



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra technických zařízení budov

Optimalizace vnitřního prostředí v rekonstrukcích školních budov

Optimization of indoor environment in school buildings reconstructions

Diplomová práce

Studijní program: Technická zařízení

Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Roman Musil, PhD.

Martin Bžoch

Praha 2016/2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | |
|---|---------------|----------------------|
| Příjmení: Bžoch | Jméno: Martin | Osobní číslo: 395784 |
| Zadávací katedra: K125 - Katedra technických zařízení budov | | |
| Studijní program: - | | |
| Studijní obor: Budovy a prostředí | | |

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Optimalizace vnitřního prostředí rekonstrukcí školních budov

Název diplomové práce anglicky: Optimization of indoor environment in school buildings reconstructions

Pokyny pro vypracování:
Diplomová práce se skládá ze dvou částí:

Prohlubující část se zabývá legislativou vnitřního prostředí školních zařízení, koncept systému větrání, vhodné typy elementů VZT systémů, výpočtový model v designbuilderu a posouzení proudění vzduchu v řešeném prosotru.

Projektová část diplomové práce se bude týkat projektu systému větrání školní budovy, zpracovaný na úrovni rozšířené dokumentaci pro stavební povolení. Součástí dokumentace budou půdorysy, schéma VZT jednotky (jednotek), řezy VZT potrubím, křížení VZT potrubí se stavebními konstrukcemi, technická zpráva včetně požadavků na ostatní profese a funkční schéma VZT systému jako podklad pro MaR.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Roman Musil, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 12.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
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“.

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

Praha, 8.1.2017

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Romanu Musilovi, PhD. za vedení diplomové práce a vynikající spolupráci a také Katedře technických zařízení budov Fakulty stavební ČVUT za výraznou pomoc při tvorbě práce. Další poděkování patří řediteli Gymnázia T.G.M. v Litvínově panu Mgr. Janu Novákovi za ochotu a poskytnutí všech potřebných informací.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| A.1.1 ÚVOD | 9 |
| A.1.2 LEGISLATIVA | 9 |
| A.1.2.1 PŘEDPISY, NORMY, VYHLÁŠKY | 9 |
| A.1.2.2 SHRNUTÍ..... | 12 |
| A.1.3 MOŽNOSTI VZDUCHOTECHNICKÝCH SYSTÉMŮ | 12 |
| A.1.3.1 ÚVOD DO VZDUCHOTECHNICKÝCH SYSTÉMŮ | 12 |
| A.1.3.2 CELKOVÝ KONCEPT | 12 |
| A.1.3.2.1 <i>Koncové části vzduchotechnických systémů</i> | 13 |
| A.1.3.2.2 <i>Přenosové části vzduchotechnického systému</i> | 14 |
| A.1.3.2.2.1 Vzduchovody..... | 14 |
| A.1.3.2.2.2 Ventilátory | 15 |
| A.1.3.2.3 <i>Části pro úpravu vzduchu</i> | 16 |
| A.1.3.2.3.1 Ohřívače vzduchu..... | 16 |
| A.1.3.2.3.2 Chladiče vzduchu | 16 |
| A.1.3.2.3.3 Výměníky ZZT | 17 |
| A.1.3.2.3.4 Filtry..... | 17 |
| A.1.3.2.3.5 Zvlhčovače | 18 |
| A.1.3.2.3.6 Zařízení úpravy vzduchu | 18 |
| A.1.3.2.4 <i>Ochranné části systému</i> | 19 |
| A.1.3.2.5 <i>Regulační části systému</i> | 20 |
| A.1.3.2.6 <i>Pomocné součásti</i> | 21 |
| A.1.4 VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ | 21 |
| A.1.4.1 ÚVOD DO VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ..... | 21 |
| A.1.4.2 PARAMETRY VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ..... | 22 |
| B.1.1 ANALÝZA KONCEPTŮ VZDUCHOTECHNICKÉHO SYSTÉMU | 25 |
| B.1.1.1 POPIS OBJEKTU..... | 25 |
| B.1.1.2 CELKOVÝ KONCEPT BUDOVY | 25 |
| B.1.1.2.1 <i>Vzduchotechnická jednotka</i> | 25 |
| B.1.1.2.2 <i>Součásti vzduchotechnických jednotek</i> | 26 |
| B.1.1.2.3 <i>Doprava vzduchu</i> | 27 |
| B.1.1.3 DISTRIBUCE VZDUCHU | 28 |
| B.1.1.3.1 <i>Varianta 1</i> | 29 |
| B.1.1.3.2 <i>Varianta 2</i> | 30 |
| B.1.1.3.3 <i>Varianta 3</i> | 31 |
| B.1.2 ANALÝZA VARIANT | 31 |

| | | |
|------------------|---|-----------|
| B.1.2.1 | ESTETIKA | 31 |
| B.1.2.2 | ZÁSAH DO STAVBY | 32 |
| <i>B.1.2.2.1</i> | <i>CFD analýza</i> | <i>33</i> |
| <i>B.1.2.2.2</i> | <i>Formulace úlohy.....</i> | <i>33</i> |
| <i>B.1.2.2.3</i> | <i>Model</i> | <i>34</i> |
| | Vstupní parametry CFD | 35 |
| <i>B.1.2.2.4</i> | <i>Analýza výsledků.....</i> | <i>36</i> |
| | B.1.2.2.4.1 Textilní rukávy | 36 |
| | B.1.2.2.4.2 Anemostaty..... | 40 |
| | B.1.2.2.4.3 Dýzy | 44 |
| B.1.2.3 | VYHODNOCENÍ VARIANT | 47 |
| B.1.2.4 | ROZPOČET VARIANT..... | 48 |
| B.1.3 | MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA..... | 50 |
| | Shrnutí hodnocení variant dle kritérií | 51 |
| B.1.3.1 | METODY PRO VÝPOČET MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZY | 51 |
| | Metoda pořadí | 51 |
| | Metoda bodovací | 51 |
| B.1.4 | ZÁVĚR | 52 |
| | CITOVANÁ LITERATURA | 53 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 54 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 54 |

Anotace

Diplomová práce teoreticky rozebírá možnosti implementace technických zařízení pro optimalizaci vnitřního prostředí v rekonstrukcích školních budov. Za pomoci rešerší a multikriteriální analýzy vybírá optimální cestu pro řešení daného problému. Na základě zjištěných poznatků je cílem práce zpracování kompletního projektu vzduchotechnického systému pro Gymnázium T.G.M. v Litvínově, který bude moci sloužit jako vzorový projekt pro podobné realizace.

Annotation

Diploma thesis theoretically analyses alternatives of technical devices implementation for optimization of indoor environment in school building reconstructions. By research and multi – criterial analysis, the optimal way is chosen to resolve the problem. On basis of discovered facts, the objective of thesis is a complete project of ventilation system for Gymnasium T.G.M. in Litvínov, which may be a model project for similar buildings.

A.1 TEORETICKÁ ČÁST

A.1.1 Úvod

Budova školy je jako samotná místem každodenního střetávání lidí rozličných věkových kategorií, potřeb a denních režimů. To samo o sobě naznačuje velmi specifický provoz tohoto druhu staveb.

Po letech mého studia mohu se sebejistotou prohlásit, že prostředí ve školních budovách, kde jsem se pohyboval a trávil velkou část svého času, nebylo vždy v pořádku a mělo nemalý vliv na mou produktivitu práce a soustředění. Budova gymnázia, kde jsem studoval osmiletý cyklus, mě napadá v této problematice jednoznačně jako první. U takto starých objektů je ale samozřejmé, že se při jejich výstavbě s dnešními systémy pro vylepšení komfortu vnitřního prostředí nepočítalo. Nicméně stavět nutně nové školní budovy není z mnoha hledisek vždy vhodné a žádané. Implementace technických zařízení pro vylepšení vnitřního prostředí je proto nezbytnou výzvou pro udržení těchto objektů v rozumném provozním stavu zejména ve vztahu k uživatelům stavby.

Na začátek je nutno vzít v úvahu, v jakém stavu budova je, uvažujeme-li o její generální opravě typu výměny obálky budovy včetně nového systému větrání, potažmo vytápění. V případě omezených ekonomických možností nedovolující takto komplexní řešení je třeba se uchýlit pouze k vylepšování vnitřního prostředí budovy pomocí technických zařízení aj. Samotná kombinace všech kritérií pro rozhodování je velmi komplexní a je nutné zvážit mnoho pohledů na problém.

V dnešní době dochází u školských objektů často k výměnám obvodového pláště, včetně výměny oken za nová těsnější. Tím se sice snižuje celková energetická náročnost budovy, může však docházet ke zhoršení vnitřního prostředí pro studium. U budov historičtějšího charakteru může také nastat situace, kdy byla na místa okenních otvorů umístěna pouze těsná okna bez řešení zateplení obálky budovy.

Implementace systému nuceného větrání má jednoznačně své výhody zejména ve zlepšení uživatelského komfortu stavby, a to nejen z hlediska zdravějšího vnitřního prostředí, ale také při snižování rušivých vjemů z okolí budovy, jako jsou např. hluk, prach aj. V kombinaci s dalšími technickými opatřeními, například s účinným systémem stínění a vytápění, zateplením objektu, a při uživatelském dodržování úsporných opatření budovy lze dosáhnout i významných úspor v provozních nákladech.

A.1.2 Legislativa

A.1.2.1 Předpisy, normy, vyhlášky

Při návrhu větrání vycházíme z těchto předpisů:

- Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) v platném znění

- Zákon č. 20/1966 Sb., o zdraví lidu, ve znění pozdější předpisů – zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví.
- Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví v platném znění §13
- Zákon č. 309/2006 Sb., o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci.

Pro školy je nejzávažnější vyhláška č. 410/2005 Sb., v pozdějším znění č. 343/2009 Sb., Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých.

V rámci vyhlášky je zmiňováno několik parametrů vnitřního prostředí od osvětlení, přes ergonomii nábytku, prostorové nároky a návrh hygienických zařízení, po mikroklimatické podmínky a větrání. Poslední dvě se nejvíce dotýkají našeho návrhu vzduchotechniky.

Paragraf §17 a §18 uvádí následující ustanovení:

Podle §17:

- 1) Stavební řešení budov zařízení pro výchovu a vzdělávání a provozoven pro výchovu a vzdělávání musí být navrženo tak, aby povrchová teplota vnitřních částí obvodových stěn nebyla po celý rok podstatně rozdílná od teploty vzduchu v místnosti.
- 2) V místnosti, kde je použito přirozené větrání okny, musí být okna zajištěna proti rozbití v důsledku průvanu. Ovládání ventilačních otvorů musí být dosažitelné z podlahy.

Podle §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.
- 2) Při poklesu teploty vzduchu v učebnách určených k pobytu dětí a žáků ve třech po sobě následujících dnech pod 18°C, ne však méně než 16°C, nebo při poklesu teploty vzduchu v těchto učebnách v jednom dni pod 16°C, musí být provoz zařízení pro výchovu a vzdělávání a provozoven pro výchovu a vzdělávání zastaven.
- 3) Při extrémních venkovních teplotách, kdy maximální venkovní teplota je vyšší než 30°C nebo kdy je výsledná teplota kulového teploměru $t_{g \max}$ vyšší než 31°C, musí být přerušeno vyučování a zajištěno jiné náhradní opatření pro děti a žáky s možností pobytu mimo budovu včetně zajištění pitného režimu.
- 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.

- 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.
- 6) Přirozené větrání musí být v případě těsných oken zajištěno systémy mikroventilace nebo větracími štěrbinami.¹

Součástí vyhlášky je příloha č. 3, která stanovuje následující požadavky na větrání a parametry mikroklimatických podmínek.

Tabulka 1 - 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 /hod] |
|---|--|
| Učebny | 20-30 na žáka |
| Tělocvičny | 20-90 na žáka |
| Šatny | 20 na 1 žáka |
| Umývárny | 30 na 1 umyvadlo |
| Sprchy | 150-200 na 1 sprchu |
| Záchody | 50 na 1 kabinu, 25 na 1 pisoár |
| *s ohledem na konkrétní využití (dle druhu prováděného cvičení) a kapacitu tělocvičny | |

Tabulka 2 - Průměrné hodnoty výsledných teplot, rychlostí proudění a relativní vlhkosti vzduchu

| Typ prostoru | Výsledná teplota | | | Rychlost proudění | Relativní vlhkost |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| | t _g min [°C] | t _g opt [°C] | t _g max [°C] | va [m/s] | rh [%] |
| Učebny | 20 | 22 ± 2 | 28 | 0,1-0,2 | 30-65 |
| Tělocvičny | 18 | 20 ± 2 | 28 | 0,1-0,2 | 30-65 |
| Šatny | 20 | 22 ± 2 | 28 | 0,1-0,2 | 30-65 |
| Sprchy | 24 | - | - | - | - |
| Záchody | 18 | - | - | 0,1-0,2 | 30-65 |
| Chodby | 18 | - | - | 0,1-0,2 | 30-65 |

Rozdíl výsledné teploty v úrovni hlavy a kotníků nesmí být větší než 3°C.

Tam, kde je rozdíl mezi výslednou teplotou kulového teploměru t_g a teplotou vzduchu t_a menší než 1 °C, lze jako výslednou hodnotu teploty použít hodnotu t_a [°C] naměřenou suchým teploměrem.

Orientační kontrolu teploty vzduchu v prostotách s pobytem lze zabezpečit pomocí nástěnných teploměrů. Teploměry se nesmí umísťovat na stěny s okny a stěny vystavené přímému dopadu slunečního záření.

¹ č. 410/2005 Sb., v pozdějším znění č. 343/2009 Sb., Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých

A.1.2.2 Shrnutí

Z konkrétních ustanovení obsažených ve vyhlášce lze říci následující závěry. Co se týče teplot v samotných místnostech, je nutné vyvarovat se extrémních hodnot, tzn. pohybovat se v rozmezí $t_{g \text{ opt}}$, zároveň zajistit povrchovou teplotu vnitřních stran obklopujících konstrukcí přibližně stejnou, jako je teplota místnosti.

Vyhláška v podstatě doporučuje využití systému nuceného větrání na úkor přirozeného větrání, ať už z důvodu překročení přípustných hodnot škodlivin ve venkovním prostředí, tak z důvodu stále častější instalace nových těsných oken, která zabraňují přirozené infiltraci dovnitř a odvodu vzduchu z místnosti ven.

Jednotlivé hodnoty uvedené v tabulkách přílohy č. 3 je nutné zahrnout do konkrétního návrhu vzduchotechniky pro daný objekt.

A.1.3 Možnosti vzduchotechnických systémů

A.1.3.1 Úvod do vzduchotechnických systémů

Při návrhu konkrétního řešení vzduchotechnického systému do rekonstrukcí škol je potřeba na úplném začátku analyzovat stav budovy a brát ohled na charakter rekonstrukce. Lze počítat s kompletním řešením vylepšení vnitřního prostředí pomocí technických zařízení, stejně tak kombinovaně spolu s celkovým vylepšením tepelně-technických vlastností celé budovy. Neméně důležitý je pak samozřejmě i ekonomický úhel pohledu, včetně možností a požadavků investora. Hlavními kritérii pro řešení systému větrání ve stávajících budovách jsou tedy cena, prostorové možnosti, zásahy do konstrukce, technické řešení. Zásadní překážkou při řešení školních budov historičtějšího charakteru může být také nesoulad s památkovým ústavem ohledně zásahu do rázu budovy aj.

A.1.3.2 Celkový koncept

U celkového konceptu jsou jednoznačnou prioritou prostorové možnosti stavby. Nabízí budova prostory pro umístění jedné nebo více centrálních jednotek včetně možného vedení stoupacích potrubí, nebo se systém bude řešit decentrálně? Další otázkou je kromě vedení přípojovacího potrubí samotná distribuce a odvod vzduchu z rozdílných provozů ve školních místnostech. Pokud neuvažujeme pouze se zajištěním větrání a výměny vzduchu, ale i s teplovzdušným vytápěním, musíme zvážit i tuto možnost a všechny náležitosti s tím spojené.

Celkový zvolený koncept systému větrání je výslednou kombinací jednotlivých dílčích částí soustavy, které se nejlépe hodí pro danou budovu či aplikaci.

Vzduchotechnický systém tvoří části:

- koncové
- přenosové

- úpravy vzduchu
- ochranné
- regulační
- pomocné (1)

A.1.3.2.1 Koncové části vzduchotechnických systémů

„Koncové části jsou komponenty napojené na vzduchotechnický systém v místech výtoků či sání vzduchu z volného vnitřního či vnějšího prostoru budovy.“ (1)

Pro interiérovou aplikaci vzduchotechniky jsou nejpodstatnější vnitřní distribuční prvky. Jejich správná volba je zásadní pro správné provětrání místnosti a dosažení optimálního mikroklima v prostoru. Díky šířce sortimentu a rozvoji ve vývoji těchto prvků neexistuje jednotná terminologie, lze je dle obecných znaků zařadit dle tabulky 3. (1)

Základními distribučními prvky jsou:

Anemostat – distribuční prvek sloužící pro vodorovný přívod vzduchu do místnosti s běžnou světlou výškou a jeho odvod. Bývají připojeny pomocí připojovacího boxu se stranovým a vrchním připojením či přímo na svislé potrubí. Nabízí různá nastavení, manuální či za pomoci servopohonu. Speciálním druhem jsou vířivé anemostaty, které díky tvaru lamel vytváří stejnoměrný vířivý proud přiváděného vzduchu a jsou svým charakterem vhodnější spíše pro větší průtoky vzduchu a tím pádem pro velké, vysoké a objemné prostory. (1)

Vyústka – klasický a nejběžnější vzduchotechnický prvek k přívodu i odvodu vzduchu s širokou možností regulací tvaru, směru proudu, či průtoku pro prostory s běžnou světlou výškou. Nejčastějším typem jsou vyústky mřížkové se čtyřhranným či kruhovým tvarem s umístěním stropním, podlahovým a stěnovým. Speciálním druhem je vyústka štěrbínová, jejíž poměr stran obdélníku je větší než 10 a jsou vhodné pro systémy s proměnným průtokem vzduchu, jenž je tenký, plochý a stálý po celé délce proudu. Velkoplošná vyústka je dalším zvláštním druhem prvku, který je charakteristický pro vytěšňovací proudění, nejčastěji s výdechovou plochou překrytou děrovaným panelem. Speciálním případem velkoplošné vyústky je textilní rukáv, kde je využito perforované tkaniny pro zásobování prostoru vzduchem za pomoci laminárního proudění.² (1)

Dýza – komponenta určena pro přívod vzduchu s nutností dlouhého dosahu proudu vzduchu. Velmi často bývají osazeny regulační klapkou spolu a nabízí možnost nastavit směr proudění v rozmezí $\pm 30^\circ$. (1)

| Kritérium | Charakter a provedení | Typické elementy |
|--------------------|---|---|
| 1 Proudění vzduchu | laminární (vytěšňovací), zaplavovací turbulentní (směšovací), zředovací, difúzní, kompaktní, proudové | velkoplošné výustě, výustky, anemostaty, dýzy, trysky |

² <http://www.prihoda.com/cs>

| | | | |
|---|--------------------|--|---|
| 2 | Lokace | vnější, vnitřní (distribuční) | vyústky, anemostaty |
| 3 | Tvar | čtyřhranné, kruhové, štěrbínové | štěrbiny, dýzy |
| 4 | Materiál | kov, plasty, kombinace materiálů | - |
| 5 | Provedení | průmyslové, komfortní | |
| 6 | Povrchová úprava | nátěr, eloxování, pokovování, izolace | |
| 7 | Situování, osazení | svislé, vodorovné, strop, stěna, podlaha | |
| 8 | Regulace | průtok vzduchu, směr výstupního proudu | klasická VZT |
| 9 | Úprava vzduchu | bez úpravy, filtrace, tepelná úprava - ohřev, chlazení | indukční jednotky, fancoily, inteligentní prvky VZT |

Tabulka 3 – Klasifikace koncových částí (1)

A.1.3.2.2 Přenosové části vzduchotechnického systému

A.1.3.2.2.1 Vzduchovody

„Vzduchovody se přivádí vzduch k větrání nebo klimatizaci prostorů a odvádí vzduch se škodlivinami z těchto prostorů nebo od technologických zařízení.“ Tato potrubní síť včetně regulačních, uzavíracích a pomocných částí tvoří podstatnou součást investičních nákladů, správné navržení této sítě může pomoci ke snížení provozních nákladů. (2)

Materiálem vzduchovodů je nejčastěji plech s povrchovou úpravou. Tloušťka plechu se určuje podle rozdělení do čtyř skupin, kde se zohledňuje rychlost proudění a rozdíly tlaků. Pro běžné rychlosti proudění vzduchu do 16 ms^{-1} a rozdílu tlaků do 1 kPa se používá potrubí skupiny I, kde se tloušťka plechu pohybuje mezi 0,5 – 1,3 mm pro kruhový průřez, od 0,6 – 1,5 mm pro čtyřhranný. Druhou nejpoužívanější skupinou je kruhové potrubí SPIRO, určeno pro větrání, nízkotlaké a vysokotlaké klimatizační systémy, jejichž tloušťka stěny se pohybuje od 0,5 – 0,9 mm podle velikosti průřezu. Pro členité a stísněné prostory jsou vhodné ohebné hadice, které jsou k dispozici v široké škále profilů a variant. Jinými materiály mohou být například plast, beton, zdivo, popř. sklo. (1) (2)

Průřez vzduchovodů je kruhový nebo čtyřhranný. Nejčastěji sledovanými fyzikálními veličinami pro návrh potrubí jsou tlakové ztráty. Ty jsou tvořeny ztrátou třením a místními odpory. Princip správného funkce potrubí spočívá v návrhu ventilátoru, který je svým výkonem schopen dohnat tlakovou ztrátu, kterou veškeré komponenty vzduchovody vytváří. (2)

| Průřez potrubí | rozměry [m] | obvod % | poměr stran | hmotnost % | tlaková ztráta % | cena montáže % |
|----------------|---------------|---------|-------------|------------|------------------|----------------|
| kruhový | d = 0,4 | 89 | - | 66 | 90 | 66 |
| čtvercový | 0,355 x 0,355 | 100 | 1,0 | 100 | 100 | 100 |
| obdélníkový | 0,25 x 0,5 | 106 | 2,0 | 116 | 107 | 114 |
| | 0,16 x 0,8 | 135 | 5,0 | 158 | 143 | 174 |
| | 0,1 x 1,25 | 190 | 12,5 | 231 | 222 | 350 |

Tabulka 4 – Porovnání čtyřhranného potrubí s kruhovým pro stejný průtok $2600 \text{ m}^3/\text{h}$ pro stejný průřez $0,12 \text{ m}^2$. (2)

Vzduchovod je sestaven z jednotlivých dílů, které jsou spojovány převážně přírubami, mezi nimiž bývá umístěn těsnící provazec nebo deskové těsnění z pryžových pásků. Potrubí typu SPIRO se spojuje vsuvnými spojkami těsněnými tmelem, popř. se díly spojují textilní nebo plastovou těsnící páskou. Netěsnostmi uniká část dopravovaného vzduchu a může jimi být zapříčiněná nedostatečná výkonnost systému včetně jeho nehospodárnosti. (2)

Tepelná izolace může tvořit jednu z povrchových úprav potrubí. Slouží k zabránění kondenzace na obou površích vzduchovodu klimatizačních systémů a zabraňuje tepelným ztrátám. Nedostatečná izolace může být příčinou provozních závad, jako jsou například nedostatečné vytápění či chlazení místnosti na konci sítě. (1) (2)

A.1.3.2.2.2 Ventilátory

„Ventilátory jsou lopatkové stroje sloužící k dopravě či přenosu vzduchu tím, že předávají vzduchu mechanickou energii. Jsou primárním výkonným prvkem všech systémů s nuceným pohybem vzduchu.“ Nejpoužívanějšími druhy ventilátorů jsou radiální a axiální ventilátory. (1)

Radiální ventilátory jsou typické nasáváním vzduchu rovnoběžným s osou rotace a výstupem vzduchu na ní kolmým. Hlavní části ventilátoru jsou spirální skříň, oběžné kolo a nosná konstrukce, v provedení jednostranně či oboustranně sacím. Pohon ventilátoru obstarává elektromotor připojený na řemen, či s přímým napojením přes hřídel. Radiální ventilátory bývají často používány v sestavných jednotkách jako součást ventilátorových komor, které jsou uloženy na izolátorech pro snížení přenosu hluku. Kromě vzduchotechnických jednotek existuje modifikace radiálních ventilátorů pro usazení do kruhového i čtyřhranného potrubí. (1)

Axiální ventilátor je charakterizován shodným směrem vstupu i výstupu vzduchu rovnoběžným s osou jeho rotace. Lopatkové kolo je napojeno přímo na elektromotor uvnitř ventilátorové skříně. Dle tlaku před a za oběžným kolem mohou být ventilátory přetlakové (větší tlak za oběžným kolem) nebo rovnotlaké. Vícestupňové axiální ventilátory jsou vytvořeny zapojením více rotorů za sebou, u reverzních ventilátorů existuje také možnost otočit směr proudění vzduchu. Jsou typické pro méně náročné aplikace, jednoduché větrání místností pomocí nástěnného provedení, či prostor s menšími požadavky na stav prostředí. (1)

Dalšími druhy ventilátorů jsou například diagonální ventilátory, jež nabízejí vysokou účinnost díky výstupu vzduchu v úhlu přibližně 45° od osy rotace a nasávání. V malých autonomních jednotkách bývá často použit ventilátor diametrální, v němž dochází k dvojitému prostupu vzduchu skrze lopatky, kde je výhoda malých oběžných kol, libovolná osová délka a také nastavitelnost směru výstupního proudu. (1)

Zásadními parametry pro návrh ventilátorů jsou průtok vzduchu, hlučnost, příkon a tlakový výkon. Výrobci udávají parametry charakteristikami uvedenými v pracovním diagramu. „Diagramy zobrazují závislost tlakové charakteristiky na objemovém průtoku vzduchu a otáčkách.“ Z této závislosti lze odečíst hlučnost ventilátoru, příkon motoru a celková účinnost. Regulaci ventilátorů lze zajistit škrcením, natočením lopatek nebo změnou otáček. (1)

A.1.3.2.3 Části pro úpravu vzduchu

Obecně jsou části pro úpravu vzduchu komponenty, které upravují parametry vzduchu pro následnou tvorbu vnitřního mikroklimatu.

A.1.3.2.3.1 Ohříváče vzduchu

Ohříváče vzduchu primárně zvyšují teplotu vzduchu, čímž sekundárně snižují relativní vlhkost bez změny vlhkosti měrné. V běžných aplikacích bývají ohříváče součástí vzduchotechnických jednotek ve formě předehříváčů či dohříváčů. Na základě použitého primárního zdroje energie můžeme rozlišovat ohříváče vodní, parní, elektrické, popř. na jiná pevná či kapalná paliva. V ohřívací komoře dochází k proudění vzduchu skrze výměník ohříváče, kde dochází především díky konvekčnímu přenosu tepla k ohřátí procházejícího vzduchu. (1)

Na výkon ohříváčů mají vliv především teplotní spád topného média (tepelný výkon), jeho hmotnostní průtok, vstupní a výstupní teplota vzduchu a jeho množství, teplosměnná plocha výměníku a součinitele prostupu tepla ohříváče. Pro zvýšení výkonu lze vložit několik výměníků tepla za sebe. Ohříváč generuje tlakovou ztrátu, kterou je nutno pokrýt. Při návrhu se většinou vychází z podkladů výrobce. (1)

A.1.3.2.3.2 Chladiče vzduchu

Chladiče vzduchu slouží primárně ke snížení teploty procházejícího vzduchu, sekundárně zde dochází ke zvyšování relativní vlhkosti vzduchu, při vzniku kondenzace také ke snižování měrné vlhkosti. Princip výměny energie je v podstatě stejný jako u ohříváčů, včetně primárních zdrojů energie, vyjímaje elektřinu. (1)

Výpočet výkonu a tepelných poměrů je díky změnám vázaného tepla značně složitý. Hlavními veličinami pro návrh jsou chladící výkon, součinitel zvýšení tepelného toku pro mokré chlazení, rozdíl středních teplot, plocha chladiče a rychlost proudění skrz něj, součinitele prostupu tepla výměníku, povrchová teplota chladiče aj. Při návrhu se většinou vychází z podkladů výrobce, popř. softwarových pomůcek. (1)

A.1.3.2.3.3 Výměníky ZZT

Výměníky zpětného získávání tepla umožňují přenos tepla mezi exteriérovým a odváděným vzduchem. K přenosu energie konvekcí dochází skrze stěny výměníku s možnou přítomností skupenských změn. Výměníky se dělí na rekuperační a regenerační. (1)

Jako rekuperační výměníky ZZT jsou nejčastěji využívány výměníky deskové. Dochází zde ke křížovému nebo protiproudému průtoku vzduchů. Účinnost těchto výměníků se pohybuje od 50-60 %, při protiproudém provedení až mezi 80-90 %. Jednoduchost výroby, nízká cena a malé náklady jsou vhodné zejména pro menší vzduchotechnická zařízení. Používanými materiály na deskové rekuperátory jsou nejčastěji hliníkový, nerezový plech a plast. Výhodou deskových rekuperátorů je možnost vzniku kondenzace, která paradoxně zvyšuje účinnost rekuperace, oddělení proudů vzduchu a také absence pohyblivých dílů. (3)

Typem regeneračního výměníku je například výměník rotační. Výměna tepla probíhá prostřednictvím akumulační hmoty, která mění polohu v závislosti na rotaci výměníku, přičemž směr proudění vzduchu je stálý. Akumulační hmota bývá obvykle tvořena hliníkovými plechy jako rotor, při pravidelném otáčení předává a odebírá teplo z proudů vzduchu. Tento typ výměníku umožňuje také přenos vlhkosti, pokud je výměník potažen speciálním materiálem. Účinnost těchto zařízení dosahuje 70-85 % a je závislá na otáčkách rotoru a rychlostech protékajících proudů vzduchu. Tato zařízení nejsou vhodná pro provoz s vysokou vlhkostí, kvůli možnému vzniku kondenzace. Další nevýhodou je pak nutnost pohonu tohoto zařízení, což zvyšuje energetickou náročnost provozu. Výhodou oproti deskovým rekuperátorům je menší velikost ve vzduchotechnických jednotkách. (3)

A.1.3.2.3.4 Filtry

Filtry separují z nasávaného vzduchu tuhé, kapalné nebo plynné částice zejména z atmosféry. Některé z těchto částic mohou být samy o sobě škodlivými pro osoby v uzavřených prostorech. Chrání také vzduchotechnické zařízení proti zanášení a tím i případnému bujení plísní a mikroorganismů, které by přiváděný vzduch udělaly zdravotně závadným. Většina provozů vyžaduje pouze jednostupňovou filtraci, při větších nárocích nebo při velkém znečištění vnějšího vzduchu lze uvažovat filtraci dvou až třístupňové.

Klasifikace filtrů zahrnuje řadu kritérií, viz. tabulka 5. Nejběžnějšími typy jsou filtry skupiny G a F, typickými druhy jsou filtry vložkové a pásové. Součástí vložkových filtrů je skříň, do které jsou vkládány filtrační vložky v podobě desek či kapes, pro maximalizaci filtračního účinku na malé ploše se používají filtry skládané. Princip pásových filtrů spočívá v navíjení filtračního materiálu mezi dvěma cívkami,

kdy dochází k odvíjení špinavé části. Materiálem filtru bývají syntetického původu nebo ze skleněných vláken. Návrh vychází z požadavků na čistitelnost a montáž, tlakové ztrátu, a na veličinách určujících účinnost filtrace. (2) (1)

| Kritérium | Charakteristika a provedení |
|--------------------|---|
| Faktory odlučování | impakce, intercepce, difúze, elektrické síly, sedimentace, síťový efekt, adheze |
| Charakter částic | filtry prachové, aerosolové a speciální |
| Odlučivost | filtry pro hrubý prach zachycující částice hrubé nad 10 μm třídy G, filtry pro jemné částice tzn. nad 1 μm filtry s vysokou odlučivostí třídy H a U pro čistě prostory, aerosoly, radioaktivní částice atp. speciální pro chemické a bojové látky (kryty CO), technologické výpary (např. lapače tuků), apod. |
| Konstrukce | vložkové (výměnné vložky deskové, kapsové skládané v rámech), pásové tzv. odvinovací (dvě cívky s převíjecím pásem filtrační rohože), buňkové (elektrostatické, tvořeny dvěma zónami odlučování) |
| Osazení | potrubí, sestavy strojoven, jako filtrační komory sestavných strojoven, výustné otvory u zařízení s třístupňovou filtrací |

Tabulka 5 - Charakteristika klasifikace filtrů (1)

A.1.3.2.3.5 Zvlhčovače

Prvky pro vlhčení vzduchu slouží primárně k úpravě vlhkosti vzduchu, sekundárně ke změně teploty. K vlhčení se používá voda ve sprchových zvlhčovačích nebo pára ve zvlhčovačích parních. Tyto elementy se nejčastěji umísťují ve vzduchotechnických jednotkách.

Ve vodních zvlhčovačích dochází k adiabatickému vlhčení při sprchování vzduchu vodou při snížení jeho teploty. Základními parametry jsou vstupní a výstupní teplota vzduchu, jeho rychlost a také účinnost vodní pračky. Zvlhčovač je nutné připojit na odpovídající přívod vody a zahrnout jeho tlakovou ztrátu do výpočtu. Systém je nutno udržovat a čistit, je cenově náročný a můžou zde nastávat také problémy s vypouštěním mikroorganismů bujících ve vodě do vzduchu.

Parní zvlhčovače fungují na základě vpouštění páry do vzduchotechnického potrubí. Pára je generována ve vyvíječi páry a přiváděna do systému dle potřeby. Nevýhodou systému je spotřeba energie generátoru páry, proto je využíván jen zřídka, výhodou jsou lepší hygienické parametry. (1) (2)

A.1.3.2.3.6 Zařízení úpravy vzduchu

Jako zařízení úpravy vzduchu lze označit vzduchotechnickou jednotku – soubor několika funkčních elementů k přípravě požadovaného vzduchu, či některé koncové prvky s možností úpravy parametrů vzduchu.

Vzduchotechnické jednotky jsou k dispozici v několika možných provedeních jako například sestavném, blokovém, nástřešním, parapetním, skříňovém, popř. dělené chladicí split systémy. Nejčastějším dnešním provedením jsou jednotky sestavné v podobě komplexu komor, díky kterým je možné dosáhnout požadované úpravy vzduchu. V komorách lze vzduch směřovat, ohřívat, chladit, filtrovat, vlhčit, zpětně získávat teplo, dalšími druhy jsou komory ventilátorové, klapkové či tlumící. Do jednotky směřují přívody energetických zdrojů, které zabezpečují potřeby na provoz zařízení. Jednotky je možné na nožičkách postavit na podlahu, zavěsit pod strop nebo na stěnu. U centrálního systému bývá vzduchotechnická jednotka umístěna separátně a vzduch o určitých parametrech je od ní pomocí potrubí rozváděn do větraných prostorů. Decentrální vzduchotechnické jednotky bývají většinou bez potrubí a jsou umístěny po budově přímo ve větraných prostorách. (4) (1)

Jako takzvané „inteligentní“ koncové prvky lze označit například indukční jednotky či fancoily, které umožňují úpravy teploty vzduchu, popř. filtraci. Součástí bývá ohříváč nebo chladič, funkční prvky, přívod primárního vzduchu a otopné nebo chladicí vody. Prvky se umísťují přímo do větrané místnosti a za pomoci ventilátoru, nebo v případě indukčních jednotek přirozeným oběhem, je vzduch distribuován do místnosti. (1)

A.1.3.2.4 Ochranné části systému

Vzduchotechnický systém, ačkoliv se snažíme o co nejmenší aerodynamický odpor jeho součástí, generuje hluk, který ve vnitřním prostředí může působit rušivým dojmem. Zdroji hluku jsou například ventilátory, pomocná zařízení jako oběhová čerpadla atd. nebo samotné potrubní a koncové prvky systému. Hluk se může šířit prostorem potrubí, popřípadě mechanicky - vibracemi do konstrukcí. K zamezení tohoto přenosu se nejčastěji používá pružinových a pryžových izolátorů chvění. Výrobci vzduchotechnických komponent by měli poskytovat informace o veličinách spojených s hlukem. Pro potlačení těchto nepříznivých jevů se používá různých opatření. (4) (2)

Tlumiče hluku se obecně snaží rozmělnit proud vzduchu a tím snížit hlukové projevy, které se potrubím nesou. Nejčastěji používanými tlumiči ve vzduchotechnice jsou tlumiče absorpční. Princip absorpčního tlumiče spočívá ve vyložení stěn potrubí akusticky pohltivým materiálem, jehož tloušťka závisí na vlnové délce zvukových kmitočtů. Speciálním druhem je tlumič kulisový, který proud vzduchu vytváří různé druhy překážek v podobě ohýbání, zužování či rozšiřování trasy. Kombinací těchto variant tlumičů lze ošetřit různá kmitočtová spektra hluku. „Praxe ukazuje, že není vhodné sestavovat tlumiče delší než 4 m, protože se obvykle za tlumič, který má vysoký útlum dostane hluk jinými cestami.“

Hluk se potrubím může šířit oběma směry, a to jak od ventilátoru, tak i zpětně, proto se doporučuje umisťovat tlumiče hluku v celé délce nejen do strojovny VZT, ale také těsně před chráněný větraný prostor. Tlumiče hluku vytvářejí nezanedbatelný tlakový odpor, je proto nutné jej zahrnout do výpočtu tlakového výkonu ventilátoru. (2)

K útlumu hluku dochází také přirozeně v elementech potrubní sítě, nepatrně v přímém potrubí, více pak v kolenech, obloucích, za pomoci vodících plechů, v rozbočkách, potažmo při rozšíření vzduchovodu. Principem bývá částečný odraz akustické energie zpět ke zdroji. (2)

Součástí vzduchotechnického systému jsou také požární klapky, které se umisťují do prostupů potrubí mezi požárními úseky a zabraňují tak po určitou dobu v šíření požáru a zplodin do ostatních částí budovy. Klapky obsahují pojistku, která se při teplotě kolem 70°C přetaví a prostup se uzavře, nebo je její činnost řízena jinými systémy, např. EPS. Většinou se umisťují tak, aby listy klapky byly v líci dělicí konstrukce, pokud ne, potrubí se od klapky až po požárně dělicí konstrukci izoluje. Pro pravidelnou kontrolu funkce klapky je nutné zajistit k nim přístup. (4)

Změnami teploty vzduchu skrze stěny nebo netěsnostmi vzduchotechnického potrubí dochází k významným závadám systému jako k například nedostatečně teplému či studenému přiváděnému vzduchu nebo kondenzaci v potrubí. Tyto nežádoucí jevy minimalizujeme použitím tepelné potrubní izolace. Její tloušťka se běžně pohybuje v rozmezí 40–100 mm. Protihlukové izolace chrání vzduch v potrubí proti vnějšímu hluku, nebo naopak akustické mikroklima větraných místností. Jako požární ochrana se v kombinaci s požárními klapkami instalují izolace protipožární. Izolace se obecně vyrábějí z rohoží minerální vlny nebo pěnového polyetyleny s vnějším povrchem z hliníkové fólie. (4) (2)

A.1.3.2.5 Regulační části systému

Regulace vzduchotechnického systému upravuje tlakové ztráty za účelem proudění žádaných průtoků vzduchu do větví systému a koncových elementů. Jako regulaci průtoku vzduchu lze brát také samotné dimenzování velikosti průřezu potrubí, kterým je ovlivněn nejen průtok, ale i rychlost proudu vzduchu a tlakové poměry. (4) (2)

Regulátory průtoku pro konstantní průtok se používají tam, kde je za regulátorem vyžadován konstantní průtok vzduchu při měnících se tlakových poměrech v síti. Ke škrcení dochází samočinně za pomoci pružiny, která reaguje na průtok vzduchu a působí tak na klapku nebo segmentovou clonu. (4)

Regulátory průtoku pro proměnný (variabilní) průtok reagují dle potřeby na různé režimy a nastavení potřebného průtoku vzduchu pro větraný úsek za regulátorem. Mohou být ovlivňovány měřitelnými veličinami vnitřního prostředí, jako například teplotou a koncentrací CO₂. Nastavení probíhá pomocí servopohonu. Při kombinaci dvou regulátorů na přívodním a odvodním potrubí lze také účinně ovládat tlakové poměry ve větraném prostoru. (4)

Regulační klapky plynule regulují objemový průtok vzduchu za pomoci manuálního ovládání, či servopohonu. V těsném provedení mohou sloužit také jako uzavírací, při jejím přivření je zdrojem hluku a tlakových ztrát v závislosti na naklopení lamel. (4)

„Samočinné klapky se používají pro samočinné sání nebo výfuk vzduchu, ale také pro vyrovnání tlaku mezi sousedními místnostmi.“ Zpětné klapky fungují na stejném samočinném principu, mají za úkol zamezit průtoku vzduchu jedním konkrétním směrem. (4)

A.1.3.2.6 Pomocné součásti

Nedílnou součástí větracího systému je jeho samotné připojení ke stavebním konstrukcím. Jako takových se používá závěsů, podpěr, rámu, úhelníků aj. Výrobci často poskytují širokou škálu a variabilitu těchto prvků. Při návrhu systému je nutno brát ohled na stavební konstrukce a dbát nejen na stabilitu vzduchotechnického potrubí, ale také na odolnost těchto elementů, proto je jejich nejčastějším materiálem kov. (1)

A.1.4 Vnitřní prostředí

A.1.4.1 Úvod do vnitřního prostředí

Vnitřní prostředí budovy je v podstatě to hlavní, proč navrhujeme systémy větrání. Je prokázáno, že stav vnitřního prostředí ve všech jeho složkách má vliv na celkovou spokojenost uživatelů budovy, což se projevuje nejenom v celkové náladě, a tím i atmosféře budovy, ale také v produktivitě vykonávaných činnostech.

Školní rok, a tím i provoz školy, se odehrává především v chladnějším období kalendářního roku, proto prostory vytápíme a zároveň se snažíme snížit energetickou náročnost. Investici do systému vzduchotechniky lze ale také vnímat z pohledu dětí, pro které je škola každodenní prostor s velkou koncentrací osob na podlahovou plochu.

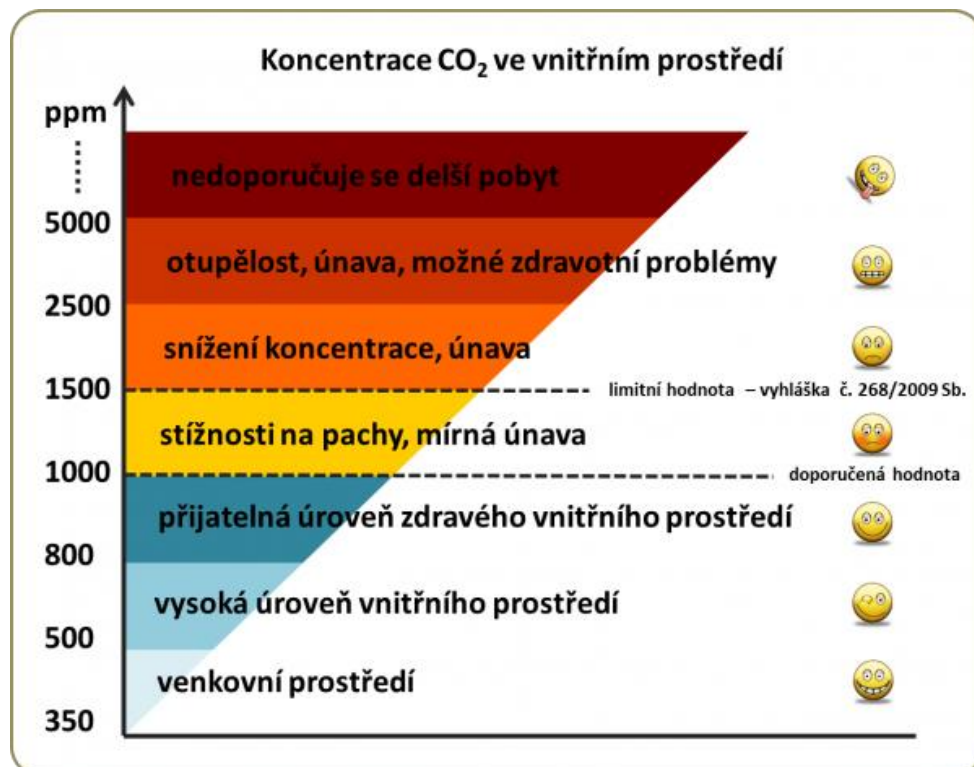
Pokud se ve školních místnostech vymění okna za nová těsnější, žákům není přiváděno dostatečné množství venkovního čerstvého vzduchu, a tím se koncentrace zátěže v prostoru rychle zvyšuje. Vzniká také problém s odvodem teplého vzduchu od stropu tříd, riziko průvanu a stejně tak s rostoucí automobilovou dopravou i potíže s hlukem a prachem.

To vše ústí ve zvýšenou koncentraci částic jako např. CO₂, nebo ve vydýchaný vzduch. Následkem toho může vznikat zvýšená hyperaktivita dětí, což je ale v podstatě maskování únavy a problémů s udržení pozornosti z důvodu nekvalitního prostředí. (5)

A.1.4.2 Parametry vnitřního prostředí

Na uživatele v uzavřených prostorách spolupůsobí několik faktorů, jako například teplota, relativní vlhkost a rychlost proudění vzduchu spolu s koncentrací různých zátěží, jakými mohou být CO₂ a další agencie. Při vyšší teplotě spolu s vyšší relativní vlhkostí nastává pocit nepříjemného dusna, při němž se osoby více potí a zpětně zatěžují prostředí pachy. V uzavřeném prostoru bez dostatečného větrání se zvyšuje množství organických látek (prachu, vlasů, částiček kůže) a také roste koncentrace výparů z nábytku a nátěrů (formaldehyd, styren aj.). To může mít za následek následný vznik alergií a jiných zdravotních potíží. (5)

Jedním z hlavních ukazatelů kvality vnitřního prostředí je koncentrace oxidu uhličitého CO₂. Při dýchání se koncentrace ostatních plynů obsažených ve vydechovaném vzduchu příliš nemění s koncentracemi vdechovaného vzduchu. Oxid uhličitý je v tomto výjimkou (koncentrace z 0,034 % na 16 %), a jeho koncentrace v uzavřené místnosti při pobytu osob prudce stoupá. (5)



Obrázek 1 - Vliv koncentrace CO₂ ve vnitřním prostředí na chování lidí³

Je dokázáno, že koncentrace CO₂ ovlivňují naše chování (viz. obr. 1), ačkoliv je tento vliv velice subjektivní. Citlivější jedinci usínají už kolem koncentrací kolem 1100 ppm. Při nedostatku kyslíku začíná mozek filtrovat vjemy. Ty méně podstatné vypouští, čímž se jeho soustředění upíná na tabuli a učitele a poté nastupuje malátnost a lenost. Vyšší koncentrace CO₂ může mít také za následek rychlejší odumírání mozkových buněk. (5)

³ Zdroj: <http://www.pasivnidomy.cz/okny-se-efektivne-vyvetrat-neda/t4327?s=1>

B.1 PRAKTICKÁ ČÁST - ANALÝZA

B.1.1 Analýza konceptu vzduchotechnického systému

Vzduchotechnické prvky systému nabízejí rozličné varianty, kombinace a možnosti jejich použití. Analýza celkového konceptu na základě znalostí načerpaných v rámci teoretické části aplikovaných na konkrétní budovu má za úkol najít ideální řešení větrání pro daný objekt, eventuálně pro podobné projekty.

B.1.1.1 Popis objektu

Budova Gymnázia T.G. Masaryka byla postavena v roce 1926 jako tehdejší česká měšťanská škola. Gymnázium bylo založeno v roce 1947 a do budovy přestěhováno v roce 1968. Stavba ve stylu německého funkcionalismu dodnes slouží jako vzdělávací instituce pro cca 350 studentů a obsahuje kromě učeben také knihovnu, výtvarný ateliér, počítačovou učebnu, laboratoře, posilovnu a tělocvičnu.⁴

Konstrukce stavby odpovídá době vzniku, tzn. zděný stěnový systém z plných pálených cihel s konstrukčním modulem 150 mm. Stropní konstrukce je keramická, trámová s betonovými podlahami. Dispozičně je budova rozdělena na několik traktů, jižní trakt obsahuje učebny biologie, tělocvičnu a jednu bytovou jednotku. Západní trakt prostupuje všemi podlažími objektu a zahrnuje administrativní část školy spolu s bytem školníka a učebnami. Nejvíce učeben sdružuje východní trakt, kde jsou na každém podlaží tři učebny spolu s hygienickým zázemím.

Budova prošla v roce 1996 rekonstrukcí podkrovních prostor, kde vznikla knihovna, výtvarný ateliér a počítačová učebna. Další rekonstrukce střechy byla poté provedena v roce 2012 a týkala se nového řešení odvodnění. V roce 2003 byla kompletně opravena fasáda objektu spolu s osazením nových těsných dřevěných oken, avšak nebylo provedeno zateplení. Poslední rekonstruovanou částí gymnázia byl suterén, který v roce 2015 obdržel nové zateplení a odizolování suterénních stěn spolu s kompletní sanací zdiva a podlah.

B.1.1.2 Celkový koncept budovy

Budova jako taková nenabízí příliš mnoho možností celkového řešení. Kvůli ochranně její historické hodnoty a také z ekonomického hlediska nám není umožněno provádět do objektu zásadní zásahy. Výběr optimálního řešení bude vycházet z mnoha aspektů, které je potřeba zohlednit.

B.1.1.2.1 Vzduchotechnická jednotka

Umístění vzduchotechnické jednotky je jedním ze základních úskalí projektu. Můžeme prakticky hned vyloučit její osazení na fasádu objektu, který je památkově chráněný, a také na střechu, která je na více než 90 % půdorysné plochy šikmá. Jedinými většími použitelnými prostory jsou původní místnosti pro skladování uhlí v suterénu

⁴ <http://litvinov.sator.eu/kategorie/litvinov/v-letech-1949-1989/gymnazium-tgm-v-litvinove>

objektu, dnes sloužící jako sklady. Výhodou těchto prostor je možnost snadného napojení na přírůdy energií a jejich izolovanost od provozu školy. Problémy může způsobit doprava takové jednotky na místo, nebo nutnost vytvoření přírůdů čerstvého vzduchu do jednotky skrz suterénní stěnu, popř. sklepní světlíky do prostoru západní fasády objektu. Dalším výrazným úskalím je vertikální vedení potrubí skrz celý objekt. Nabízí se sice elegantní řešení vést jej původní výtahovou šachtou a v jednotlivých podlažích odpojit jednotlivé páteřní větve. Velikost tohoto prostoru má v průřezu rozměry 1,05 x 1,25 m, proto se zde můžeme potýkat s nedostatkem místa, jak pro vedení samotných stoupacích potrubí, tak pro jejich náročné napojení na ležaté rozvody spolu s dalšími nezbytnými elementy jako např. požárními klapkami atd.

Další možností je rozmístění více centrálních vzduchotechnických jednotek. Na každém podlaží v místnosti toalet ve východním traktu, kde nejsou kladeny výrazné nároky na akustické mikroklima, by pod stropem mohla být zavěšená menší vzduchotechnická jednotka zásobující čerstvým vzduchem své patro. Koncept tohoto systému spočívá ve zjednodušení geometrie soustavy, redukci velkých průřezů potrubí, absence stoupaček, nebo třeba jednodušší doprava menších jednotek do daných prostor bez nutných bouracích prací atd. Vzdálenost dopravy energií může být problémem, zahrnuje vytvoření ležatého rozvodu od rozdělovače a nového stoupacího potrubí skrz několik podlaží. Přívod čerstvého vzduchu do jednotky je asi největší překážkou tohoto konceptu. Ke každé jednotce musí být zvlášť přivedeno nasávací a výfukové potrubí, která zákonitě musí vyústit na fasádě objektu. Možným řešením mohou být protidešťové mřížky jako falešná součást okenního otvoru. Další možností je vytvoření nových otvorů do obvodové stěny včetně koncových elementů, to vše směrem na severní nebo východní fasádu objektu. Obě varianty jsou z mnoha hledisek krajně obtížné, jiné formy integrace do budovy se ale příliš nenabízejí.

Decentrální jednotky se pro rekonstrukci daného objektu jeví jako nesmyslné, zejména při zohlednění vysokého počtu zásahů do fasády při vytváření průchodů pro čerstvý vzduch spolu s velkými nároky na údržbu.

B.1.1.2.2 Součásti vzduchotechnických jednotek

Jednotka bude sestavena z následujících částí:

Vstupní vložkové kapsové filtry pro oddělení škodlivých látek ze vzduchu. Filtr exteriérového vzduchu třídy G, filtr odpadního vnitřního vzduchu skupiny F jako běžně používané druhy při použití do prostor bez zvýšených požadavků na čistotu vzduchu. Venkovní ani vnitřní prostředí není výrazně znečištěné. Velikost filtrů se odvíjí od požadavků výrobce jednotky.

Rekuperační výměník ZZT deskový jako jednoduchý a efektivní prvek pro zpětné získávání tepla. Větrané prostory nevyžadují instalaci regeneračního výměníku, deskový

výměník je levnější, nepotřebuje k provozu pohon a neobsahuje pohyblivé díly. Je důležité napojit výměník na odvod kondenzátu.

Jako primární zdroj energie pro ohříváč vzduchu byla vybrána voda, a to především z důvodu zachování konceptu rozvodu energií v objektu. V takovéto aplikaci nemá v podstatě smysl ohřívát vzduch párou nebo elektricky z důvodu nákladného provozu. Konkrétní typ výměníku bude navržen dle podkladů výrobce vzduchotechnické jednotky.

Chladič vzduchu je v případě školních budov spíše doplňkovou součástí jednotky. Maximální chladící výkony, které by byly potřeba v letních měsících pro pokrytí tepelné zátěže, nejsou prakticky zapotřebí. Spolu s účinným stíněním lze potřebu chladícího výkonu také snížit. V objektu se tedy počítá s osazením malé chladící split jednotky pro pokrytí tepelné zátěže během několika jarních dní. Výměník bude napojen na potrubí chladící vody. Při detailním návrhu bude postupováno dle podkladů výrobce.

Součástí jednotky budou také ventilátory. Ve vzduchotechnických jednotkách jsou nejčastěji používány ventilátory radiální, nejinak tomu bude i v našem případě. Jeden ventilátor bude umístěn za ohříváčem a chladičem jednotky pro dopravu čerstvého vzduchu do větraných prostor, druhý na vstupní straně odpadního vzduchu pro sání z větraných prostor. Konkrétní typ, velikost, druh a výkon ventilátoru se odvíjí od typu konkrétní jednotky, při jeho návrhu bude postupováno dle podkladů výrobce. Musí být schopen překonat tlakové ztráty systému potrubí a přenést požadované množství vzduchu.

Pro eliminaci hluku ventilátorů budou na interiérovou stranu vzduchotechnické jednotky aplikovány tlumiče hluku. Tlumič bude s největší pravděpodobností absorpční, jeho konkrétní návrh bude záviset na hlukových poměrech daného systému. Podstatné bude zabezpečit požadované akustické podmínky v nejbližším větraném prostoru (vzduchotechnické jednotce) s nároky na hlukové mikroklima. Dané opatření by mělo vyhovovat a být dostatečné i pro vzdálenější místnosti. Je doporučeno použít sekundární tlumiče hluku před vstupy do chráněných větraných prostor. Pokud to prostorové podmínky umožní, bude tak navrženo.

B.1.1.2.3 Doprava vzduchu

Soustava vzduchovodů bude tvořena plechovým potrubím s různými povrchovými úpravami. Z hlediska přenosu tepla bude izolováno tepelnou izolací, zejména v částech budovy, kde může docházet k únikům tepla (nevytápěné prostory). Při řešení požární bezpečnosti může být v některých úsecích zapotřebí opatřit potrubí požární izolací. Při nežádoucích akustických projevech je možné dodatečně počítat i s akustickými izolacemi.

Průřez potrubí je zvolen čtyřhranný obdélníkový. Při návrhu potrubní sítě se v tomto historickém objektu snažíme o minimalizaci prostorových nároků. Pro nenarušení vnitřní estetiky objektu je, zejména z důvodu nízkých okenních nadpraží, potřeba zmenšit vertikální rozměr potrubí na co nejmenší, k čemuž z nabízených tvarů průřezů nejlépe

odpovídá právě průřez obdélníkový. Při konkrétním návrhu se však snažíme, především kvůli tlakovým ztrátám, jež vykazují obdélníková potrubí jako poměrově vyšší, dodržovat poměr stran ≤ 4 .

Koncept geometrie vedení se nabízí díky dispozičnímu řešení objektu téměř sám. Chodby dávají prostor k podstropnímu vedení hlavních páteřních větví, od kterých se odpojují větve podřadné do jednotlivých místností, či jejich skupin. Dimenze potrubí se směrem od vzduchotechnické jednotky zmenšují pro zachování optimálních průtokových a rychlostních poměrů. Rozvody v jednotlivých větraných prostorech jsou řešeny v návaznosti na distribuční elementy, viz. kapitola distribuční elementy.

Regulace vzduchotechnického systému bude řešena za pomoci regulátorů variabilního průtoku, které jsou schopny reagovat na potřebu vzduchu a na různé režimy větraného prostoru. V návaznosti na problematiku vnitřního prostředí budou regulátory ovládány pomocí čidel měřících koncentraci CO₂. Nastavení probíhá pomocí servopohonu, které každý regulátor obsahuje. Pro možnost řízení tlakových poměrů učeben bude regulátor namontován i na odvodní potrubí, díky čemuž bude možné také regulovat ventilátor jednotky.

Po celé trase vzduchovodné soustavy jsou respektovány nároky na správné a bezpečné fungování systému. Při odbočení do větraných prostor z páteřního potrubí se umísťují regulační elementy, popř. tlumič hluku. Umístění protipožárních klapek je projektováno s ohledem na požárně-bezpečnostní řešení, nejčastěji na předělech požárních úseků.

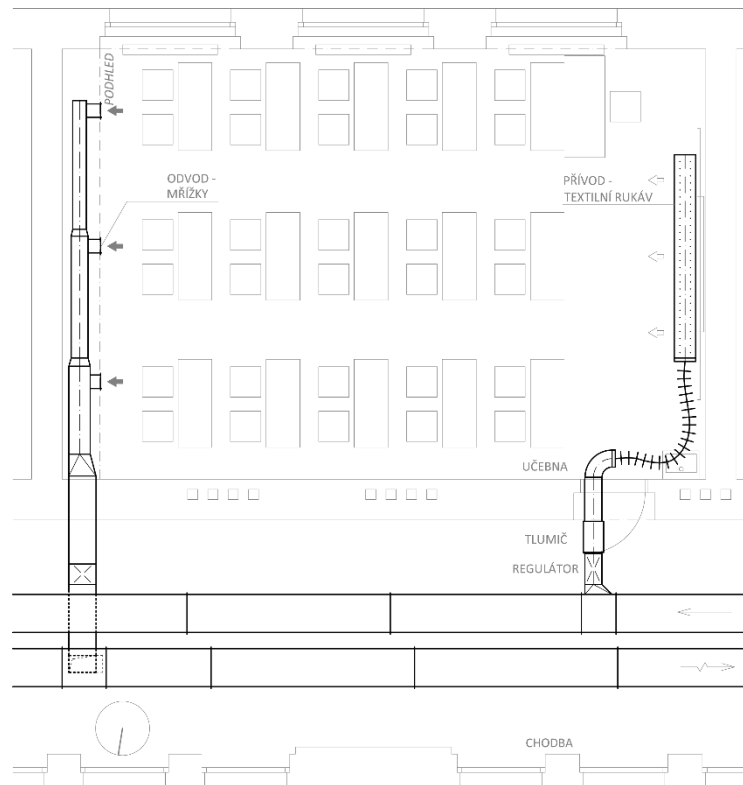
B.1.1.3 Distribuce vzduchu

Samotná distribuce vzduchu do místností je nejpodstatnější složkou větracího systému z hlediska vnímání vnitřního prostředí. Školní budova nabízí několik typů místností. V nich se liší požadavky na vnitřní prostředí a účel využití.

Jako nejdůležitější místnost ve školách lze označit učebny, ve kterých se odehrává většina denního režimu uživatelů budovy. Pro zjištění nejvhodnějšího řešení distribuce vzduchu do učeben je potřeba srovnat několik variant řešení, zhodnotit a vybrat jednu konkrétní možnost. Varianty byly vybrány na základě teoretické části ty, které se jeví pro danou stavbu nejvýhodněji a nejlogičtěji. Řešení jednotlivých analyzovaných možností bylo navrženo podle získaných zkušeností a viděných realizací.

B.1.1.3.1 Varianta 1

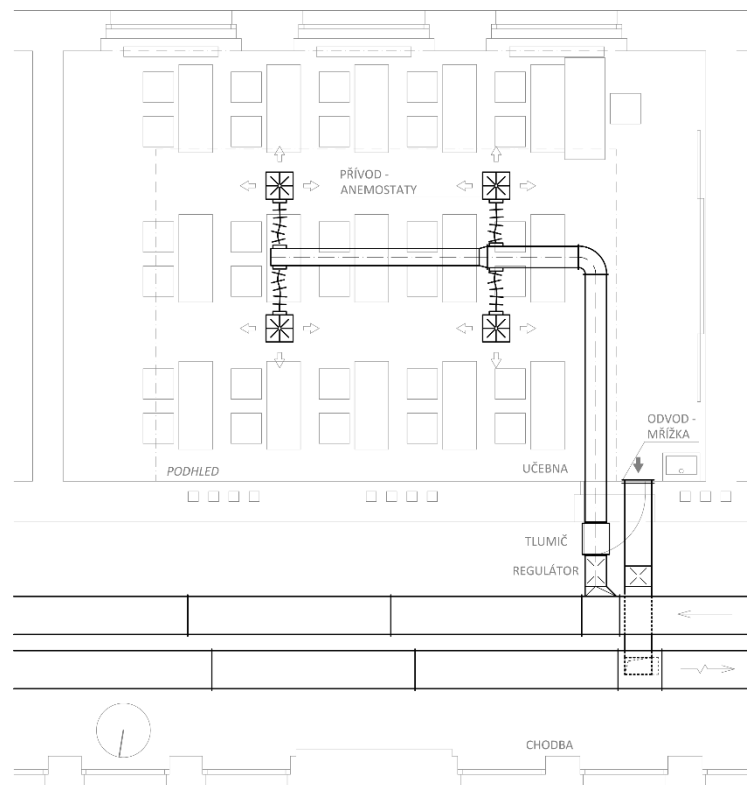
První varianta počítá s umístěním perforovaného textilního rukávu do každé učebny nad prostor tabule, či promítacího plátna. Je zabezpečen dostatečný odstup od stropu a zároveň neomezení výhledu na projekční prostředky potřebné k výuce. Odvod vzduchu z místnosti je navržen na opačném konci místnosti jako potrubí kruhového průřezu s několika odvodními mřížkami dle potřeby. Odvodní potrubí je možné skrýt za sádkartonovou podhledovou konstrukcí.



Obrázek 2 - Půdorysné schéma varianty 1

B.1.1.3.2 Varianta 2

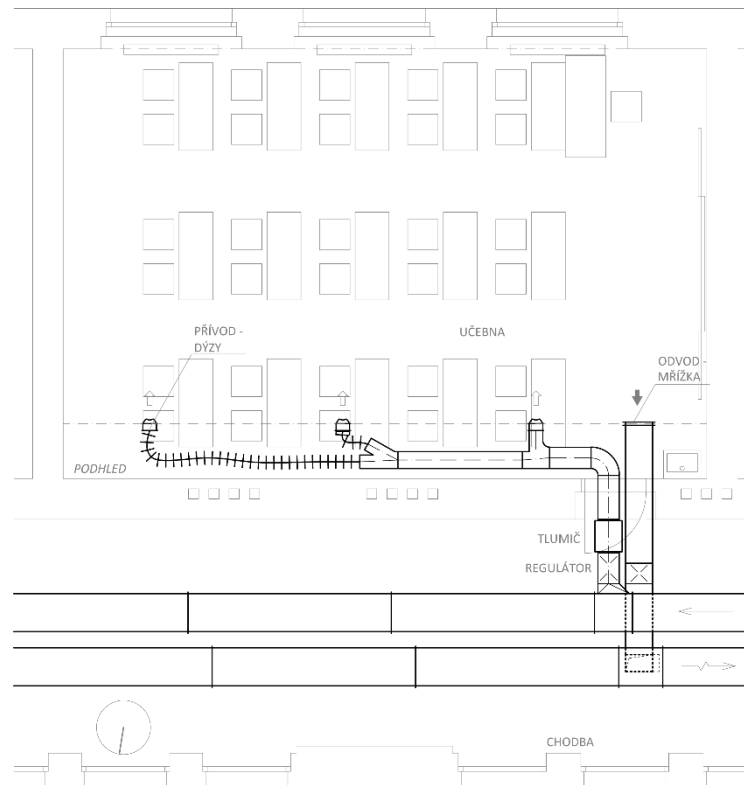
Druhým zvoleným řešením pro prostor učeben je umístění čtveřice anemostatů do podstropní oblasti na úrovni uliček mezi lavicemi z důvodu zanechání světla na pozicích nad pracovními stoly. Tento systém nelze schovat do celoplošné podstropní podhledové konstrukce z důvodu nízkého nadpraží oken. Odvod je řešen jako mřížka ve vnitřní stěně sousedící s chodbou.



Obrázek 3- Půdorysné schéma varianty 2

B.1.1.3.3 Varianta 3

Třetí varianta řešení vzduchotechniky v modelové učebně je navržena jako skupina nastavitelných dýz na podélné straně učebny naproti oknům. Dýzy posílají několika kompaktními proudy čerstvý vzduch do místnosti pod jejím stropem. Odvod vzduchu je podobně jako u druhé varianty navržen jako mřížka ve stěně sousedící s chodbou.



Obrázek 4 - Půdorysné schéma varianty 3

B.1.2 Analýza variant

B.1.2.1 Estetika

Estetická stránka řešení vzduchotechnických systémů je u rekonstrukcí velmi podstatná a je nutné ji při výběru nejvhodnější varianty zvážit. Může ovlivnit charakter vnitřních prostor a při necitlivých zásazích i nepříznivě narušit původní ráz budovy. Při hodnocení dané problematiky může dojít do značné míry k subjektivnímu hodnocení, proto bude při posuzování zohledněna určitá skupina kritérií, stejných pro každou variantu. Kritéria jsou:

- ukrytí systému
- vizuální jednotnost
- vzhled koncových prvků

Varianta 1 s přívodem vzduchu pomocí textilních rukávů nenabízí velké množství elegantního ukrytí vzduchotechnických prvků. Rukáv je i při možnosti použití široké palety barevných provedení výrazným prvkem v oblasti, kde je nejvíce soustředěna pozornost

studentů spolu s možností kolizí s učebními pomůckami (tabule, projekční plátno). Zákryt přívodních prvků by byl spíše lokální, a tím by esteticky vhodně nedoplňoval jednoduché linie prostoru. Kvůli konceptu laminárního proudění je nutné umístit odvodní potrubí na druhý konec místnosti, kde se nabízí ukrytí odvodního potrubí s mřížkami do podhledu na celou šířku místnosti, což nenarušuje linie celého prostoru, spolu s přívodním úsekem však působí nejednotně.

Druhá varianta, která uvažuje s distribucí vzduchu pomocí anemostatů je z důvodu nemožnosti instalace celoplošného podhledu vysoce komplikovaná. Výška připojovacích skříní se u většiny výrobců (Mandík, Systemair, Trox), pohybuje spolu s rezervou nad 300 mm, přičemž učebny v řešené škole mají nadpraží vysoké 250 mm. Možnosti, jak vytvořit potřebný podhled, jsou odstupňování celoplošného stropního podhledu směrem k oknům, nebo vytvoření zákrytu pouze na ploše, potřebné k zakrytí celého systému. Při předpokladu montáže anemostatů do pohledové konstrukce je zajištěno dostatečné ukrytí přívodního systému včetně jeho jednotnosti a dobrého vzhledu přívodních prvků. Odvod vzduchu mřížkou nad dveřmi vzhledově neodpovídá konceptu přívodních prvků, výhodou je však absence odvodního potrubí v místnosti.

Instalace dýz jako přívodního prvku ve variantě 3 neklade příliš mnoho obtíží v konstrukčním řešení ani v zásahu do funkce prostoru. Ukrytím celého přívodního systému do podhledu vedeného při podélné straně učebny je zde vizuálně nejméně zasahováno do celkového prostoru místnosti a není tak narušena ani její geometrie. Spolu s odvodní mřížkou vytváří dýzy i při vizuální nejednotnosti koncových prvků kompaktní systém distribuce vzduchu.

B.1.2.2 Zásah do stavby

U rekonstrukcí je nutností řešit symbiózu budovy s novými technickými systémy. Souvisí s tím mnohá omezení pro projektanta nejenom z hledisek prostorových, ale zároveň konstrukčních, statických aj. Při zavádění nových technických zařízení do stávající stavby je třeba zohlednit také návaznost na stávající profese. Při kolizi může dojít k navýšení nákladů kvůli nutnosti nových řešení ostatních systémů. Pro výběr nejlepší varianty budou zhodnocena následující kritéria:

- návaznost na osvětlení
- rozsah bouracích prací
- prostorová náročnost

Pro první variantu je z hlediska zásahu do stavby charakteristická nutnost vytvoření dvou oddělených prostupů skrz vnitřní nosnou zeď. Při snaze o vytvoření jednoho většího kompaktního prostupu pro přívod a odvod vzduchu dojde k navýšení množství potrubí při vnitřní podélné stěně a tím i k větší prostorové náročnosti. K tomu dojde například u

koncových učeben východního traktu. Montáž této varianty nezpůsobuje žádné kolize se stávajícími technickými systémy.

Varianta č. 2 nabízí možnost sdružení otvorů pro přívodní a odvodní potrubí, čímž se relativně zmenší rozsah bouracích prací. Anemostaty spolu s potrubními rozvody představují velký zásah do podstropního prostoru celé učebny nehledě na nutnost vytvoření masivní podhledové konstrukce. Tím vyvstává další problém s potřebou předělání systému osvětlení do podhledu.

Třetí varianta také nabízí zkompatnění bouracích prací v nosné stěně, zásah do učebny je však minimální při ponechání celého distribučního systému podél vnitřní stěny, díky čemuž nedochází k žádným dalším kolizím se systémy osvětlení ani k navyšování sítí potrubí v atypických učebnách.

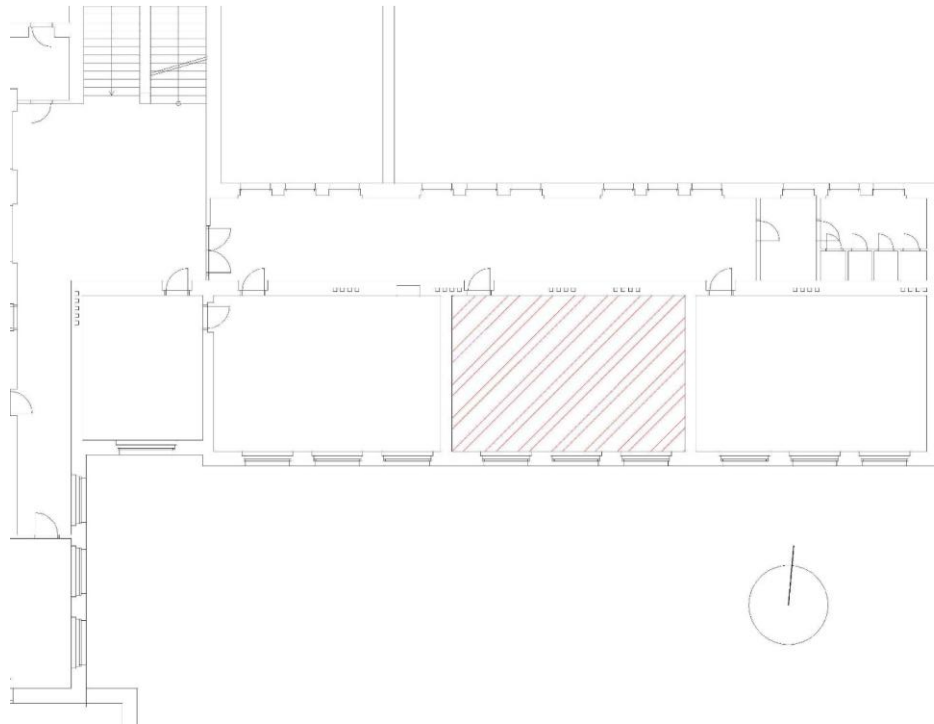
B.1.2.2.1 CFD analýza

Možnou nejlepší metodou hodnocení vnitřního prostředí je virtuální model rozložení teplot a rychlosti vzduchu v místnosti při jednotlivých variantách řešení distribuce vzduchu do modelových učeben. K tomu poslouží CFD model místnosti, kde lze tyto veličiny snadno sledovat a zhodnotit, a zároveň za pomoci softwaru optimalizovat zvolenou variantu. S metodou CFD pracuje program DesignBuilder, který byl pro tuto část analýzy zvolen.

CFD (Computational fluid dynamics) je metoda kvalitativní a někdy i kvantitativní predikce proudění tekutin za pomoci matematického modelování, numerických metod a softwarových nástrojů. Slouží k levnější, rychlejší a snazší simulaci ve všech možných aplikacích, jako například v průmyslovém designu, chemickém a petrochemickém průmyslu či v meteorologii. Zároveň je to mocný nástroj pro architekty a stavební inženýry při simulaci proudění vzduchu kolem budov, či ve vnitřních prostorech. (6)

B.1.2.2.2 Formulace úlohy

Objekt není nutno analyzovat jako celek, jelikož se učebny v jednotlivých patrech opakují. Modelová místnost byla tedy určena jako jedna z učeben ve východním traktu budovy s orientací oken na jih. Místnost o rozměrech 9,5 x 3,5 x 3,5 m je vybavena litinovými radiátory pod okny, její maximální obsazenost byla zvolena na 30 osob.

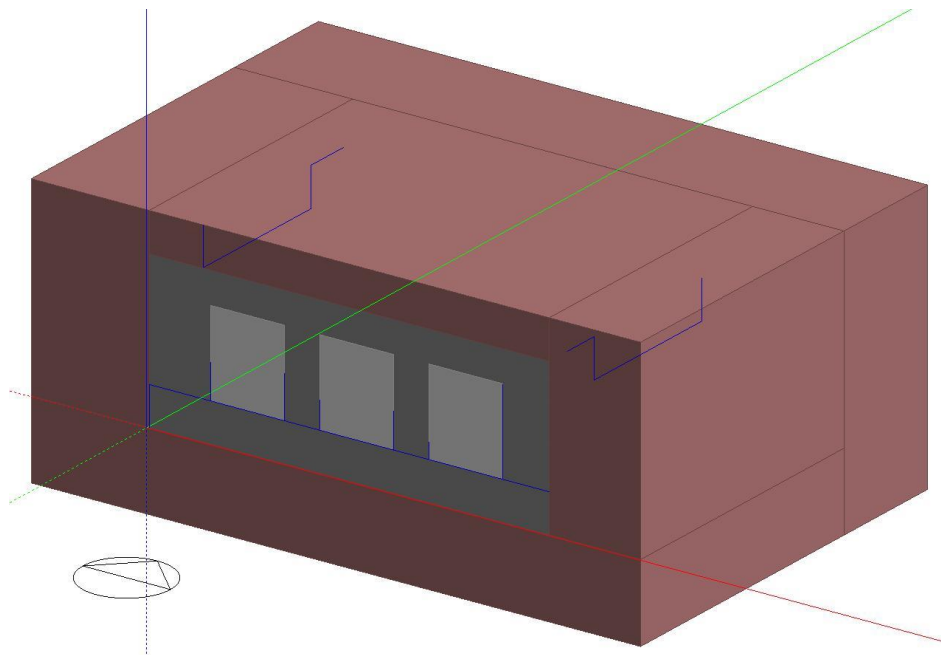


Obrázek 5 - Půdorys typického podlaží

Jako vypovídající situace pro analýzu byly zvoleny dvě extrémní podmínky pro místnost, tzn. zimní a letní prostředí. Pro CFD analýzu nerozhodují teploty vzduchu, ale teploty jednotlivých povrchů v místnosti. Bylo tedy nutné provést celoroční simulaci modelu a výběr nej(ne)příznivějších dnů. Pro tyto dny byly zadány konkrétní teploty povrchů.

B.1.2.2.3 Model

Byl vytvořen základní model místnosti dle skutečných rozměrů, s okny a jednotlivými konstrukcemi. Stěny jako jednoduché cihlové oboustranně omítnuté, stropy jako železobetonové s podlahou z betonu, krytina linoleum.



Obrázek 6 – Model místnosti

CFD analýza nepracuje s teplotou vzduchu v místnosti, ale teplota se nastavuje pro jednotlivé povrchy. Proto bylo nutné provést základní simulaci k zjištění těchto povrchových teplot. Pro tyto údaje bylo nutné nastavit základní parametry místnosti, jako tepelné zisky od lidí, vybavení, provoz učebny, její vytápění atd. Do simulace byl zahrnut také časový režim provozu učebny.

Jelikož není modelově vytvořena kompletní budova, je nutno zabránit styku interiérových konstrukcí s vnějším prostředím. Toho bylo dosaženo vložením adiabatických bloků v přímém kontaktu s interiérovými stěnami.

Provedená roční simulace stanovila nejvyšší a nejnižší povrchové teploty místnosti pro 9.1. a 17.5. Letní prázdninové měsíce nejsou do simulace zahrnuty, během nich neuvažujeme provoz budovy. Hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce. Je třeba podotknout, že případné menší odchylky v nastavení, které nemusí být zahrnuty, nejsou pro výsledky analýzy příliš důležité.

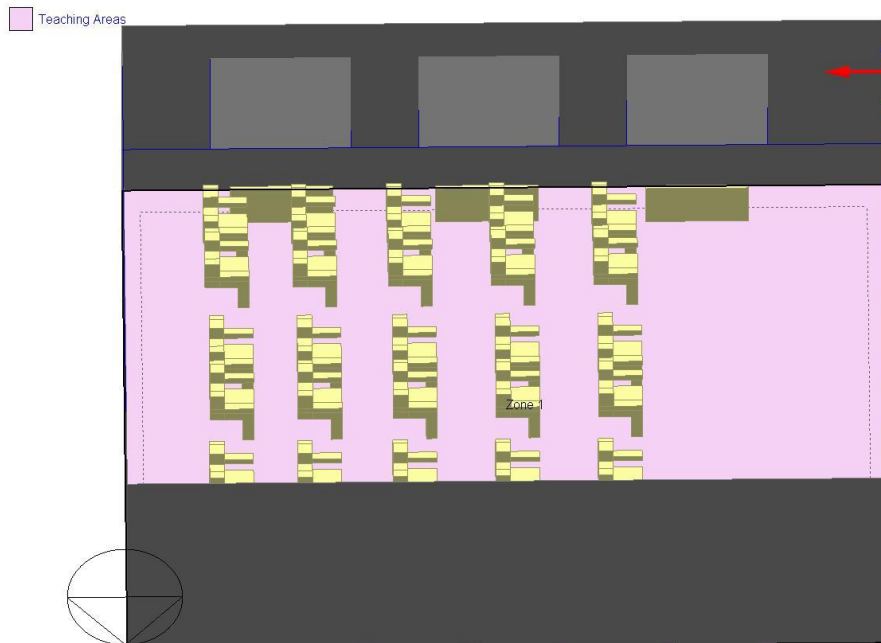
Vstupní parametry CFD

| | Datum | Vnější zed' [°C] | Vnitřní stěny [°C] | Strop [°C] | Podlaha [°C] | Okno [°C] | Teplota proudu [°C] |
|------|-------|------------------|--------------------|------------|--------------|-----------|---------------------|
| zima | 9.1. | 13,6 | 15,96 | 15,91 | 15,66 | 10 | 22 |
| léto | 17.5. | 26,05 | 26,01 | 26,09 | 26,13 | 27 | 25 |

Tabulka 6 – Vstupní parametry CFD

Pro CFD analýzu byly tyto hodnoty povrchových teplot přiřazeny k jednotlivým povrchům. Teplota povrchu oken nemohla být spočítána, proto byla zvolena dle tabulky. V

místnosti je počítáno se stávajícími litinovými radiátory o teplotě 65°C v zimě a 25°C v létě a také 30 sedících studentů s tepelným výkonem 50 W/osobu.



Obrázek 7 – Model učebny

B.1.2.2.4 Analýza výsledků

Pro základní stanovení celkového prostředí je v analýze počítáno s celkovou výměnou vzduchu podle produkce CO₂ a to 25 m³/h na 1 žáka, celkově tedy 750 m³/h. Teplota přiváděného vzduchu v zimě je 22 °C, v létě 25 °C.

B.1.2.2.4.1 Textilní rukávy

Ústřová rychlost textilního rukávu je výrobcem stanovena na 0,15 m/s pro izotermní proudění při přetlaku 100 Pa. Rukáv je konkrétně navržen jako rovnoměrně mikroperforovaná vyústka s otvory o průměru 0,2 mm v rozteči 4x2 mm (viz. přílohy). Délka vyústky je 3 m a průměr 250 mm. Model vyústky byl kvůli omezeným možnostem softwaru zjednodušen do podoby hranolu s rovnoměrně rozmístěnými 240 otvory. Modelově je rozptyl proudu vzduchu z jednotlivých otvorů stanoven na 45° do obou směrů. Na opačné straně místnosti je vytvořen odtah za pomoci tří nastavitelných mřížek, které odebírají veškerý přiváděný vzduch (jinak by DesignBuilder nebyl schopný počítat CFD).

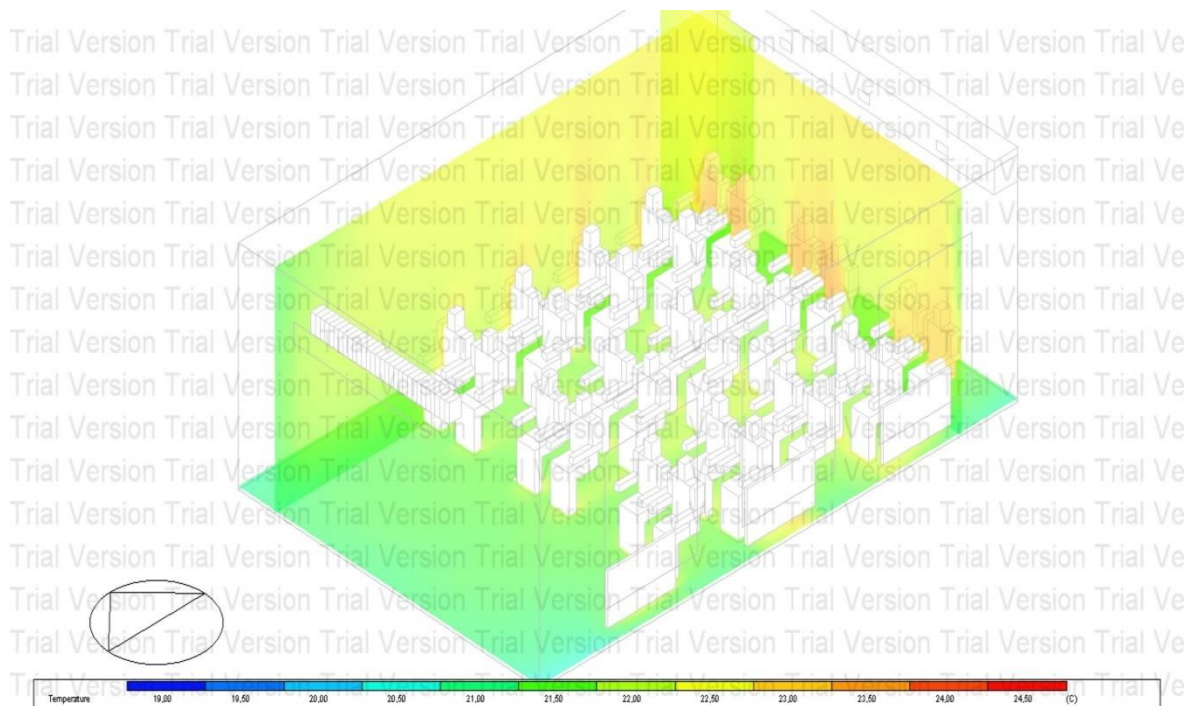
Zima:

Textilní rukáv má nastavenou celkově nejnižší ústřovou rychlost proudění, nedochází tak k žádným výrazným změnám teplotního pole v celé místnosti. To nejvíce ovlivňují stávající desková otopná tělesa, která mají také vliv na rychlosti proudění vzduchu. Teplotní pole v oblasti hlav vykazuje rovnoměrné hodnoty v rozmezí 22-23°C. V oblasti nohou, v oblasti lavic a studentů převažují teploty kolem 22°C. Nejmenší teploty u podlahy nad

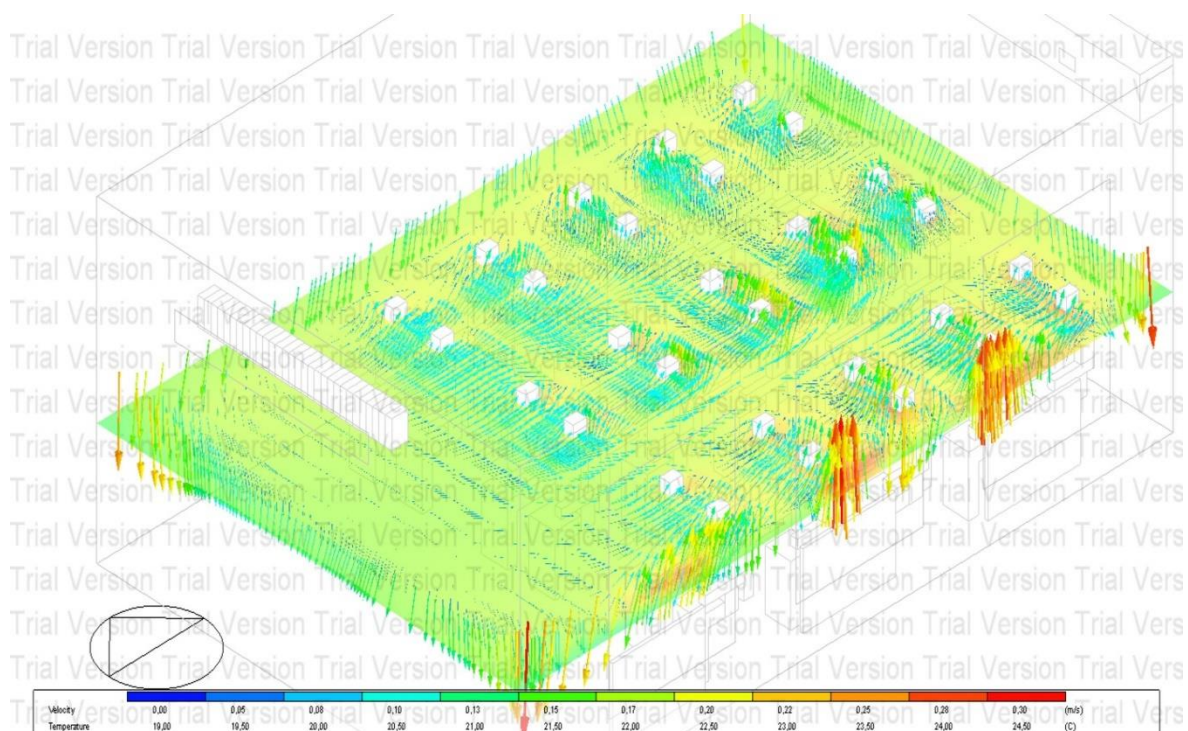
21°C lze zaznamenat přímo pod textilní vyústí, stále je však splněno rozmezí optimálních teplot pro učebnu. Rozdíly teplot do dvou stupňů jsou v pořádku. Co se týče proudění vzduchu kolem hlavy, objevují se v celé této rovině rychlosti v rozmezí 0,10 – 0,15 m/s, což značí ideální zimní podmínky rychlosti proudění. Lokálně dochází k nárůstu rychlosti proudění na 0,20 m/s, to ale nepovažuji za výrazný problém.



Obrázek 8 - Textilní rukáv - zima - oblast nohou - teplotní pole



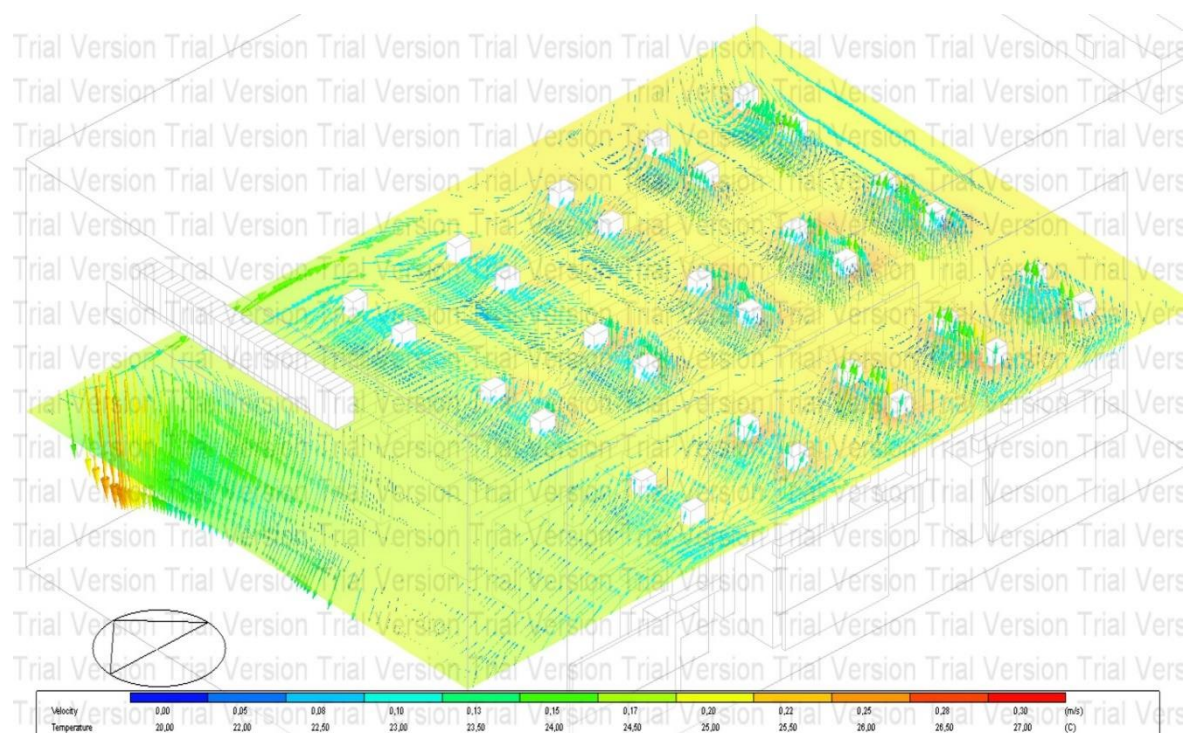
Obrázek 9 - Textilní rukáv - zima - celkový pohled - teplotní pole



Obrázek 10 - Textilní rukáv - zima - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění

Léto:

V létě nastává v rovnoměrnosti rozložení teplot po celé učebně v podstatě stejný jev jako v zimě, teploty v oblasti hlav posluchačů se pohybují okolo 25°C, v rovině nohou

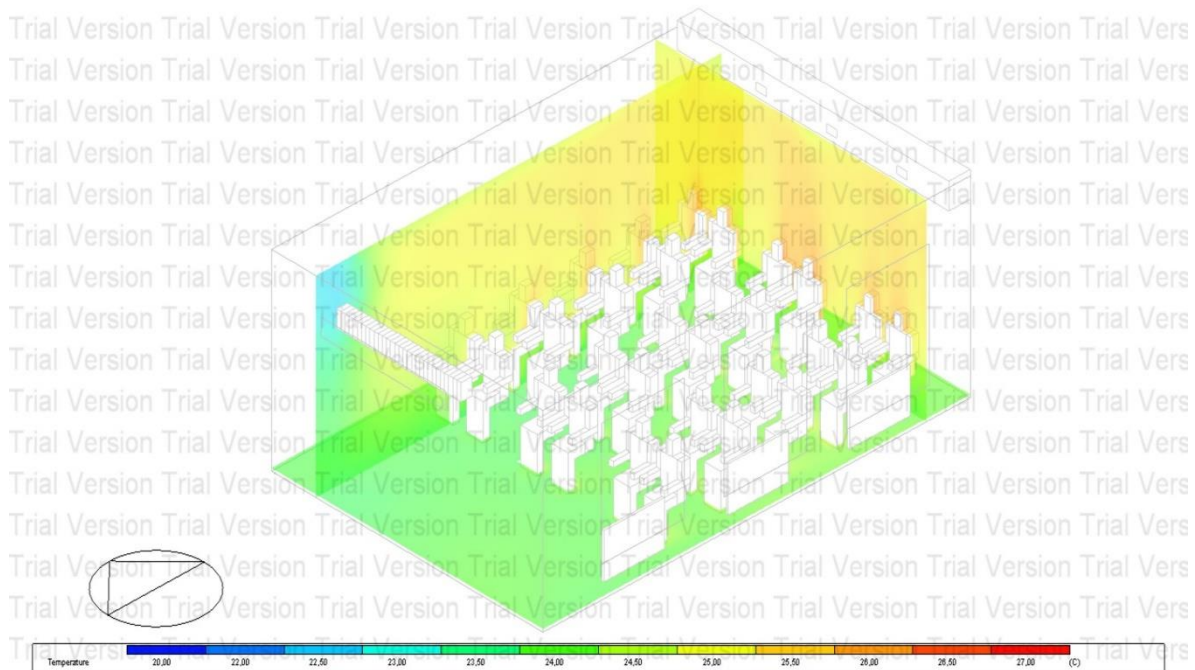


Obrázek 11 - Textilní rukáv - léto - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění

kolem 24°C, což poukazuje na dostatečnou a stejnoměrnou distribuci vzduchu i do této oblasti a komfortní rozdíl teplot. Maximální rychlosti proudění v pobytové zóně učebny lze zaznamenat pod výústkou, avšak nedosahují větší rychlostí než cca 0,15 m/s, stejně tak u hlav studentů, kde k navýšení rychlosti proudění dochází přirozeným ohříváním vzduchu samotnými uživateli.



Obrázek 12 - Textilní rukáv - léto - oblast nohou - teplotní pole



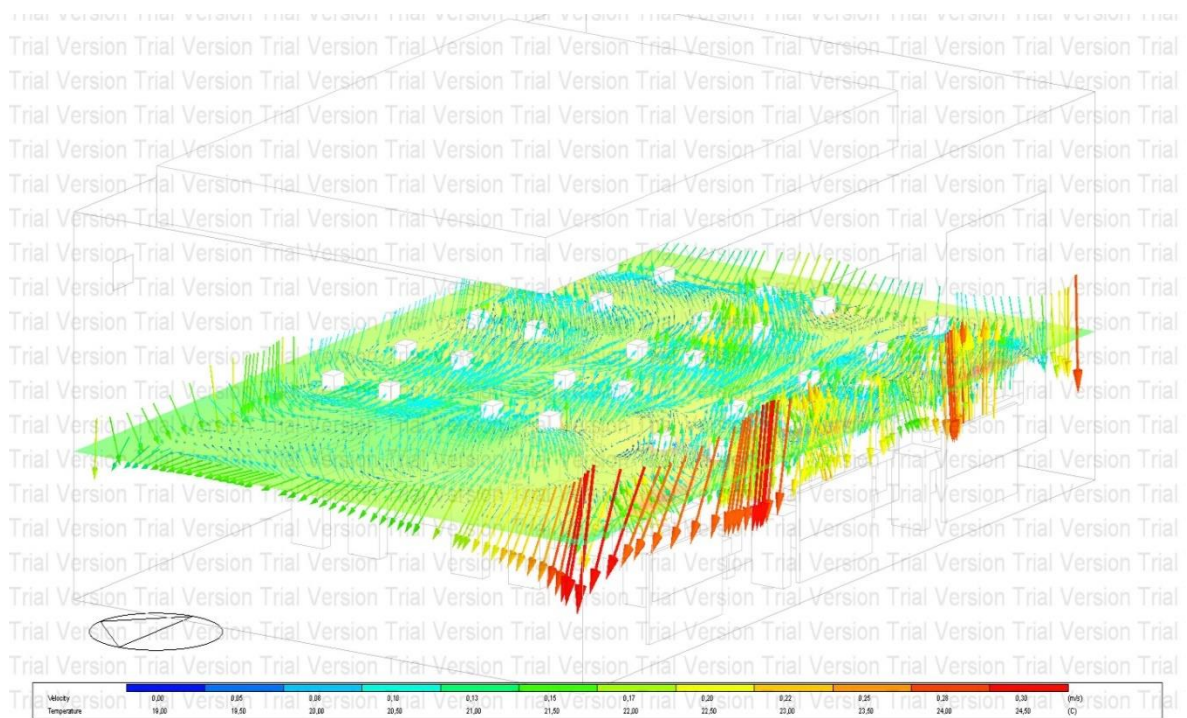
Obrázek 13 - Textilní rukáv - léto - celkový pohled - teplotní pole

B.1.2.2.4.2 Anemostaty

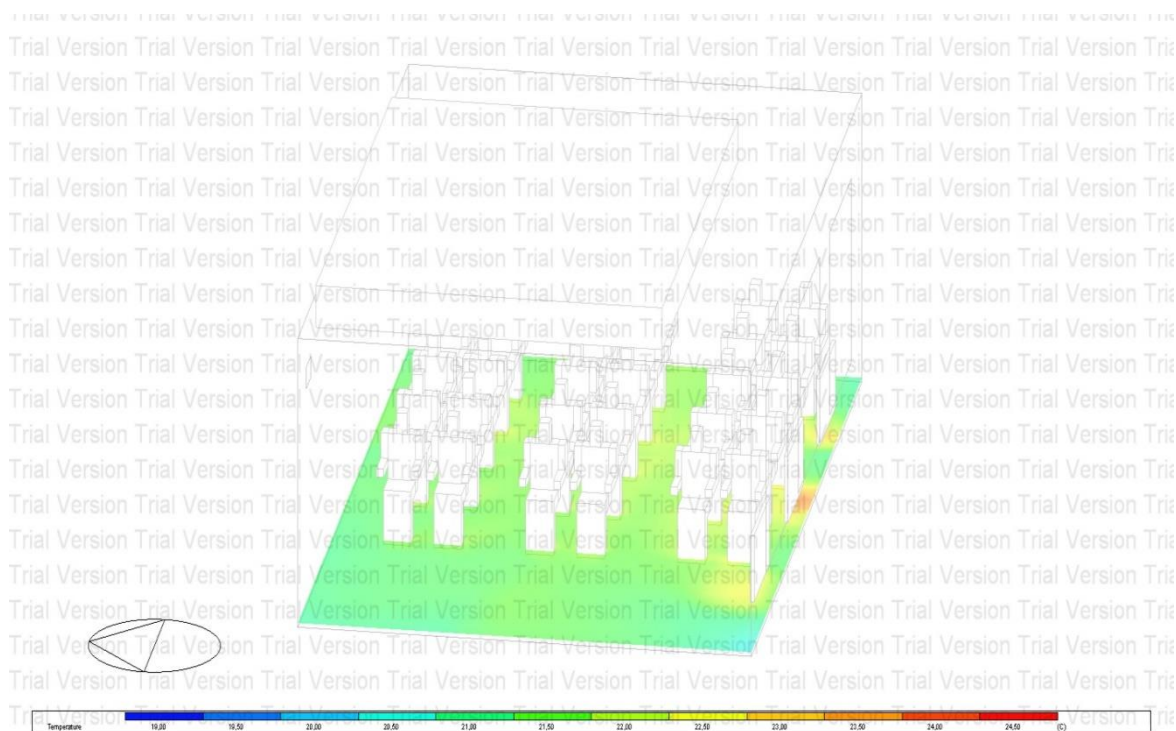
Ve stropním pohledu byly vytvořeny čtyři anemostaty s průtokem 208 l/s, stejný průtok má i odvodní mřížka umístěná nad dveřmi učebny. Ústřední rychlost byla podle podkladů výrobce nastavena na 1,7 m/s.

Zima:

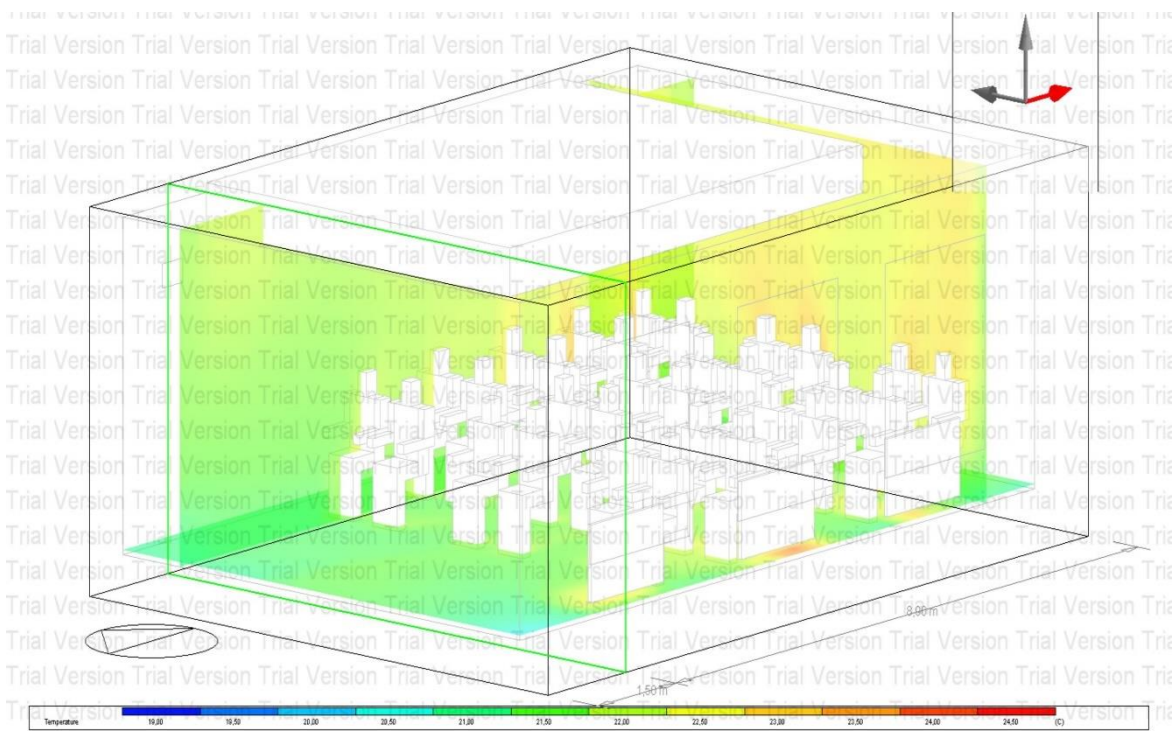
Anemostaty v zimě zásobují místnost vzduchem shora směrem do stran, což se nejvíce projevuje u stěn, kde vznikají vyšší rychlosti proudění kolem 0,3 m/s. U oken dochází zde ke srážkám s proudem vzduchu od radiátorů, což má největší negativní vliv na osoby, které zde sedí. V oblasti hlav posluchačů jsou pozorovatelné hodnoty od 0,1 – 0,15 m/s, místy až 0,2 m/s. Hodnoty teplot se v teplotním poli pohybují od 22°C výše, žáci zejména v předních řadách se mohou potýkat s horším tepelným komfortem jak v oblasti hlavy, tak nohou, kam proudí chladnější vzduch z volného prostoru u tabule. Teploty u nohou na většině míst však dosahují 22°C a více, což indikuje minimální výkyv od teplot u hlav. V některých místech učebny se ale můžeme setkat s nekomfortními hodnotami kolem 20°C.



Obrázek 14 - Anemostaty - zima - oblast hlavy - teplotní pole, rychlosti proudění



Obrázek 15 - Anemostaty - zima - oblast nohou - teplotní pole

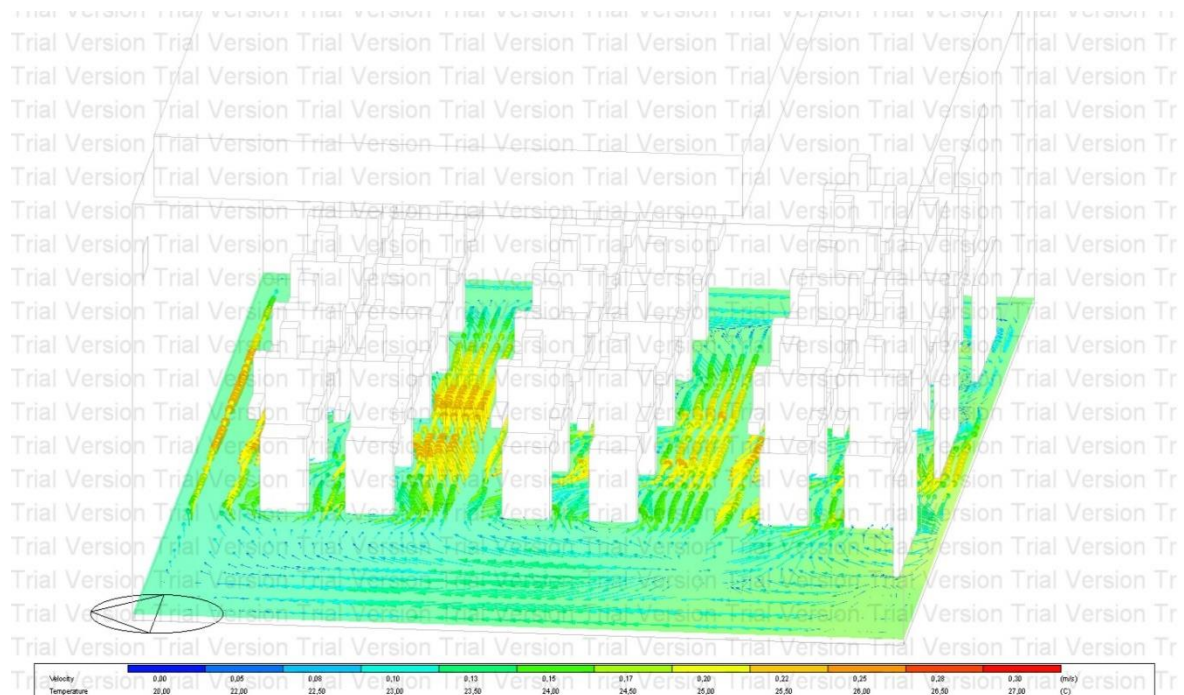


Obrázek 16 - Anemostaty - zima - celkový pohled - teplotní pole

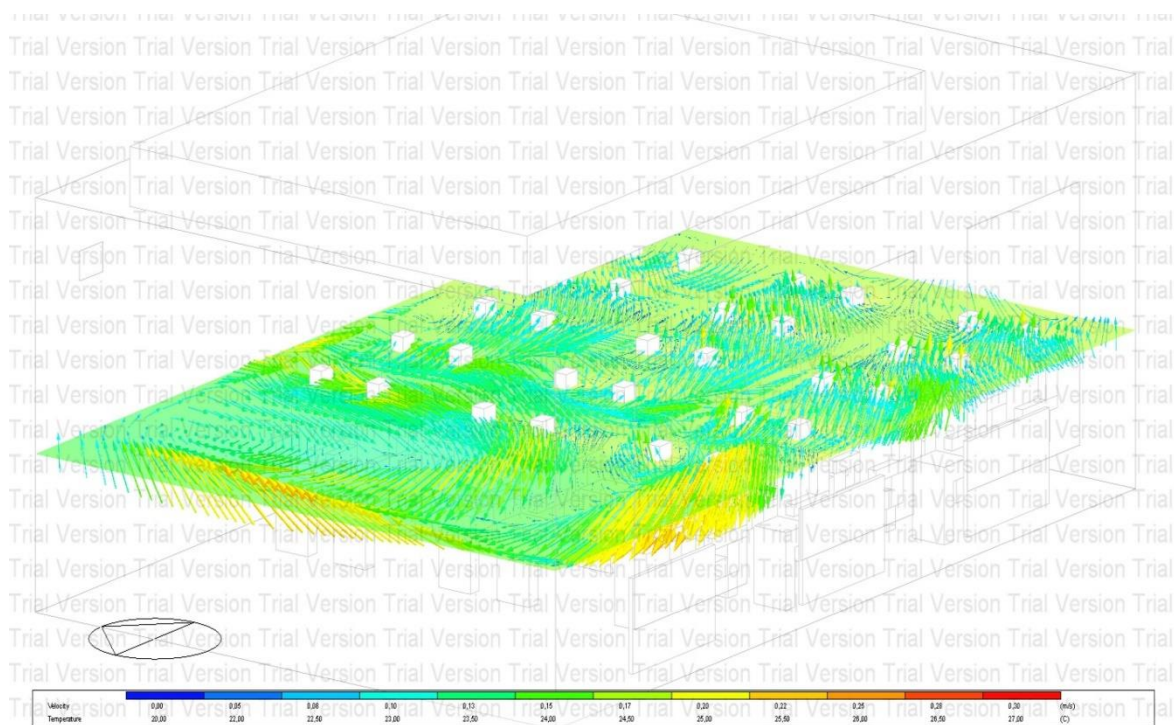
Léto:

Letní situace v rovině hlav studentů vypovídá o velkém množství míchajících se proudů, rychlosti proudění u zdi se oproti zimě snížily na maximální hodnoty 0,25 m/s.

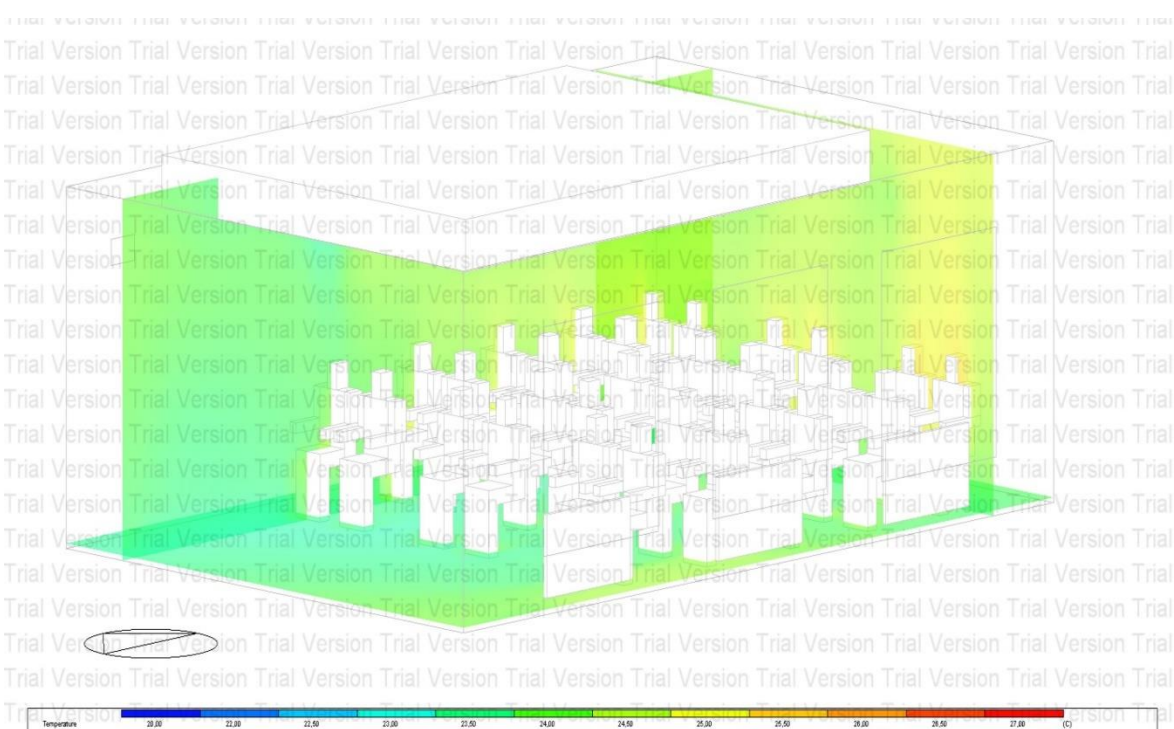
Vysoká nerovnoměrnost vzdušných proudů a jejich míchání mají za následek větší nestejnou teplotní pole s hodnotami od 23 do 24,5 °C, což lze ale při extrémních letních teplotách považovat za příliš chladné a nekomfortní teploty, ačkoliv v měsících jako květen a červen není rozdíl od venkovní teploty tak markantní. V oblasti nohou se teploty pohybují okolo 23°C, dochází zde ale také k vyšším rychlostem proudění, komfortní pocit při pobytu je tedy otázkou.



Obrázek 17 - Anemostaty - léto - oblast nohou - teplotní pole, rychlost proudění



Obrázek 18 - Anemostaty - léto – oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění



Obrázek 19 - Anemostaty - léto - celkový pohled - teplotní pole

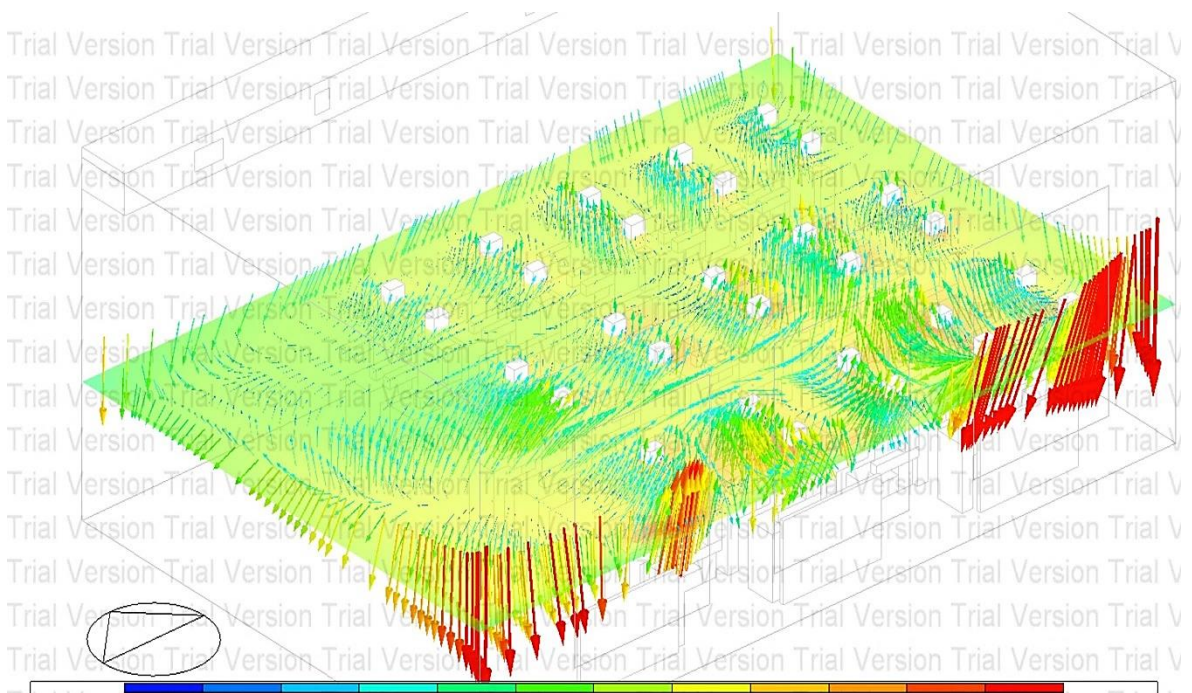
B.1.2.2.4.3 Dýzy

Na stěnu naproti oknům je navržena trojice dýz s 0° rozptylem kvůli kompaktnosti proudu. Součet průtoků je stejný jako u předchozí varianty, rychlost proudu 2,5 m/s.

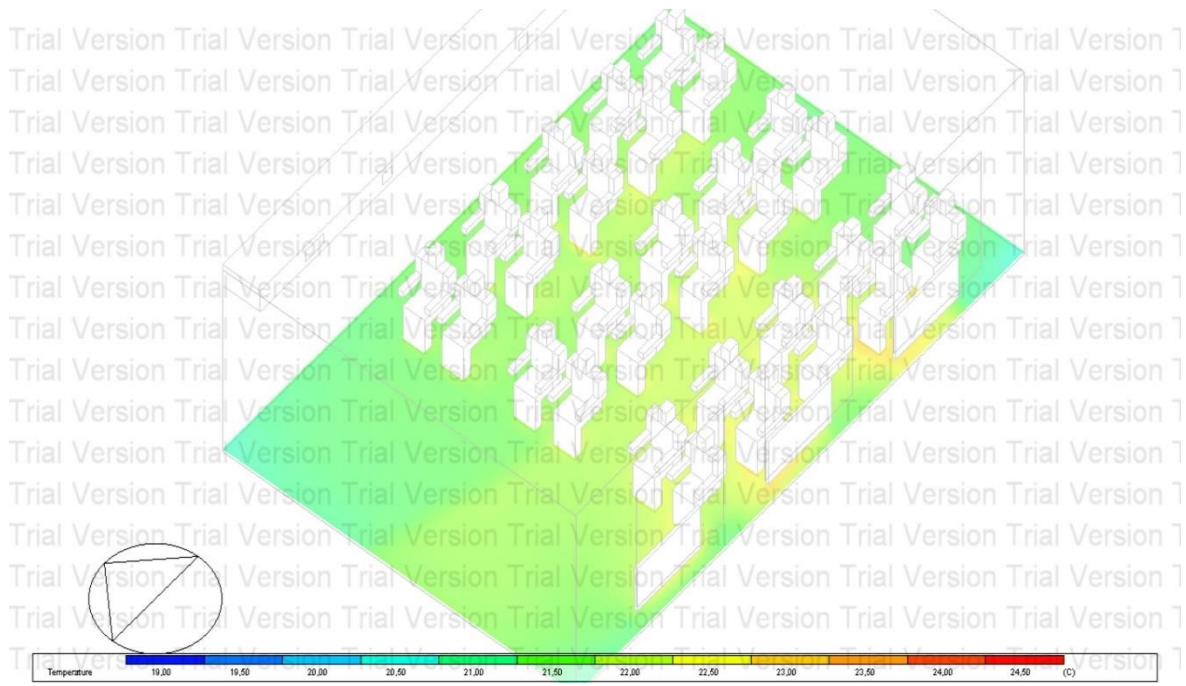
Zima:

Dýzy mají velmi dobrou schopnost distribuovat vzduch do větších vzdáleností. Velká rychlost pod stropem není překážkou, vzduch zde proudí směrem přímo k oknu, kde se střetává s proudem ohřátého vzduchu od radiátorů. Vzduch se dále stáčí u stěn směrem dolů a od podlahy stoupá směrem vzhůru ke stropu rychlostmi do 0,15 m/s, což se jeví jako ideální hodnota. Vysoké rychlosti nad 0,3 m/s v rozích místnosti nemají žádný negativní dopad na místnost jako celek, lokálně vytvářejí vyšší rychlosti proudění v řadě u okna, kde se student může potýkat s hodnotami do 0,2 m/s. Ve zbytku místnosti lze pozorovat u studentů stejné nebo podobné podmínky rychlostního proudění.

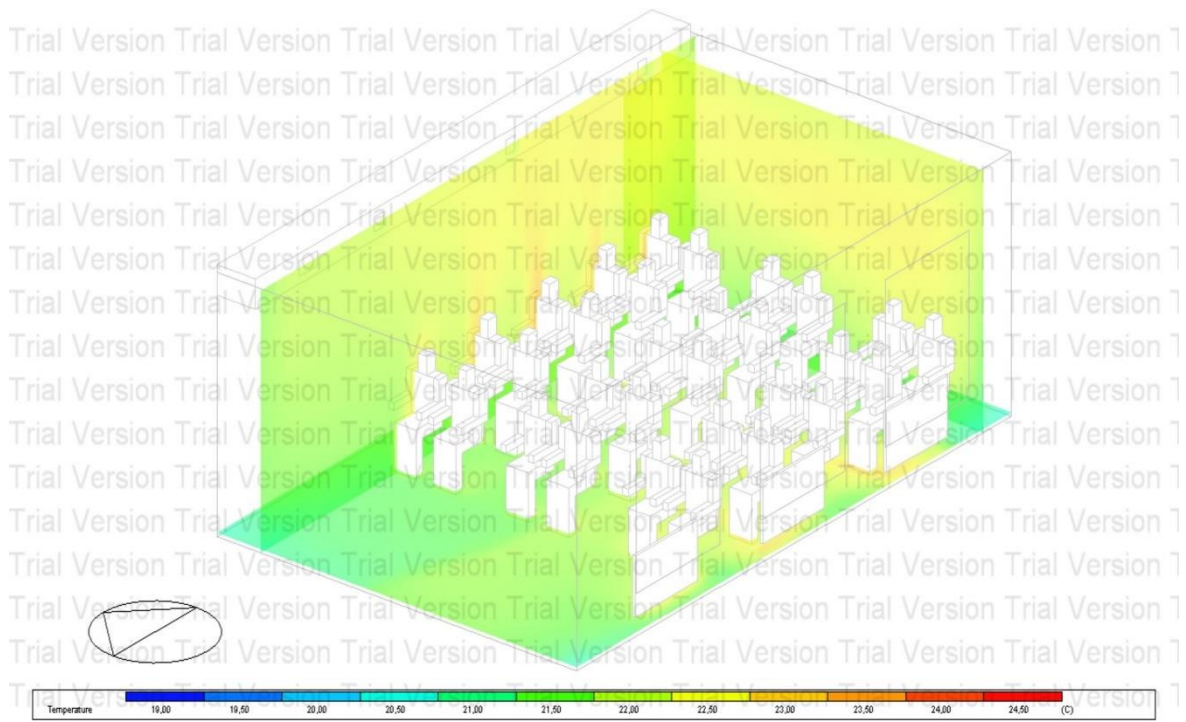
Teploty v oblasti hlav jsou nad 22°C a jejich rozložení je rovnoměrné. V úrovni nohou se hodnoty pohybují od 21,5°C výše a jejich rozložení je taktéž rovnoměrné po celé ploše učebny. Rozdíl teplot kolem do 1°C a jejich stálost po pobytové zóně místnosti poukazují na velmi vysokou efektivitu varianty v distribuci vzduchu. Oproti ostatním systémům lze vyzorovat také komfortnější teplotní podmínky v oblasti určené pro učitele.



Obrázek 20 - Dýzy - zima - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění



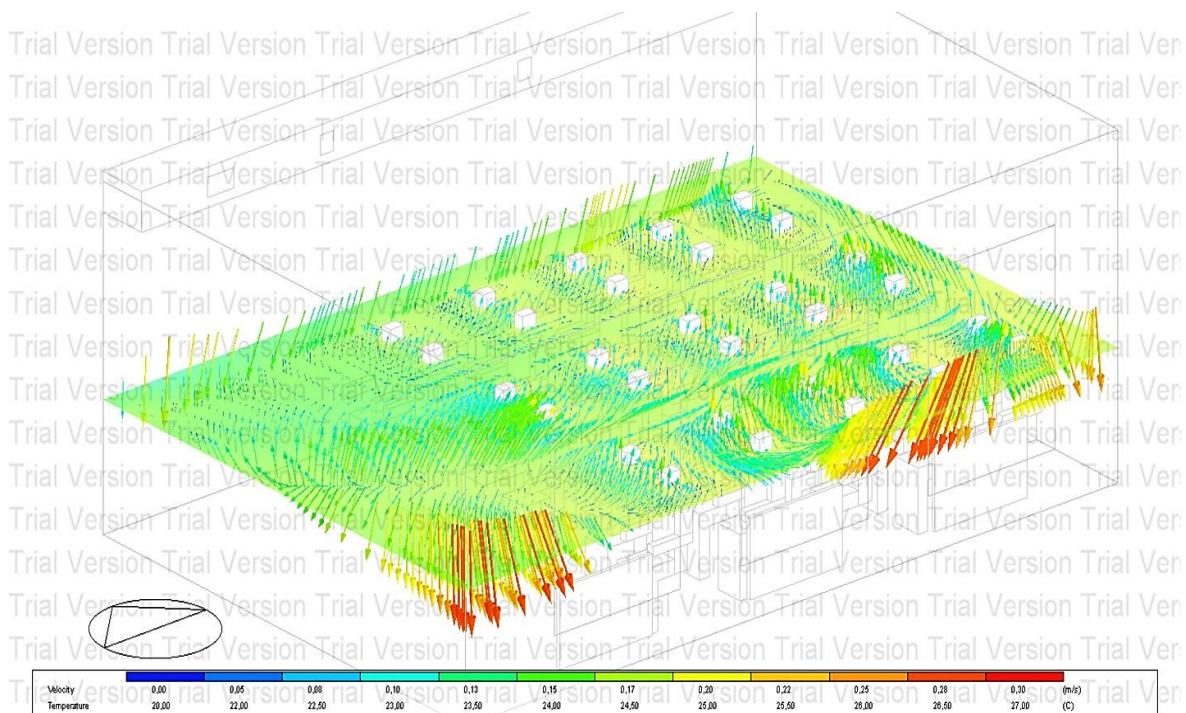
Obrázek 21 - Dýzy - zima - oblast nohou - teplotní pole



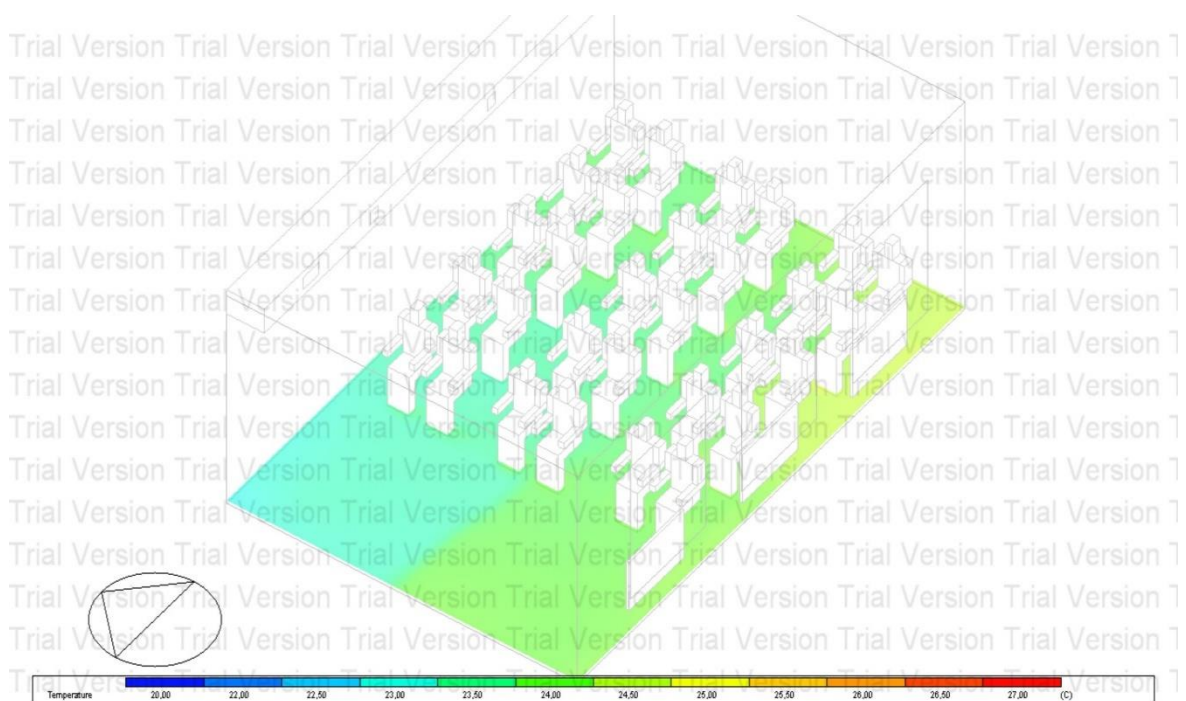
Obrázek 22 - Dýzy - zima - celkový pohled - teplotní pole

Léto:

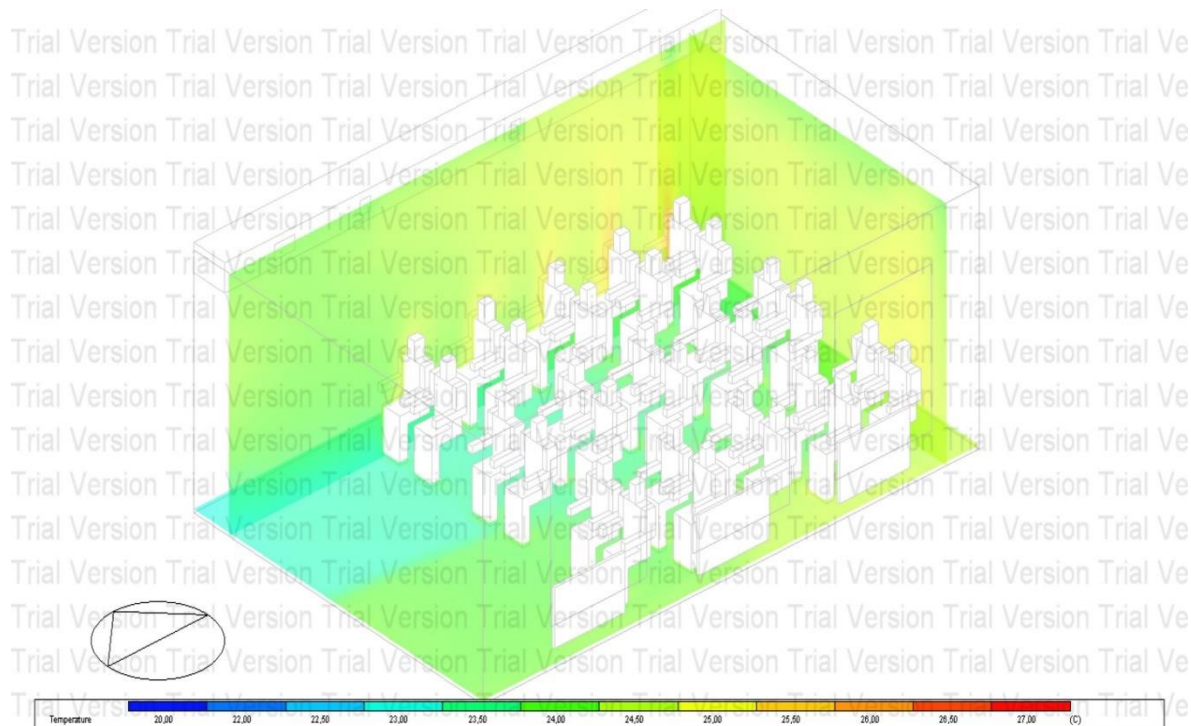
Obraz rychlosti proudění vypadá v létě podobně jako v zimě. Vzduch se zde ale neohřívá průchodem kolem radiátorů, což má za následek nižší teploty než ve zbytku třídy v oblasti odtahu a v řadě u dveří. V téměř celé oblasti hlav jsou teploty cca 24°, u nohou se projevuje právě horší doprava přívodního vzduchu v řadě u dveří, kde jsou pozorovatelné hodnoty k 23°C, zbytek třídy vykazuje 24°C.



Obrázek 23 - Dýzy - léto - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění



Obrázek 24 - Dýzy - léto - oblast nohou - teplotní pole



Obrázek 25 - Dýzy - léto - celkový pohled - teplotní pole

B.1.2.3 Vyhodnocení variant

Bylo zjištěno, že nejlepší rovnoměrnost rozložení teplot v místnosti jak v létě, tak v zimě vykazuje varianta s textilními rukávy. Důvodem je pravděpodobně zachování stávajícího přirozeného proudění vzduchu za pomoci radiátorů.

V zimě je spolu se stálými teplotami nad 22 °C tento systém nejkomfortnější. V letních měsících však může docházet k nízkému odnímání tepla samotným posluchačům proudící okolním vzduchem – celkově jsou v létě lepší vyšší rychlosti proudění než v zimě, což může mít za následek postupné přehřívání studentů. Proto se v tomto případě nejlépe jeví varianty 2 a 3. Tyto varianty vykazují i v zimě relativně vysokou rovnoměrnost zásobení vzduchem, v létě lze u anemostatů vyzorovat vyšší proudění v oblasti nohou, které může spolu s nižší teplotou rozmístěnou po celé ploše místnosti působit nepříjemně. Dýzy v létě vykazují nižší teplotu u nohou jen na části plochy.

Celkově lze tedy říci, že textilní rukáv je nejlepším řešením v zimních měsících z důvodu rovnoměrnosti rozložení teplot a v proudění. V létě však může být rukáv méně vyhovující.

Jako nejvyváženější můžeme označit variantu s dýzami, a to pro zimní i letní provoz. Systém s anemostaty vytváří rychlejší proudy vzduchu a jejich křížením také vysokou nehomogenitu podmínek pro studenty. Lze jej ale úspěšně použít v létě i v zimě.

B.1.2.4 Rozpočet variant

K porovnání jednotlivých řešení byl sestaven položkový rozpočet pro každou z variant jako jedno z určujících kritérií. Každá tabulka obsahuje výpis navrhovaných prvků jednotlivých variant. Řešena je vždy charakteristická oblast návrhu, tzn. od regulačních prvků před každou učebnou ke koncovým prvkům včetně. Jednotlivé ceny jsou určeny dle ceníků výrobců. Pro porovnatelnost variant jsou navrženy prvky (pokud možno) od stejného výrobce.

ROZPOČET - VARIANTA 1

| Popis prací a dodávek | Měr. | Počet | Jednotková cena (vč. DPH) | Cena Kč celkem (vč. DPH) |
|---|------|-------|---------------------------------|-----------------------------|
| | jed. | | | |
| VZDUCHOTECHNIKA | | | | |
| Ohebná VZT hadice SONOFLEX d250 | bm | 2,7 | 200,00 | 540,00 |
| Kruhové potrubí SPIRO d250, vč. 30% tvarovek | bm | 5,1 | 320,00 | 1632,00 |
| Kruhové potrubí SPIRO d315, vč. 30% tvarovek | bm | 1,1 | 370,00 | 407,00 |
| Čtyřhranné ocel. potrubí sk.1 z pozink plechu se stranou do 1000mm, vč. 30% tvarovek, třída těsnosti potrubí C dle ČSN EN 1507 | m2 | 3,4 | 320,00 | 1094,40 |
| Textilní rukáv PŘÍHODA C250/3000 FB/PMS-5AL/LGO + TY/IN/AL s hliníkovými závěsnými lištami, včetně lankových závěsů a podpůrných obručí | ks | 1 | 2920,00 | 2920,00 |
| Nastavitelná mřížka MANDÍK VNM 200x140 mm | ks | 3 | 470,00 | 1410,00 |
| Regulátor variabilního průtoku MANDÍK RPM-V d250 | ks | 1 | 6400,00 | 6400,00 |
| Regulátor variabilního průtoku MANDÍK RPMC-V 300x200 mm | ks | 1 | 6670,00 | 6670,00 |
| Tlumič do kruhového potrubí MANDÍK SMR d250 600 mm | ks | 1 | 1820,00 | 1820,00 |
| Celkem | | | | 22893,40 |
| OSTATNÍ PRÁCE | | | | |
| Bourací práce - stěna zdivo | m3 | 0,1 | 850,00 | 85,00 |
| SDK podhledy 12,5 mm bez izolace včetně Al profilů a závěsů spolu s prací | m2 | 6,2 | 450,00 | 2790,00 |
| Celkem | | | | 2875,00 |

VARIANTA 1 CELKEM 25768,40

Tabulka 7 - Rozpočet - Varianta 1

ROZPOČET - VARIANTA 2

| Popis prací a dodávek | Měr. | | Jednotková | Cena Kč |
|--|------|-------|----------------|------------------|
| | jed. | Počet | cena (vč. DPH) | celkem (vč. DPH) |
| VZDUCHOTECHNIKA | | | | |
| Ohebná VZT hadice SONOFLEX d200 | bm | 2,8 | 160,00 | 448,00 |
| Kruhové potrubí SPIRO d250, vč. 30% tvarovek | bm | 3 | 320,00 | 960,00 |
| Kruhové potrubí SPIRO d315, vč. 30% tvarovek | bm | 5,7 | 370,00 | 2109,00 |
| Čtyřhranné ocel. potrubí sk.1 z pozink plechu se stranou do 1000mm, vč. 30% tvarovek, třída těsnosti potrubí C dle ČSN EN 1507 | m2 | 2,9 | 320,00 | 921,60 |
| Anemostat přívodní lamelový MANDÍK ALCM čtvercový 300 mm, včetně připojovací skříně s horizontálním napojením d200 v. 300 mm | ks | 4 | 960,00 | 3840,00 |
| Nastavitelná odvodní mřížka MANDÍK VNM 400x250 mm | ks | 1 | 810,00 | 810,00 |
| Regulátor variabilního průtoku MANDÍK RPM-V d315 | ks | 1 | 6610,00 | 6610,00 |
| Regulátor variabilního průtoku MANDÍK RPMC-V 300x200 mm | ks | 1 | 6670,00 | 6670,00 |
| Tlumič do kruhového potrubí MANDÍK SMR d315 600 mm | ks | 1 | 1990,00 | 1990,00 |
| Celkem | | | | 24358,60 |
| OSTATNÍ PRÁCE | | | | |
| Bourací práce - stěna zdivo | m3 | 0,11 | 850,00 | 93,50 |
| SDK podhledy 12,5 mm bez izolace včetně Al profilů a závěsů spolu s prací | m2 | 33,2 | 450,00 | 14940,00 |
| Celkem | | | | 15033,50 |

VARIANTA 2 CELKEM 39392,10

Tabulka 8 - Rozpočet - Varianta 2

ROZPOČET - VARIANTA 3

| Popis prací a dodávek | Měr. | | Jednotková | Cena Kč |
|--|------|-------|----------------|------------------|
| | jed. | Počet | cena (vč. DPH) | celkem (vč. DPH) |
| VZDUCHOTECHNIKA | | | | |
| Ohebná VZT hadice SONOFLEX d200 | bm | 2,9 | 160,00 | 464,00 |
| Kruhové potrubí SPIRO d250, vč. 30% tvarovek | bm | 2,8 | 320,00 | 896,00 |
| Kruhové potrubí SPIRO d315, vč. 30% tvarovek | bm | 2,2 | 370,00 | 814,00 |
| Čtyřhranné ocel. potrubí sk.1 z pozink plechu se stranou do 1000mm, vč. 30% tvarovek, třída těsnosti potrubí C dle ČSN EN 1507 | m2 | 3,6 | 320,00 | 1152,00 |
| Dýza s dalekým dosahem MANDÍK DDM II s ručním nastavením d200 | ks | 3 | 2060,00 | 6180,00 |

| | | | | |
|---|----|------|---------|----------|
| Nastavitelná odvodní mřížka MANDÍK VNM 400x250 mm | ks | 1 | 810,00 | 810,00 |
| Regulátor variabilního průtoku MANDÍK RPM-V d315 | ks | 1 | 6610,00 | 6610,00 |
| Regulátor variabilního průtoku MANDÍK RPMC-V 300x200 mm | ks | 1 | 6670,00 | 6670,00 |
| Tlumič do kruhového potrubí MANDÍK SMR d315 | ks | 1 | 1990,00 | 1990,00 |
| Celkem | | | | 25586,00 |
| OSTATNÍ PRÁCE | | | | |
| Bourací práce - stěna zdivo | m3 | 0,11 | 850,00 | 93,50 |
| SDK podhledy 12,5 mm bez izolace včetně Al profilů a závěsů spolu s prací | m2 | 9,2 | 450,00 | 4140,00 |
| Celkem | | | | 4233,50 |

VARIANTA 3 CELKEM 29819,50

Tabulka 9 - Rozpočet - Varianta 3

Z tabulek vyplývá, že nejlevnějším řešením v typicky navrženém provedení je varianta 1 s textilním rukávem, dále varianta 3 a nejdražší je varianta 2. Nejvyšší vliv na celkovou cenu mají především distribuční prvky – jejich cena a počet, ale také potrubí. Jeho délka může zvýšit například i cenu první varianty při atypickém řešení v některých učebnách. Markantní vliv na celkovou cenu mají také sádkartonářské práce, u anemostatů tvoří necelou polovinu celkové sumy. Zde by ale bylo potřeba započítat také přeřešení systému osvětlení.

B.1.3 Multikriteriální analýza

K celkovému zhodnocení nejlepší varianty byla především kvůli většímu množství hodnocených kritérií použita metoda multikriteriální analýzy. „Multikriteriální analýza se zabývá hodnocením možných alternativ podle několika kritérií, přičemž alternativa hodnocená podle jednoho kritéria zpravidla nebývá nejlépe hodnocená podle kritéria jiného.“⁵ Při rozhodování se mohou střetnout jak kritéria kvantitativní (číselná), tak kritéria kvalitativní, ve kterých se běžně zavádí stupnice hodnocení spolu se směrem lepšího hodnocení. Daným kritériím se poté přidělují váhy dle jejich významu pro danou problematiku.⁶

Analýza bude provedena pomocí dvou metod – metody pořadí a bodovací metody. V metodě pořadí znamená nižší hodnota lepší hodnocení, nejlepší varianta bude mít nejnižší hodnotu váženého pořadí. U bodovací metody se zadávají hodnoty 1-10, kdy je 10

⁵<http://elektro.tzb-info.cz/intelligentni-budovy/7651-vyuziti-multikriterialni-analyzy-mca-pro-hodnoceni-intelligentnich-elektroinstalaci>

⁶ <http://spravnym.smerem.cz/Tema/Multikriteri%C3%A1ln%C3%AD%20anal%C3%BDza>

nejvyšší možná hodnota pro ohodnocení kritéria. Varianta s nejvyšší hodnotou váženého pořadí je tou nejvýhodnější.

Shrnutí hodnocení variant dle kritérií

| | Estetika | Zásah do stavby | CFD | Cena (v tis. Kč) |
|----|-------------|-----------------|-------------|------------------|
| V1 | slabý | slabší | velmi dobrý | 25,7 |
| V2 | chvalitebný | slabý | vyhovující | 39,3 |
| V3 | vyšší | vysoký | chvalitebný | 29,8 |

Tabulka 10 - Shrnutí hodnocení variant dle kritérií

pozn. Slovní hodnocení nemá slovní vazbu na hodnocené kritérium

B.1.3.1 Metody pro výpočet multikriteriální analýzy

Metoda pořadí

| | Estetika | Zásah do stavby | CFD | Cena (v tis. Kč) | vážené pořadí |
|------|----------|-----------------|-----|------------------|---------------|
| V1 | 4 | 3 | 2 | 1,5 | 2,05 |
| V2 | 2,5 | 4 | 3,5 | 4 | 3,3 |
| V3 | 1,5 | 1 | 2,5 | 2,5 | 1,85 |
| váhy | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | - |

Tabulka 11 - Hodnocení variant dle kritérií - Metoda pořadí

Metoda bodovací

| | Estetika | Zásah do stavby | CFD | Cena (v tis. Kč) | vážené pořadí |
|------|----------|-----------------|-----|------------------|---------------|
| V1 | 2 | 3 | 8 | 8 | 5,6 |
| V2 | 6 | 1 | 5 | 4 | 3,5 |
| V3 | 8 | 9 | 7 | 6 | 6,5 |
| váhy | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | - |

Tabulka 12 - Hodnocení variant dle kritérií - Metoda bodovací

Z multikriteriální analýzy vyplývá, že nejvýhodnější variantou řešení distribuce do hodnocené budovy jsou dýzy, tedy varianta třetí. Textilní rukávy v hodnocení příliš nezaostávají a mohou být vhodné pro použití v jiných aplikacích. Pokud by byla rozhodujícím kritériem jen cena, je tato varianta velmi vhodná. Na posledním místě jsou anemostaty (varianta 2), které už sami o sobě představují velmi náročný a významný zásah do rekonstrukcí.

B.1.4 Závěr

Dílčím cílem diplomové práce bylo teoretické zpracování metodiky implementace vzduchotechnických zařízení do rekonstrukcí školních objektů a za použití výpočtového modelu a dalších metod analýzy vybrat nejvhodnější variantu řešení distribuce vzduchu do referenční učebny. Tyto poznatky jsou dále použity v projektu, který je součástí práce.

Bylo zjištěno, že je možné do stávajících školních objektů vytvořit funkční větrací systém, který bude respektovat danou stavbu a zároveň poskytne efektivní způsob vylepšení vnitřního prostředí. Řešení systému u každé konkrétní stavby je však vysoce individuální. Spolu s úpravou tepelně-technických vlastností obálky stavby a dalších systémů lze také dosáhnout významného vylepšení v hospodárnosti budovy.

Jednu z klíčových rolí v možnostech budovy hraje přítomnost prostor pro umístění jednotky(ek) a rozvody potrubí, především stoupacího, přívodních a výfukových otvorů. Geometrie vedení potrubní sítě je čistě individuální, stejně tak jako její ochranné součásti aj. Velmi účinným systémem regulace ve školách je použití regulátorů variabilního průtoku pro každou učebnu s řízením v závislosti na koncentraci CO₂, díky čemuž lze také snížit provozní náklady na větrání.

Na základě výsledků měření a výpočtů mé diplomové práce se anemostaty projeví jako nejméně vhodný systém k použití v daném objektu z důvodu nutnosti zásahu do konstrukce a především díky své ceně. Vhodnější variantou je použití textilních rukávů, které vykazuje nejlepší vlastnosti z hlediska proudění vzduchu, jeho použití však nekoresponduje s řešeným objektem. Představuje ale velmi účinnou alternativu k použití pro jinak specifikované realizace. Nejvhodnějším řešením distribuce vzduchu do učeben pro daný objekt se jeví systém dýz jako velmi jednoduchý a kompaktní, s malým zásahem do rázu budovy, s dobrými vlastnostmi proudění vzduchu v prostoru a také v porovnání s jinými variantami ne příliš vysokou cenou.

Citovaná literatura

1. **HIRŠ, Jiří a GEBAUER, Günter.** *Vzduchotechnika v příkladech.* Brno : CERM, 2006. ISBN 80-7204-486-9.
2. **CHYSKÝ, Jaroslav a HEMZAL, Karel.** *Větrání a klimatizace.* Praha : BOLIT-B press, 1993. Česká matice technická. Technický průvodce. ISBN 80-901574-0-8.
3. **Zikán, Ing. Zdeněk.** Zpětné získávání tepla a větrání objektů. *tzb-info.* [Online] 22. 3 2010. <http://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/6325-zpetne-ziskavani-tepla-a-vetrani-objektu>.
4. **GEBAUER, Günter, RUBINOVÁ, Olga a HORKÁ, Helena.** *Vzduchotechnika.* Brno : ERA, 2005. ISBN 80-7366-027-X.
5. **JINDRÁK, Martin.** *Větrání ve školách - požadavky a realita: Ventilation at schools - requirements and reality.* 2013. ISSN 1213-0907.
6. **Kuzmin, Dmitri.** lecture1.dvi - lecture1.pdf. *Fakultät - Fakultät für Mathematik, TU Dortmund.* [Online] <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>.
7. **LUBINOVÁ, Štěpánka.** *Stínění oken: žaluzie, rolety, markýzy a slunolamy.* Praha : Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4579-4.

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 - Množství přiváděného čerstvého vzduchu v učebnách, tělocvičnách, šatnách a hygienických zařízeních v zařízeních pro výchovu a vzdělávání a provozovnách pro výchovu a vzdělávání..... | 11 |
| Tabulka 2 - Průměrné hodnoty výsledných teplot, rychlostí proudění a relativní vlhkosti vzduchu..... | 11 |
| Tabulka 3 - Klasifikace koncových částí (2)..... | 14 |
| Tabulka 4 - Porovnání čtyřhranného potrubí s kruhovým pro stejný průtok 2600 m ³ /h pro stejný průřez 0,12 m ² . (3)..... | 14 |
| Tabulka 5 - Charakteristika klasifikace filtrů (2)..... | 18 |
| Tabulka 6 - Rozpočet - Varianta 1..... | 48 |
| Tabulka 7 - Rozpočet - Varianta 2..... | 49 |
| Tabulka 8 - Rozpočet - Varianta 3..... | 50 |
| Tabulka 9 - Shrnutí hodnocení variant dle kritérií..... | 51 |
| Tabulka 10 - Hodnocení variant dle kritérií - Metoda pořadí..... | 51 |
| Tabulka 11 - Hodnocení variant dle kritérií - Metoda bodovací..... | 51 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 - Vliv koncentrace CO ₂ ve vnitřním prostředí na chování lidí..... | 22 |
| Obrázek 2 - Půdorysné schéma varianty 1..... | 29 |
| Obrázek 3- Půdorysné schéma varianty 2..... | 30 |
| Obrázek 4 - Půdorysné schéma varianty 3..... | 31 |
| Obrázek 5 - Půdorys typického podlaží..... | 34 |
| Obrázek 6 - Model místnosti..... | 35 |
| Obrázek 7 - Model učebny..... | 36 |
| Obrázek 8 - Textilní rukáv - zima - oblast nohou - teplotní pole..... | 37 |
| Obrázek 9 - Textilní rukáv - zima - celkový pohled - teplotní pole..... | 37 |
| Obrázek 10 - Textilní rukáv - zima - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění..... | 38 |
| Obrázek 11 - Textilní rukáv - léto - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění..... | 38 |
| Obrázek 12 - Textilní rukáv - léto - oblast nohou - teplotní pole..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 13 - Textilní rukáv - léto - celkový pohled - teplotní pole | 39 |
| Obrázek 14 - Anemostaty - zima - oblast hlavy - teplotní pole, rychlosti proudění | 40 |
| Obrázek 15 - Anemostaty - zima - oblast nohou - teplotní pole | 41 |
| Obrázek 16 - Anemostaty - zima - celkový pohled - teplotní pole | 41 |
| Obrázek 17 - Anemostaty - léto - oblast nohou - teplotní pole, rychlost proudění | 42 |
| Obrázek 18 - Anemostaty - léto – oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění | 43 |
| Obrázek 19 - Anemostaty - léto - celkový pohled - teplotní pole | 43 |
| Obrázek 20 - Dýzy - zima - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění..... | 44 |
| Obrázek 21 - Dýzy - zima - oblast nohou - teplotní pole | 45 |
| Obrázek 22 - Dýzy - zima - celkový pohled - teplotní pole | 45 |
| Obrázek 23 - Dýzy - léto - oblast hlavy - teplotní pole, rychlost proudění..... | 46 |
| Obrázek 24 - Dýzy - léto - oblast nohou - teplotní pole | 46 |
| Obrázek 25 - Dýzy - léto - celkový pohled - teplotní pole | 47 |