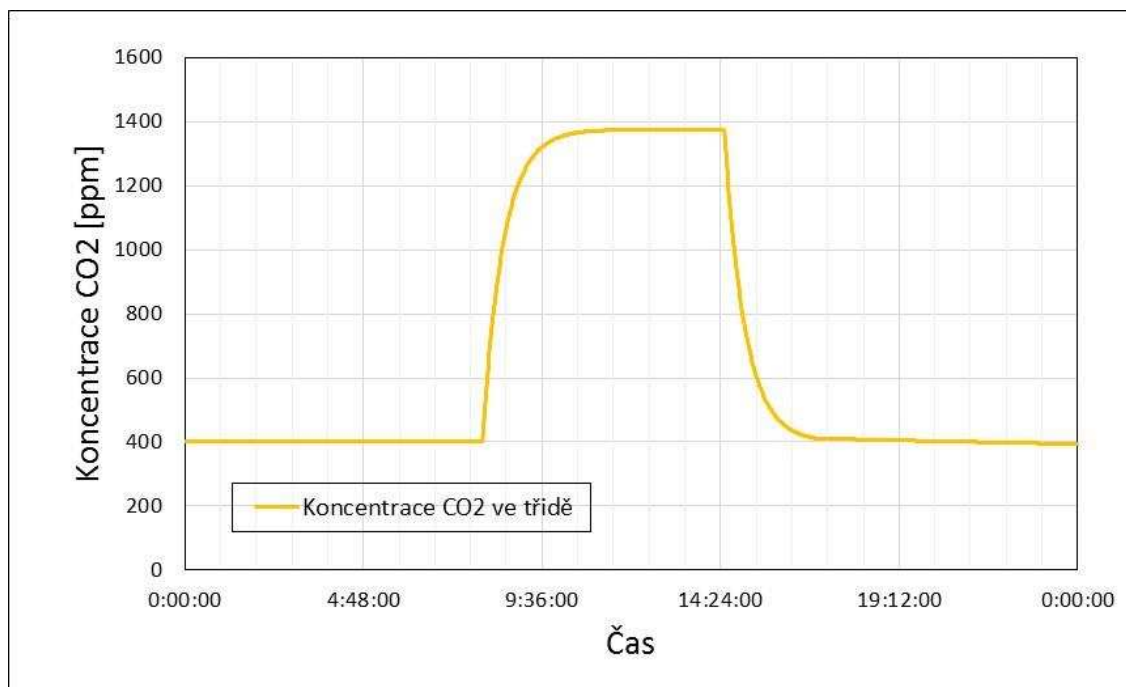
V případě, že se ventilátor zapne předtím, než koncentrace  $\text{CO}_2$  přesáhne hodnotu, která náleží stavu koncentrace  $\text{CO}_2$  při stacionárních zdrojích škodlivin a stacionárním větrání daným objemovým průtokem, křivka nevytvoří tak ostrý zlom ve svém průběhu. I přes hladší náběh je však zřetelně vidět, kdy byl ventilátor zapnut (v 8:30).





Obr. 17 – Nucené větrání – Začátek v 7:30, konec v 15:00

Když se nastaví sepnutí ventilátoru na 7:30, průběh křivky se začíná ustalovat na svou stacionární hodnotu již od začátku výuky. Není zde žádný ostrý zlom. Stejně tak ale není vidět, že ventilátor je zapnutý už od 7:30. Dokud není situace ovlivněna zdrojem škodlivin, koncentrace  $\text{CO}_2$  v místnosti zůstává stejná jako je koncentrace přiváděného vzduchu, tedy 400 ppm.



Obr. 18 – Nucené větrání – Začátek v 8:00, konec 00:00

Nakonec je zde křivka ideálního průběhu. Ventilátor je zapnutý až v 8:00, kdy by ve třídě měly sedět všechny děti a odvětrává i po jejich odchodu až do dosažení počátečních hodnot koncentrací CO<sub>2</sub> (nastává okolo 16:30). Ventilátor by tak neměl pracovat zbytečně delší dobu, než je nutné a ušetří se za energii, kterou vyžaduje příkon větrací jednotky. Dále se tak bude šetřit životnost jednotky a kvalita vnitřního prostředí bude po stránce škodlivin i tak nejen dostačující, ale dokonce velmi vysoká.

### 3.3. Shrnutí

Kromě první varianty, kdy sepnutí ventilátoru bylo nastaveno příliš pozdě, bylo ve všech případech zajištěno nepřekročení maximální koncentrace CO<sub>2</sub> 1500 ppm. V praxi by tato hodnota možná byla překročena, pokud by se ventilátor zapínal na čidlo CO<sub>2</sub> metodou zapnuto/vypnuto. Záleželo by však na nastavení regulátoru. Pokud by čidlo spínalo již při nižších koncentracích než při 1500 ppm, tak by se překročení této hranice dalo vyhnout. Další způsob vyhnout se překročení

limitu, by bylo například navýšení průtoku vzduchu. Ten by pak ovlivňoval časovou konstantu, s jakou by se křivka koncentrace dostávala do své stacionární polohy. To s sebou však nese další komplikace, jako je například vyšší akustický výkon jednotky, který není příznivý z hlediska pracovních/studijních podmínek ve třídě.

## **4. Návrh lokálního a centrálního systému větrání a porovnání provozních a investičních nákladů**

### **4.1. Návrh a volba vzduchotechnických jednotek a jejich provedení**

Dle zadání je nutno navrhnout lokální a centrální systém větrání učeben školy. Lokální jednotka bude umístěna v každé třídě pod stropem a bude s venkovním prostředím propojena přímo, skrze stěnový prostup – viz příloha „Lokální jednotka – výkres“. Centrální jednotka bude na patře pouze jedna. Umístěna bude v místnosti mimo učebny a vzduch bude distribuovat pomocí vzduchotechnického potrubí do všech učeben, viz příloha „Centrální jednotka – výkres“.

### **4.2. Decentralizovaná lokální jednotka**

Za lokální jednotku byl vybrán model FVS-S (zakrytovaná verze) od firmy LTG. Veškeré technické parametry jsou popsány v produktových listech, mezi přílohami viz „Katalog\_FVS“ a „Ceník decentralizovaných jednotek Univent LTG FVS“.

Základními parametry jsou objemový průtok  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ , hladina akustického tlaku 34 dB(A) a příkon jednotky 130 W.

### 4.3. Centrální jednotka

Jako centrální jednotka byla vybrána Maxi 4003 DC od firmy Paul, která se také řadí mezi přední výrobce vzduchotechnických jednotek. Jednotka byla vybrána na základě objemového průtoku a veškeré technické specifikace jsou opět k dispozici v příloze v produktových listech výrobce pod názvem „MAXI\_4003“. Tlakové ztráty potřebné pro zjištění příkonu jednotky byly po konzultaci s vedoucím bakalářské práce odhadnuty na 250 Pa. Protože budou řešeny i investiční náklady a potrubí v nich bude hrát také poměrně významnou roli, proběhlo dimenzování tohoto potrubí tak, aby se výpočet investic co nejvíce podobal reálnému případu. Dimenzování potrubí proběhlo metodou konstantní rychlosti.

Tab. 9 – Dimenzování vzduchotechnického potrubí

Zadáno	Veličina/úsek	1	2	3	4	5
	Průtok vzduchu V [m <sup>3</sup> /hod]		3125	2500	1875	1250
Rychlost v [m/s]		5	5	5	5	5
Vypočteno	Plocha potrubí S <sub>0</sub> [m <sup>2</sup> ]	0,174	0,139	0,104	0,069	0,035
Volba rozměrů	Volba rozměrů A [mm]	400	400	315	280	200
	Volba rozměrů B [mm]	400	350	315	250	180
Kontrola	Plocha potrubí S [m <sup>2</sup> ]	0,160	0,140	0,099	0,070	0,036
	Odchylka od S <sub>0</sub> [%]	8	-1	5	-1	-4
	Rychlost w [m/s]	5,43	4,96	5,25	4,96	4,82
přívodní	délka [m]	9	12	18	12	18
	plocha [m <sup>2</sup> ]	14,4	19,2	28,8	19,2	28,8
odvodní	délka [m]	4	12	18	12	7
	plocha [m <sup>2</sup> ]	6,4	18	22,68	12,72	5,32
sání	délka [m]	6				
	plocha [m <sup>2</sup> ]	9,6				
výtlak	délka [m]	10				
	plocha [m <sup>2</sup> ]	16				

Základními parametry jsou objemový průtok až 4000 m<sup>3</sup>/h, a příkon jednotky 1900 W při objemovém průtoku 3125 m<sup>3</sup>/h a tlakové ztrátě 250 Pa.

#### 4.4. Potřeba energie na větrání

Nucené větrání s sebou nese potřebu energie na provoz. Přirozeně je to potřeba elektrické energie pro dopravu vzduchu ventilátorem. Z tepelné bilance vycházelo, že ve třídách bude docházet nejen k situacím, kdy bude potřeba teplo odvádět ale také k situacím, při kterých bude potřeba teplo dodávat. Tím vzniká potřeba energie na ohřev přiváděného vzduchu. Není nutné počítat potřebu energie pro chladicí funkci jednotky, neboť většinu léta se třídy vůbec nevyužívají.

##### 4.4.1. Potřeba energie na pohon ventilátoru

Potřeba energie na pohon ventilátoru je dána příkonem, který závisí na objemovém průtoku dopravovaného vzduchu, tlakové ztrátě, kterou je ventilátor zatížen a jeho účinnosti. „Ideálním podkladem pro stanovení spotřeby energie je příkonová charakteristika, tj. závislost příkonu na objemovém průtoku vzduchu.“ [4]

$$E_{el} = \int_0^{\tau} P d\tau = P_1\tau_1 + P_2\tau_2 + \dots + P_n\tau_n = \sum_1^n P_i\tau_i \quad [\text{Wh/rok}] \quad (6)$$

Kde jednotlivé členy znamenají:

- $E_{el}$  - potřeba energie na pohon ventilátoru [Wh/rok]
- $P_i$  - příkon ventilátoru v daném časovém úseku [W]
- $\tau_i$  - časový úsek [h]

„Pro vyjádření potřeby energie pro dopravu vzduchu lze s výhodou využít měrný příkon ventilátoru SFP, který v sobě zahrnuje elektrický příkon a průtok vzduchu. Pro symetrickou větrací jednotku pracující v rovnotlakém režimu (bez ohříváče a chladiče) platí:“ [4]

$$SFP_{AHU} = \frac{P_{AHU}}{\dot{V}} = \frac{P_p + P_o}{\dot{V}} \quad [W \cdot s/m^3] \quad (7)$$

Kde jednotlivé členy znamenají:

- $SFP_{AHU}$  - měrný příkon ventilátoru [ $W \cdot s/m^3$ ]
- $P_{AHU}$  - příkon jednotky [W]
- $P_p, P_o$  - příkon přívodního a odvodního ventilátoru [W]
- $\dot{V}$  - průtok vzduchu jednotkou [ $m^3/s$ ]

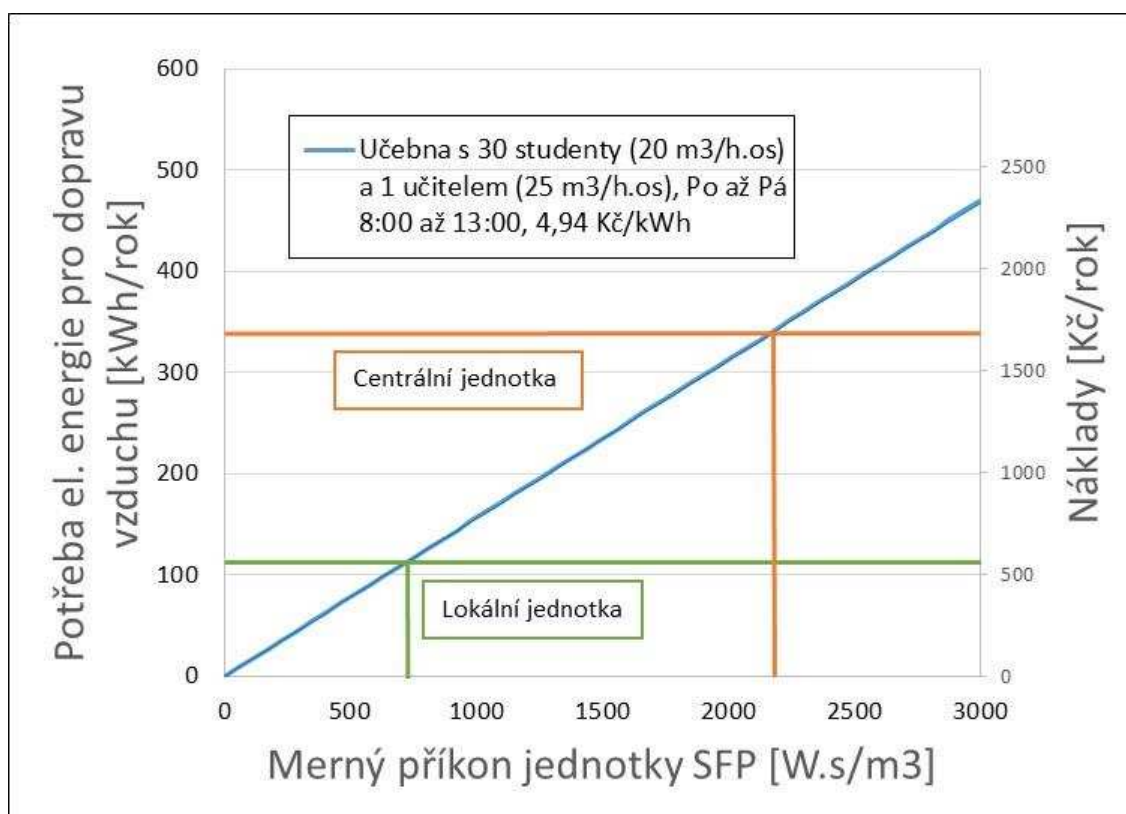
#### 4.4.2. Potřeba energie na ohřev vzduchu

Z tepelné bilance vyplynulo, že v situaci, kdy je teplota venkovního vzduchu příliš nízká, je nutné tento přiváděný venkovní vzduch dohřívát, aby se pokryly tepelné ztráty větráním. Podrobnější analýza potřeby tepla na ohřev vzduchu u velmi podobného modelu učebny s 27 žáky v knize „Větrání škol v souvislostech“ [4], která zohledňuje také vliv vnitřních i vnějších tepelných zisků, však v závěru informuje, že pokud při větrání bude použito ZZT s vyšší účinností než 67 %, není nutné přiváděný vzduch dále ohřívát. „I když výsledky nelze zobecnit, neboť závisí na konkrétním provedení učebny (velikost učebny, zasklení, hmotnost a materiál obvodových konstrukcí apod.), je možné sledovat, že potřeba tepla na ohřev venkovního vzduchu je v případě využití ZZT (s účinností > 67 %) minimální, neboť je z podstatné části pokryta tepelnými zisky.“ [4]

## 4.5. Provozní náklady

Pro výpočet nákladů ze spotřeby energie byla použita běžná sazba společnosti ČEZ – Standard D02d. Podle květnového ceníku roku 2017 společnosti ČEZ stojí elektrická energie 4,94 Kč/kWh včetně DPH.

Pro případ, kde v učebně je 30 studentů a 1 učitel, byl vytvořen graf znázorňující závislost potřeby elektrické energie pro dopravu vzduchu ventilátorem a nákladů na pohon jednotky na měrném příkonu jednotky SFP. Pro studenty je dávka vzduchu  $20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$ . Pro vyučujícího je dávka vzduchu  $25 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$ . Doba provozu jednotky je 902 h/rok.



Obr. 19 – Potřeba elektrické energie pro pohon větrací jednotky a provozní náklady

Do grafu 16 jsou vyneseny příkony obou jednotek pro provoz ventilátoru pouze na jednu třídu. Příkon lokální jednotky tedy zůstane stejný (130 W). Protože v uceleném úseku je však 5 tříd, příkon centrální jednotky je podělen pěti (380 W).

Z grafu je zjevné, že provozní náklady lokální jednotky na větrání jedné učebny jsou výrazně nižší. Náklady na jednu lokální jednotku, která větrá jednu učebnu, vychází na 580 Kč/rok. Ucelený úsek větraný těmito jednotkami by tak stál 2900 Kč/rok. Náklady na provoz centrální jednotky rozpočítané na jednu učebnu vychází na 1700 Kč/rok. Ucelený úsek větraný touto jednotkou by tak stál 8500 Kč/rok.

#### 4.6. Investiční náklady

Investiční náklady byly stanoveny na základě komunikace s obchodními zástupci obou společností.

Investiční náklady lokální jednotky byly stanoveny dle ceníku společnosti LTG viz příloha „Ceník decentralních jednotek Univent LTG FVS“. Cena zahrnuje i 20% slevu, která byla obchodním zástupcem poskytnuta v závislosti na charakteru projektu.

Tab. 10 – Investiční náklady větracího systému s lokálními jednotkami

Položka	počet	jednotka	cena za jednotku	celková cena za položku
FVS-S, (bílá barva s hliníkovými štěrbinami)	5	ks	249 542 Kč	1 247 710 Kč
Uzavírací těsná klapka, řízený obtok ZZT (přídavná)	5	m2	12 173 Kč	60 865 Kč
Připojovací potrubí na fasádu	5	m2	14 984 Kč	74 920 Kč
Instalační konzole	5	ks	858 Kč	4 290 Kč
VZT izolace	15	m2	450 Kč	6 782 Kč
Celková kalkulace				1 394 567 Kč



Investiční náklady centrální jednotky byly stanoveny dle informace poskytnuté obchodním zástupcem společnosti Paul.

Tab. 11 – Investiční náklady větracího systému s centrální jednotkou

Jednotka MAXI_4003	1	ks	528 000 Kč	528 000 Kč
VZT potrubí	200	m <sup>2</sup>	750 Kč	150 000 Kč
VZT izolace	31	m <sup>2</sup>	450 Kč	13 950 Kč
Uvedení jednotky do provozu	1	m <sup>2</sup>	5 000 Kč	5 000 Kč
Tlumič hluku u jednotky	4	ks	13 000 Kč	52 000 Kč
Tlumič hluku za regulátorem	10	ks	4 276 Kč	42 760 Kč
Regulátor průtoku vzduchu	10	ks	8 950 Kč	89 500 Kč
Textilní výustka přívodní	35	m	500 Kč	17 500 Kč
Talířový ventil odvodní	5	ks	221 Kč	1 105 Kč
Protidešťová žaluzie 800x500	2	ks	3 300 Kč	6 600 Kč
Celková kalkulace				906 415 Kč

#### 4.7. Shrnutí

Porovnání obou systémů z hlediska investičních nákladů podává jednoznačnou informaci, a to že systém větrání centrální jednotkou je zdaleka levnější, dokonce i přes 20% slevu poskytnutou prodejcem lokálních jednotek. Pro zajímavost bylo spočítáno, po jak dlouhé době by se investiční i provozní náklady obou systémů vyrovnaly. K takové situaci by došlo až po 87 letech provozu. Vzhledem k životnosti jednotek je jasné, že takový stav s největší pravděpodobností ani nenastane. Proto je možné v závěru říci, že řešení pomocí centrální jednotky, je pro tento případ vhodnější.

Mohlo by být namítnuto, že na trhu jsou k dispozici i levnější lokální jednotky. Pokud by byla pro řešení systému větrání lokálním způsobem použita jednotka například Nilan Comfort 600, která má srovnatelný příkon jako jednotka FVS-S od společnosti LTG (tudíž by měla i stejné provozní náklady), investiční náklady by výrazně klesly. Jednotka Nilan Comfort 600 je totiž zhruba dvakrát levnější. Takovéto řešení by se z hlediska ekonomických úspor dostalo ihned do popředí. Problémem je zde však hluk. Zatímco centrální jednotka je umístěna zcela mimo učebny a přenosu hluku potrubím brání hlukové tlumiče, u lokálních jednotek je

nutné zohlednit fakt, že jednotka je umístěna přímo v učebně, kde není možné hluk jen tak omezit. Lokální jednotka FVS-S od společnosti LTG byla vybrána proto, že v sobě má zabudovaný hlukový tlumič a celá jednotka tak má hladinu akustického tlaku  $L_{WA}$ , při požadovaném objemovém průtoku, pouze 32 dB(A). Jednotka Nilan Comfort 600, která by byla daleko výhodnější po ekonomické stránce, je však z tohoto důvodu zcela nevhodná, protože její hladina akustického tlaku  $L_{WA}$  činí 55 dB. Taková hladina akustického tlaku překračuje hygienický limit hluku pro pracoviště (učebny), na němž je vykonávána práce náročná na pozornost a soustředění, vyjádřený ekvivalentní hladinou akustického tlaku  $L_{Aeq,8h}$ , který se rovná 50 dB. [6]

Uvedená lokální jednotka FVS-S je výrazně dražší než jiné lokální jednotky. Její výhodou však je relativně nízká hlučnost, díky které se dá umístit i do prostor, kde pobývají lidé. To může být výhodné například v situaci, kdy není k dispozici pro umístění jednotky místnost oddělená od větraného prostoru.

Pro zajímavost proběhla na závěr konzultace s panem Mgr. Davidem Korandou, ředitelem společnosti NILAN. Jeho pohled na problematiku se vcelku shoduje se závěrem této práce.

„Při výběru jednotek je potřeba rozlišovat od seriózních výrobků a například zařízení s keramickým jádrem, která mají minimální účinnost zpětného získávání tepla (v daném případě se navíc jedná o regeneraci). U těchto přístrojů výrobci „švindlují“ s deklarovanou účinností. Jako dodavatelé technologií pak samozřejmě hledáme pro školy cenově zajímavá, a hlavně funkční řešení. Na věc je potřeba se dívat ze dvou úhlů – zaprvé samotné odvětrání a zadruhé úspory při větrání. Odvětrat třídu jedním ventilátorem o potřebném výkonu není problém. Je to levné (možná nejlevnější řešení) a svůj účel by to splnilo. Komplikací bude akustika provozu. Obecně každé zařízení umístěné ve třídě s dostatečným výkonem bude mít problém s akustikou. Ideální je velká jednotka pro více tříd (nikoliv pro celou školu) umístěná mimo samotné třídy se správně spočítaným rozvodem. To nikoho neruší a efektivita provozu se dá dobře zorganizovat. Regulační prvky budou jednoduché, nebo za určitých okolností nemusejí být žádné.

Před několika lety jsme jednu budovu realizovali systémem lokálních jednotek na výslovné přání klienta a absolutně se neosvědčil. My nejčastěji osazujeme pro větrání škol jednotky typu VPL 28, které jsou s aktivní rekuperací a jejich přidaná hodnota spočívá v chlazení a zimním dohřevu vzduchu. U jednotek s pasivním deskovým výměníkem totiž hrozí v zimě namrzání výměníku, a to se musí řešit – v podstatě jsou dvě cesty: elektrický přehřev nebo nějaká forma omezení rekuperace (různě směšování, obcházení výměníku atd.). Zkrátka účinný deskový výměník kondenzuje a namrzá. Když snížíme účinnost – rozhodí se efektivita využití. V principu aktivní rekuperace nemají problém s namrzáním (celý proces je totiž řízený). Výhodou jednotek typu VPL 28 je i možnost chlazení, což je záležitost komfortu, ale ne nepodstatná. Když si vezmete provoz školy, tak vyučování probíhá právě v denní době, kdy je největší horko. Uvažujeme-li květen, červen, případně září, celkově jde o jedno čtvrtletí, které dokáže jednotka velmi zpříjemnit.“

## 5. Závěr

Cílem této práce bylo provést tepelnou bilanci učebny základní školy, zvolit průtok venkovního vzduchu s ohledem na hygienické podmínky a odvod tepelné zátěže. Jako vhodné řešení, které zohledňuje tyto požadavky, se jeví případ s objemovým průtokem přiváděného vzduchu  $20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{os}$ . Během vypracování tohoto zadání došlo k několika závěrům. Nad rámec požadavků této práce zde byla vypracována kapitola, která se věnovala produkci, akumulaci a odvodu škodlivých látek. Škodliviny, které jsou produkovány studenty v učebnách, jsou totiž hlavním důvodem, proč by školy měly seriózně zvažovat instalaci nuceného větrání, neboť je to výrazný faktor ovlivňující kvalitu prostředí. Děti v učebnách tráví značné množství svého času a je proto nevhodné tento fakt zanedbávat. Nejen, že nucené větrání podporuje soustředěnost a aktivitu studentů ve třídách, ale zároveň zabraňuje vzniku prostředí, které je pro studenty až zdraví nebezpečné. Dalším cílem této práce bylo navrhnout lokální a centrální systém větrání učeben základní školy a vzájemně je porovnat z pohledu investičních nákladů, potřeby energie a provozních nákladů. Výsledkem těchto návrhů, výpočtů a porovnání, bylo obecné zjištění, že nejvhodnější variantou je větrací systém řešený pomocí centrální jednotky (v tomto konkrétním případě Maxi 4003), která rozvádí vzduch potrubím do všech tříd zadané ucelené části školy. Důvodem je fakt, že toto řešení je schopno poskytnout požadovanou kvalitu vzduchu a zároveň je kompromisem mezi ekonomickou a akustickou náročností možných řešení, které samy o sobě mají buď výhodné ekonomické parametry, avšak nevhodné ty akustické, nebo obráceně.

## Použitá literatura

- [1] Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby ve znění pozdějších předpisů (Vyhláška č.20/2012 Sb.)
- [2] ČSN 73 0540: 2011. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. ÚNMZ.
- [3] CHYSKÝ, Jaroslav a Karel HEMZAL. Větrání a klimatizace: Technický průvodce. Vydání 3., zcela přepracované. Praha: Bolit – B press Brno, 1993. ISBN 80-901574-0-8.
- [4] ZMRHAL, Vladimír. Větrání škol v souvislostech. Praha: Společnost pro techniku a prostředí, z. s. (ČSVTS), 2017. ISBN 978-80-02-02718-8.
- [5] BEGENI, Marek a Vladimír ZMRHAL. Větrání učebny základní školy. Článek v časopise: Vytápění, větrání, instalace. 2014, roč. 23, č. 4, s. 180-183. ISSN 1210-1389.
- [6] Nařízení č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací [online]. Praha: TZB-info, 2011 [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-c-272-2011-sb-o-ochrane-zdravi-pred-nepriznivymi-ucinky-hluku-a-vibraci>
- [7] BEGENI, Marek a Vladimír ZMRHAL. Potřeba energie na větrání učeben a energetický přínos zpětného získávání tepla. Simulace budov a techniky prostředí. 9. konference IBPSA-CZ. 2016.
- [8] Metodický pokyn pro návrh větrání škol [online]. SFŽP, 2015. Dostupné z: <http://www.opzp.cz/dokumenty>
- [9] *Průměrná výška a váha dětí podle věku* [online]. Praha: Ministerstvo zdravotnictví ČR, 2014 [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: [http://eprehledy.cz/prumerny\\_vek\\_a\\_vaha\\_ditete\\_dle\\_veku.php](http://eprehledy.cz/prumerny_vek_a_vaha_ditete_dle_veku.php)
- [10] Vyhláška č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, ve znění pozdějších předpisů (vyhláška č. 343/2009 Sb.).