



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra technických zařízení budov

Kvalita vnitřního ovzduší a tepelná pohoda ve školních budovách

Efektivní metody řízení větrání ve školních učebnách bez vzduchotechniky

Indoor air quality and thermal comfort in school buildings

Effective methods of ventilation control in classrooms without air handling system

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Alžběta Dederová Kohoutková

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Pozemní stavby

Školitel: Prof. Ing. Karel Kabele, CSc.

Praha, 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Alžběta Dederová Kohoutková

Název disertační práce: Kvalita vnitřního ovzduší a tepelná pohoda ve školních budovách, Efektivní metody řízení větrání ve školních učebnách bez vzduchotechniky

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele Prof. Ing. Karla Kabeleho, CSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů: SGS17/013/OHK1/1T/11: Modelování vnitřního prostředí společensky prospěšných budov nízkoenergetického typu pomocí softwaru a NPU I č. LO1605 - Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Fáze udržitelnosti.

V Praze dne 22. 11. 2019

.....
podpis

Poděkování

panu profesoru Karlu Kabelemu CSc. ze srdce děkuji za jeho odborné rady, náměty, připomínky, nasazení, věnovaný čas, lidský přístup a inspiraci ke vzniku této práce a podporu a povzbuzení při hledání zahraniční stáže a během zahraniční stáže.

Dále děkuji za podporu univerzitnímu profesoru Dr. - Ing. Reinholdu Kneerovi, který umožnil zahraniční studijní pobyt týkající se modelování turbulentního proudění a využívání výpočtů CFD pro účely vnitřního prostředí na Institutu přenosu tepla a hmoty v CÁCHách.

Také bych chtěla vyjádřit hlubokou vděčnost panu doktoru Ing. Danielu Adamovskému, Ph. D. za možnost provádět experimentální měření v laboratoři Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT, za možnost používat špičkovou měřicí techniku a za příležitost použít k experimentálnímu měření tepelný model člověka (termálního manikína).

Na závěr bych chtěla poděkovat za podněty týkající se možností měření v laboratoři vnitřního prostředí Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT, a cenné rady k řízení vnitřního prostředí v této laboratoři panu doktoru Ing. Martinu Knymu, Ph. D.

Abstrakt

Hlavním tématem dizertační práce je kvalita vnitřního ovzduší a tepelný komfort ve školách. Práce se zabývá analýzou stávajících problémů větrání ve školních budovách a identifikuje parametry, které ji ovlivňují. Podle současné legislativy sumarizuje požadavky na způsob výpočtu větrání při minimalizaci energetické náročnosti technického systému budov.

Pro vybraný případ přirozeného větrání je vytvořen numerický simulační model turbulentního proudění vzduchu v zařízené učebně obsazené lidmi. Model je ověřen porovnáním s řízeným experimentálním měřením v klimatické komoře skutečné velikosti učebny, ve které je nainstalován tepelný model člověka s ovladatelnými povrchovými teplotami.

Model je využitelný pro simulace přirozeného větrání skutečných učeben, pro stanovení průtoku vzduchu a rozložení teplot. Další možností je výběr optimální polohy umístění čidel pro sledování stavu vnitřního prostředí ve zkoumané místnosti. Při přidání bodového zdroje škodlivin je možno model zároveň použít pro sledování přenosu škodlivin prostorem.

Klíčová slova

kvalita vnitřního ovzduší, větrání školních budov, proudění vzduchu v učebně, simulace turbulence CFD, klimatická komora, měření proudění vzduchu

Abstract

The dissertation thesis is focused on indoor air quality and thermal comfort in school buildings. An analysis of current problems of ventilation in existing school buildings is performed and the relevant factors are identified. Actual legislative requirements on the calculation procedure of ventilation are summarized taking into account minimal energy demand on building services systems.

Numerical simulation model of turbulent airflow in a classroom occupied by people with internal equipment was set up. The model was verified by the results of experimental investigation performed in a climate chamber of relevant parameters with thermal manikin installed.

Airflow simulation in real classrooms can be provided by the model, ventilation rate and corresponding temperature fields can be determined. Another advantage of the model is the choice of optimal location of the IEQ sensors for investigation of IAQ in any room. By addition of the source point of pollutant, the model can be used for tracing of pollutant transport in indoor environment.

Key words

indoor air quality, ventilation of school buildings, airflow in classroom, turbulence simulation in CFD, climate chamber, airflow measurements

Obsah

Obsah	8
1. Úvod - motivace	14
1.1. Kvalita vnitřního ovzduší ve školách (IAQ)	16
1.1.1. Další parametry kvality vnitřního ovzduší (IAQ) - znečištění, škodliviny	17
2. Současný stav problematiky	21
2.1. Tepelný komfort a kvalita vnitřního ovzduší	21
2.2. Systémy větrání, množství větracího vzduchu a koncentrace CO ₂	21
2.2.1. Přijatelná a povolená koncentrace škodliviny CO ₂ v prostoru	23
2.2.2. Stanovení množství větracího vzduchu	24
2.3. Přehled historických principů větrání ve školních budovách	26
2.4. Návrhové podmínky větrání školních budov v současnosti	28
2.5. Systémy větrání ve školách	28
2.5.1. Systémy nuceného větrání	29
2.5.2. Různé koncepty provozu hybridního větrání ve školách	29
2.5.3. Certifikace SB Tool CZ pro školní budovy	31
2.6. Školní budovy a podnebí	31
2.6.1. Větrání školních budov v Estonsku	31
2.6.2. Větrání škol v Nizozemí	32
2.6.3. Větrání budovy školy ve Falkenbergu, Švédsko	34
2.6.4. Větrání budovy střední školy v St. Clément de Rivière, Francie	35
2.6.5. Větrání zvláštní školy v Seville a účinek vnitřního dvoru (patia) na komfort uživatelů ..	36
2.6.6. Větrání základní školy pro letní a zimní podmínky v Empoli, Itálie	36
2.6.7. Větrání posluchárny vysoké školy v Německu	37
2.6.8. Větrání budovy základní školy v Norsku	37
2.6.9. Stav ve Spojených státech amerických (USA)	40
2.7. Přehled současného stavu v ČR	44
2.7.1. Souhrn současných problémů vnitřního prostředí školních budov ve vztahu k použitému systému větrání	44
2.7.2. Příklady škol v ČR	45
2.8. Provozní stavy pro různé typy škol a provozní doporučení pro přednáškové místnosti	47
2.8.1. Provozní stavy školních budov dle jejich typu	47
2.8.2. Provozní doporučení pro přednáškové místnosti	47
2.8.3. Šest hlavních doporučení pro školní budovy v USA	47
2.8.4. Doporučení podle Krajské hygienické stanice v Ostravě	48
2.9. Shrnutí	48
3. Cíle práce	50
4. Metody zpracování	51

5.	Rozbor dílčích úloh	52
5.1.	Teoretické řešení – model posluchárny v softwaru + simulace proudění	52
5.1.1.	Nároky na přívod vzduchu podle produkce škodlivin	53
5.1.2.	Zjednodušení úlohy pro aplikaci pro školní budovy:.....	53
5.2.	Experimentální měření v referenční místnosti (v laboratoři)	53
6.	Identifikace stavu vnitřního prostředí školních budov.....	54
6.1.	Analýza větrání v posluchárně školy (As135) – bez vzduchotechniky.....	54
6.1.1.	Zimní měření v As135.....	54
6.1.2.	Letní měření v As135.....	55
6.1.3.	Závěr dílčí analýzy pro As135	55
6.2.	Analýza a měření v učebně A231 vysoké školy – analýza provětrávání	55
6.2.1.	Dílčí závěr analýzy pro A231	56
6.3.	Identifikace prostředí s VZT v posluchárně C215	56
6.3.1.	Měření vnitřního prostředí posluchárny	56
6.3.2.	Vzduchotechnický systém	56
6.3.3.	Měření po rekonstrukci – stav s VZT (C215).....	58
6.3.4.	Dílčí závěr analýzy pro C215 s vzduchotechnikou.....	59
6.4.	Zjišťování vlivu přirozeného větrání v posluchárně školy (C215) – bez systému vzduchotechniky	60
6.4.1.	Měření vnitřního prostředí v zimě, klimatické podmínky a vyhodnocení	60
6.5.	Diskuze výsledků měření, lokální stav a jeho změny	62
6.5.1.	Problémy s kvalitou vnitřního prostředí a komfortem ve větších místnostech:	63
6.5.2.	Problémy s větráním.....	63
6.5.3.	Problémy s kvalitou výpovědi měření o stavu prostředí v posluchárně	63
7.	Systémové možnosti řešení větrání školních budov (přívod vzduchu) do učeben, které nemají centrální systém větrání (klimatizaci)	65
8.	Matematický model.....	66
8.1.	Proudění	66
8.2.	Metodika	66
8.3.	Výběr modelu turbulence a jeho konkrétní podoba s odůvodněním výběru	68
8.4.	Fáze preprocessorová, popis obsažených prvků, tvorba dat.....	69
8.4.1.	Prvky podstatné pro provoz učeben s přirozeným větráním a odůvodnění výběru:	70
8.4.2.	Náhrada člověka v modelu	70
8.5.	Fáze postprocessorová (vyhodnocení proudění pro třídy bez nuceného větrání).....	72
9.	Experimenty.....	78
9.1.	Uspořádání experimentů (konfigurace)	78
9.1.1.	Použité vybavení	78
9.1.2.	Klimatická komora s řízeným vnitřním prostředím	79
9.1.3.	TMČ – tepelný model člověka	79

9.2.	Metody a postupy	80
9.2.1.	Přípravná fáze	80
9.3.	Experimenty s otevřenými otvory	80
9.3.1.	Experiment A (s vyklopeným oknem).....	81
9.3.2.	Experiment B (s částečně otevřeným oknem 30°)	82
9.3.3.	Experiment C (s otevřeným oknem 90°).....	83
9.3.4.	Experiment D (s otevřenými dveřmi do interiéru (vstupního prostoru - předsíňky) a částečně otevřeným oknem 30° do exteriéru)	84
9.4.	Dokumentace experimentálních měření.....	85
9.5.	Vyhodnocení experimentů	86
9.5.1.	Určení ekvivalentní plochy průřezu	87
9.5.2.	Experiment A – vyklopené okno – učebna mírně větrána za přítomnosti osob	89
9.5.3.	Experiment B – částečně otevřené okno na 30° – učebna středně větrána za přítomnosti osob	90
9.5.4.	Experiment C – okno otevřené na 90° - učebna plně větrána za přítomnosti osob	91
9.5.5.	Experiment D – učebna částečně větrána do exteriéru a do interiéru (chodby)	92
9.5.6.	Díličí závěry experimentů	93
9.6.	Porovnání výsledků experimentu s výsledky simulace	94
9.6.1.	Diskuze výsledků	94
9.6.2.	Diskuze	97
10.	Závěr.....	98
10.1.	Aplikace do praxe	101
10.2.	Další pokračování prací na modelu větrání učebny	101
11.	Seznam publikací, softwaru a technologií autora	102
12.	Použitá literatura a zdroje	105
13.	Použité symboly a zkratky	113
14.	Seznam obrázků.....	114
15.	Seznam tabulek	118
16.	Příloha č. 1 - Legislativní podmínky.....	119
16.1.	Tabulky z Vyhlášky č. 15/2010 Sb.....	119
16.2.	Tabulky z metodického pokynu k Vyhlášce č. 15/2010 Sb.	120
16.3.	Vyhláška č. 20/2012 Sb.....	120
16.4.	ASHRAE 62. 1 - 2007.....	120
16.5.	Vyhláška č. 343/2009 Sb. – Větrání ve školních prostorech.....	121
16.5.1.	Mikroventilace.....	122
16.5.2.	Větrací mřížky.....	122
16.5.3.	Větrací štěrby.....	122
16.6.	Evropská norma ČSN EN 15251	122
16.7.	Americká norma ASHRAE 62.1 - 2007. Ventilation for Acceptable Indoor Air quality	123

17.	Příloha č. 2 - Grafy z terénních měření vnitřního prostředí učeben	124
17.1.	Měření v učebně C215 s VZT.....	124
17.1.1.	Měření se systémem VZT – letní podmínky.....	124
17.1.2.	Měření se systémem VZT – zimní podmínky	124
17.2.	Měření v učebně As135.....	125
17.2.1.	Letní podmínky As135.....	125
17.2.2.	Zimní podmínky As135	126
17.3.	Měření v učebně A231 – letní podmínky, provětrávání.....	128
17.4.	Měření v učebně C215 bez vzduchotechniky.....	130
17.4.1.	Zimní měření C215 bez VZT	130
17.4.2.	Letní měření C215 bez VZT	131
18.	Příloha č. 3 - Rovnice popisující proudění.....	133
18.1.	Rovnice kontinuity (continuity equation)	133
18.2.	Rovnice zachování hybnosti – Cauchyho rovnice (momentum equation)	133
18.3.	Zákon zachování energie	133
18.4.	Transportní rovnice modelu RNG $k - \epsilon$	133
19.	Příloha č. 4 - Analýza stopovacího plynu pro účely laboratorních experimentů	135
20.	Příloha č. 5 - Průběhy teplot kulového teploměru a vzduchu během experimentů	136
21.	Příloha č. 6 - Průběhy teplot vzduchu na stojanu 4 během experimentů.....	138

1. Úvod - motivace

Školní budovy tvoří skupinu budov se specifickými potřebami, ze kterých vyplývají požadavky na vnitřní prostředí (VP). Kvalita vnitřního prostředí ve školních budovách by měla být předmětem stálého veřejného zájmu, protože efektivní vzdělávací proces je nezbytnou podmínkou udržitelného rozvoje každé společnosti. Důvodem je dlouhodobý pobyt osob (dětí, studentů, pedagogů a zaměstnanců) v interiéru, který má zásadní vliv na lidské zdraví. Průměrný Evropan (a Severoameričan) stráví ve vnitřním prostředí budovy 85% svého života (Turiel, 2006). Vnitřní prostředí má vliv na produktivitu práce, a tedy na studijní výkon uživatelů objektu (Shaughnessy R., 2008). Pokud je prostředí nevyhovující, klesá produktivita práce pracovníků (Lan, a další, 2011). Efektivita výuky je podmíněna soustředěním žáků, které tedy musí být podpořeno kvalitou vnitřního prostředí, zejména účinným větráním. Kvalitu vnitřního prostředí ovlivňuje mnoho faktorů (viz 1.1 Obr). Mezi nejdůležitější faktory kvality vnitřního prostředí patří kvalita vnitřního ovzduší a tepelný komfort.

Celá skupina požadavků na vnitřní prostředí souvisí s energetickou náročností budov. V nedávném období se také ve školách investovalo do zateplení a výměny oken za účelem úspory tepla. Úspory energie jsou jistě žádoucí i z hlediska dopadu na životní prostředí, ale bez komplexního řešení mohou vést ke znehodnocení vnitřního prostředí. Příčinou špatné kvality vnitřního prostředí v nových a rekonstruovaných školách je ve většině případů nedostatečné větrání, které se projevuje zejména v zimních měsících. Při nedostatečném větrání se v místnosti zvyšuje koncentrace škodlivin i teplota a vlhkost vzduchu.

Negativní vliv nedostatečné kvality vnitřního ovzduší na studijní produktivitu byl popsán v několika studiích. Kvalita vnitřního prostředí je důležitým faktorem ovlivňujícím nejen pohodu člověka, ale rovněž jeho zdraví či produktivitu. Zásadním aspektem kvality vnitřního prostředí jsou tedy zdraví a hygienické požadavky. Mezi nejčastěji zmiňované problémy související s kvalitou vnitřního ovzduší patří snížená schopnost soustředit se nejen u studentů, ale i na straně pedagogů. Dále pak hraje velkou roli únava a nevolnost, které snižují studijní výkony. Citlivější osoby trpí kašlem, rýmou, zvýšeným výskytem alergií či astmatem.

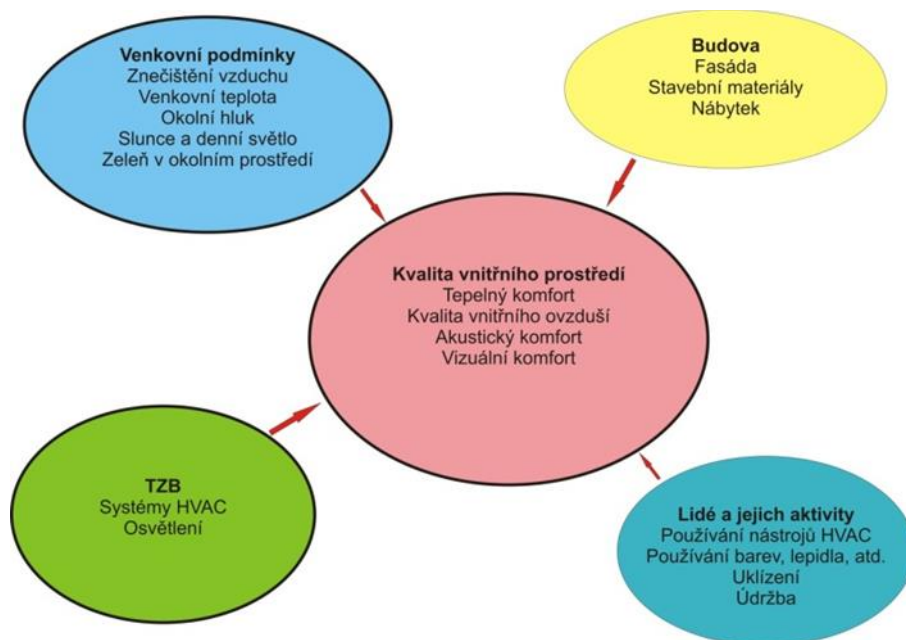
Stížnosti na kvalitu vnitřního prostředí jsou poměrně běžné. V legislativě jsou uváděny požadavky na vnitřní prostředí, aby se zabránilo dalšímu rozvoji tzv. nemoci z budov (SBS = sick building syndrome). V odborné vědecké literatuře např. (Jaakkola, a další, 1989) se uvádějí studie vlivu nepohody na pracovní výkonnost, někde se také zkoumá výskyt zvýšené nemocnosti uživatelů budov, např. dětí ve škole.

Mnohé školní budovy, z nichž některé mají navíc historickou hodnotu, vyžadují úpravy nebo renovaci. Plánované úpravy v sobě zahrnují snahy o přiblížení se standardu budov s nízkou spotřebou energie. Renovace musí vzít v úvahu hlediska vyučovací, konstrukční a provozní a zároveň uspokojit požadavky na vnitřní prostředí. Hlavní snahou je najít uspokojivé finančně dostupnější řešení, a tím zvrátit současnou nepříznivou situaci.

Hledají se často dostupnější řešení k jejich opravě a tím nabývají na důležitosti také myšlenky k úpravě vnitřního prostředí.

Podle analýzy (Shaughnessy R., 2008) je studijní produktivita závislá na množství větracího vzduchu na osobu (1.2 Obr).

Podle tří dalších studií bylo prokázáno, že ani v běžných budovách výměna vzduchu není dostatečná (Kohoutková, a další, 2015) a je obecně nižší než jsou povinné návrhové požadavky (měření škodlivin bylo provedeno také v univerzitní budově ČVUT), dále že interiérové koncentrace organických těkavých sloučenin (např. formaldehydu, toluenu, benzenu) jsou obvykle mnohem vyšší než odpovídající exteriérové koncentrace - (Crump, a další, 2005) - (1.3 Obr.). Třetí studie (Koiv, 2007) ukázala, že během doby obsazenosti učebny koncentrace CO₂ rychle vystoupá až k doporučeným limitním hodnotám a pak se nadále zvyšuje, což je způsobeno neodpovídajícím větráním pro daný provoz.

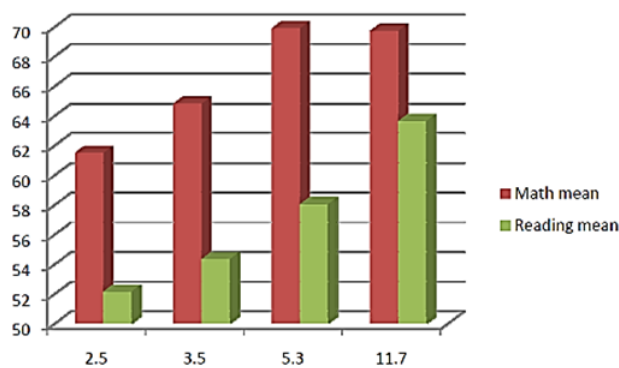


1.1 Obr. Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí ve školách (IEQ) podle (D'Ambrosio Alfano, 2010)

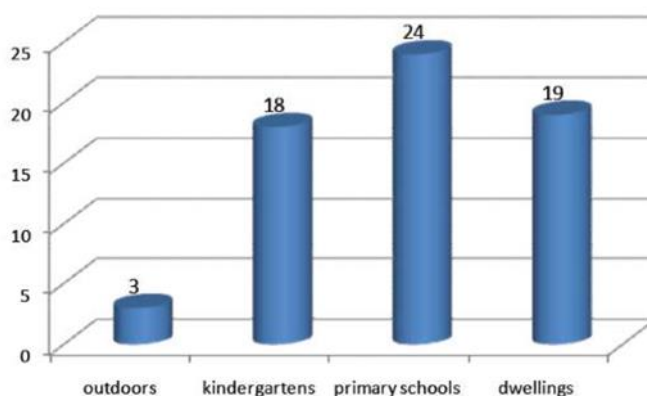
Všechny parametry vnitřního prostředí budov ovlivňuje větrání – je základním prostředkem k zajištění takového stavu vnitřního prostředí, které negativně neovlivní zdraví a zajistí pocit pohody člověka.

Pro oblast vnitřního prostředí jsou stanoveny přímé kompetence dozorové činnosti nad kvalitou ovzduší hygienické službě, která je definována § 13 zákona č. 258/2000 Sb. a týká se také staveb předškolních a školských zařízení. Na tuto oblast je zaměřena pozornost při posuzování projektových dokumentací nových staveb či rekonstrukcí objektů, kdy jsou posuzovány podmínky větrání a vytápění, které mohou významně ovlivnit kvalitu vnitřního prostředí (mikroklimatické podmínky, výskyt chemických škodlivin i mikrobiální znečištění). Zejména v prostředí, ve kterém se pohybují děti, je nezbytná aplikace materiálů, které mají atesty zdravotní nezávadnosti a je u nich předpoklad, že nebudou do okolí emitovat žádné škodliviny. (KHSMKvO, 2012)

Důraz se klade na mikroklimatické podmínky (teplota, vlhkost, proudění vzduchu) a stav čistoty zařízení (podlah, povrchů, maleb). Již v létech 2006 - 2007 proběhlo rozsáhlé měření faktorů vnitřního prostředí v řadě škol v Moravskoslezském kraji. Prokázalo se naprosto nedostatečné proudění vzduchu v průběhu vyučování (tím dosaženy nepřiměřené koncentrace CO₂), nedodržování stanovených teplot v rozmezí 22+/-2° C, vlhkosti s požadovanou hodnotou pro chladné období minimálně 30 %. Navíc byly v prostředí škol naměřeny nadlimitní hodnoty prachu (frakce PM 10 a PM 2,5). Vedení škol a školských zařízení bylo mnoha způsoby vyzýváno k zajištění stanovených mikroklimatických podmínek, které zoptimalizují kvalitu vnitřního prostředí, kde děti tráví 1/3 - 1/4 dne.



1.2 Obr. Studijní produktivita žáků základních škol v matematice a čtení v závislosti na množství venkovního vzduchu na osobu (l/s) podle (Shaughnessy R., 2008)



1.3 Obr. Týdenní střední koncentrace formaldehydu v interiéru (exteriér, školky, základní školy, lidská obydlí) a exteriéru ve Francii podle studie (Crump, a další, 2005)

1.1. Kvalita vnitřního ovzduší ve školách (IAQ)

Kvalita vnitřního prostředí (VP) zahrnuje široký okruh aspektů: kvalitu vnitřního ovzduší včetně škodlivin přenesených do prostoru z exteriéru (prachových částic a ozónu), tak i škodlivin z interiéru produkovaných osobami, jejich činnostmi, emisemi ze stavebních materiálů a nábytku, a další parametry, které mohou ovlivňovat pohodu, ale také zdraví uživatelů budov včetně tepelného prostředí, také přívod odpovídajícího množství čerstvého vzduchu, prevenci proti bakteriím, plísním a hub a ochranu proti hluku a vhodné osvětlení. Všechny tyto aspekty jsou klíčové pro návrh takového vnitřního prostředí (VP), které nepřináší žádné riziko pro uživatele budov. Mnoho platných norem poskytuje návod, jak docílit VP o odpovídající kvalitě. Proudění vzduchu je tak důležité, protože to je jediný způsob, jak odstranit oděry ze sdílených prostor.

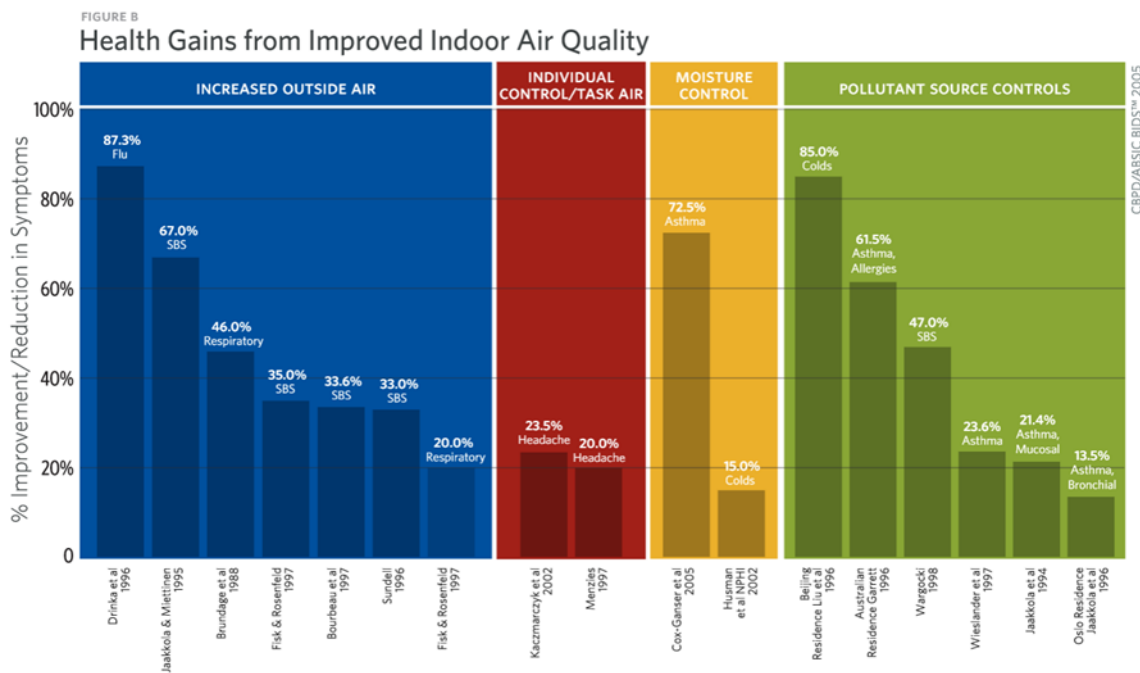
S vysokým podílem času stráveného v budovách rostou i očekávání osob, že se budou cítit v interiéru komfortně – až už z tepelného hlediska (tepelný komfort) nebo z hlediska oděrů a kvality vnitřního vzduchu obecně.

Mezi nejčastěji zmiňované problémy související s IAQ patří snížená schopnost soustředit se nejen u studentů, ale i na straně pedagogů. Dále pak hraje velkou roli únava a nevolnost, které snižují studijní výkony. Citlivější osoby trpí kašlem, rýmou, zvýšeným výskytem alergií či astmatem (1.4 Obr.).

Studie univerzitního centra pro budovy v USA kvantifikuje snížení zdravotních symptomů spolu se zvýšením průtoku větracího vzduchu a snížením koncentrací škodlivin.

Vyhláška č. 410/2005 Sb. ve znění pozdějších předpisů (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.) požaduje množství přiváděného venkovního vzduchu do učeben 20 až 30 m³/h na žáka. Vyhláška č. 343/2009 Sb. uvádí, že přirozené větrání musí být v případě těsných oken zajištěno systémy mikroventilace nebo větracími štěrbinami. 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. Je stanoven požadavek na množství větraného vzduchu na žáka v těchto prostorách. Další normy a vyhlášky jsou uvedeny v příloze č. 1 na str. 119.



1.4 Obr. Přínos vylepšené IAQ na zdraví osob v budovách (venkovní vzduch, osobní větrání, vlhkost a škodliviny) podle studie (Kats, 2006)

V roce 2015 bylo realizováno dotazníkové šetření stavu školních budov pro celou Českou republiku ve spolupráci s ČVUT. Průzkum byl věnován celkově stáří těchto budov, jejich umístění, provedení oken a mnohemu dalšímu. Pro problematiku kvality vnitřního ovzduší jsou zajímavé zejména výsledky podle studie (Begeni, a další, 2015), které byly získány pro zimní období v době výuky a v době přestávky a které zaznamenaly, že v době výuky je 70 % učeben odvětráno prostřednictvím otevírání oken vyučujícím podle jeho uvážení; v 13 % jsou okna převážně zavřená z důvodu úspory energie na vytápění; 8 % dotázaných využívá pro větrání tzv. mikroventilaci; 6 % dotázaných odpovědělo, že křídla oken jsou převážně vyklopená. 0% používá nucené větrání (zanedbatelné). O přestávce je podle výsledků šetření 40 % zavřených oken z bezpečnostních důvodů; 22 % subjektů provozuje vyklopené křídla oken – z toho 18 % spodní křídla vyklopená a 4 % horní křídla vyklopená; v 13 % jsou dveře i okna otevřená a 14 % škol provozuje okna s mikroventilací.

Z výsledků šetření vyplývá nutnost hledání sofistikovaného řešení větrání pro školní budovy, které prošly výměnou oken a zateplením fasády z důvodu požadavků na energetickou náročnost budovy, a nyní nemají finanční prostředky nutné k nákladné opravě stavu vnitřního ovzduší a k řešení specializovaného systému větrání.

1.1.1. Další parametry kvality vnitřního ovzduší (IAQ) - znečištění, škodliviny

Problémy s kvalitou vnitřního ovzduší v budovách začaly v 70. letech 20. století v důsledku ekonomické krize, kdy byly hlavní prioritou nad všemi ostatními požadavky úspory energie. Od této doby byly všechny budovy postupně lépe izolovány, aby se tím zabránilo nežádoucímu průtoku

vzduchu. Systémy přirozeného větrání byly nahrazeny strojními systémy. Jako další opatření bylo zavedeno snížení průtoku vzduchu.

Znakem školních budov je vysoká obsazenost, přítomnost osob a tím pádem přítomnost škodlivin vycházejících z ní, jako jsou: CO₂, vlhkost, lidské oděry, pachy ze splaškové vody, prach. Jako další škodliviny, které by neměly být zanedbány, jsou mikrobi, organické těkavé sloučeniny (VOC), ozon a plastifikátory, které jsou především uvolňovány z nábytku a dalšího vybavení. Další typy škodlivin mohou být přítomné podle speciálního provozu místnosti (např. laboratoře, dílny).

Průzkum IAQ ve školních budovách v USA

Podle amerického telefonického průzkumu provedeného mezi 476 respondenty (rodiči nebo zákonnými zástupci dětí) v květnu 2006 v Georgii děti opakovaně trpěly dýchacími problémy během vyučování nebo těsně po jeho skončení. 53 % rodičů uvedlo, že jejich dítě zameškalo den a více, aby se uzdravilo, zatímco 34 % uvedlo, že jejich dítě mělo těžkosti se soustředit vzhledem k uvedeným symptomům. Téměř polovina respondentů uvedla, že věří, že nezdravé vnitřní ovzduší přispívá ke zdravotním problémům jejich dětí a ke schopnosti soustředit se. Výsledná pravděpodobnost chyby průzkumu je +/- 5 %. Podle americké organizace pro ochranu prostředí EPA (Environmental Protection Agency) má 20 % škol ve Spojených státech problémy s vnitřním ovzduším. Podle americké Společnosti pro plíce (American Lung Association) děti zameškají více než 10 milionů vyučovacích dní za rok kvůli astmatu, které je způsobeno právě nedostatečnou kvalitou vnitřního ovzduší. (Stammat Communications, 2006)

Příčiny problémů s vnitřním ovzduším

Chemické znečištění zavedené do prostředí např. používáním agresivních čisticích prostředků vede k chorobám dýchacího ústrojí. Vysoká relativní vlhkost vzduchu vede k rozvoji bakterií a plísní (1.5 Obr.). Vysoká koncentrace CO₂ způsobuje únavu a sníženou schopnost soustředit se. Znečištění od srsti zvířat i od organismů jako jsou např. morčata, švábi a roztoči je spouštěčem astmatu a alergií.



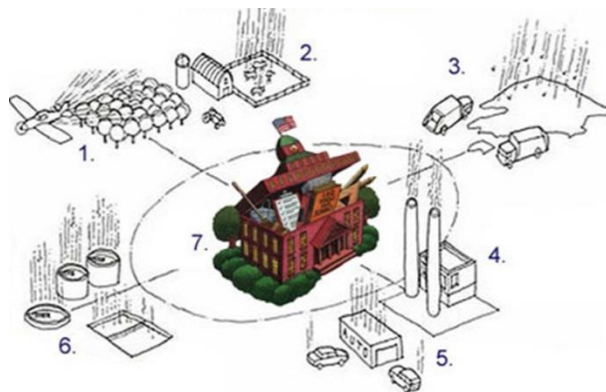
1.5 Obr. Ilustrační foto plísně ukryté za nábytkem v budově školy v USA (Lowry, 2013)

Zdraví, IAQ a venkovní podmínky

Potenciální znečištění venkovního prostředí by se mělo brát v úvahu nejen při stavbě nové školy. Pokud již školní budova stojí, je nutné upravovat venkovní podmínky. V nejlepším případě zavést pravidla chování v nejbližším okolí budovy. Na Obr. 1.6 jsou zobrazeny nejčastější zdroje znečištění venkovního prostředí: 1 - hnojení úrodné půdy a sadů, 2 – znečištění od zemědělské produkce a hospodářských zvířat, 3 – znečištění od skládek a spaloven, 4 – znečištění od chemického průmyslu, 5 – znečištění od výrobních závodů, 6 – znečištění od čištění odpadních vod, 7 – znečištění od dálnic, parkovišť a překladišť.

Často se zapomíná na vliv okolí, který je možné změnit, či aspoň částečně ovlivnit, např. stojící automobily čekajících rodičů se zapnutým motorem instalací cedulí s příkazem Vypni motor. Podobné jako s kouřením cigaret u vchodů do škol nebo u nasávacích fasádních vyústek vzduchotechniky.

Dalším bodem, který může zlepšit venkovní podmínky je dostatek zeleně. Zeleň má schopnost pohlcovat prachové částice, zchlazovat prostředí odparem vlhkosti, pohlcovat hluk a v neposlední řadě má pozitivní vliv na psychiku člověka. (US EPA, 2012)



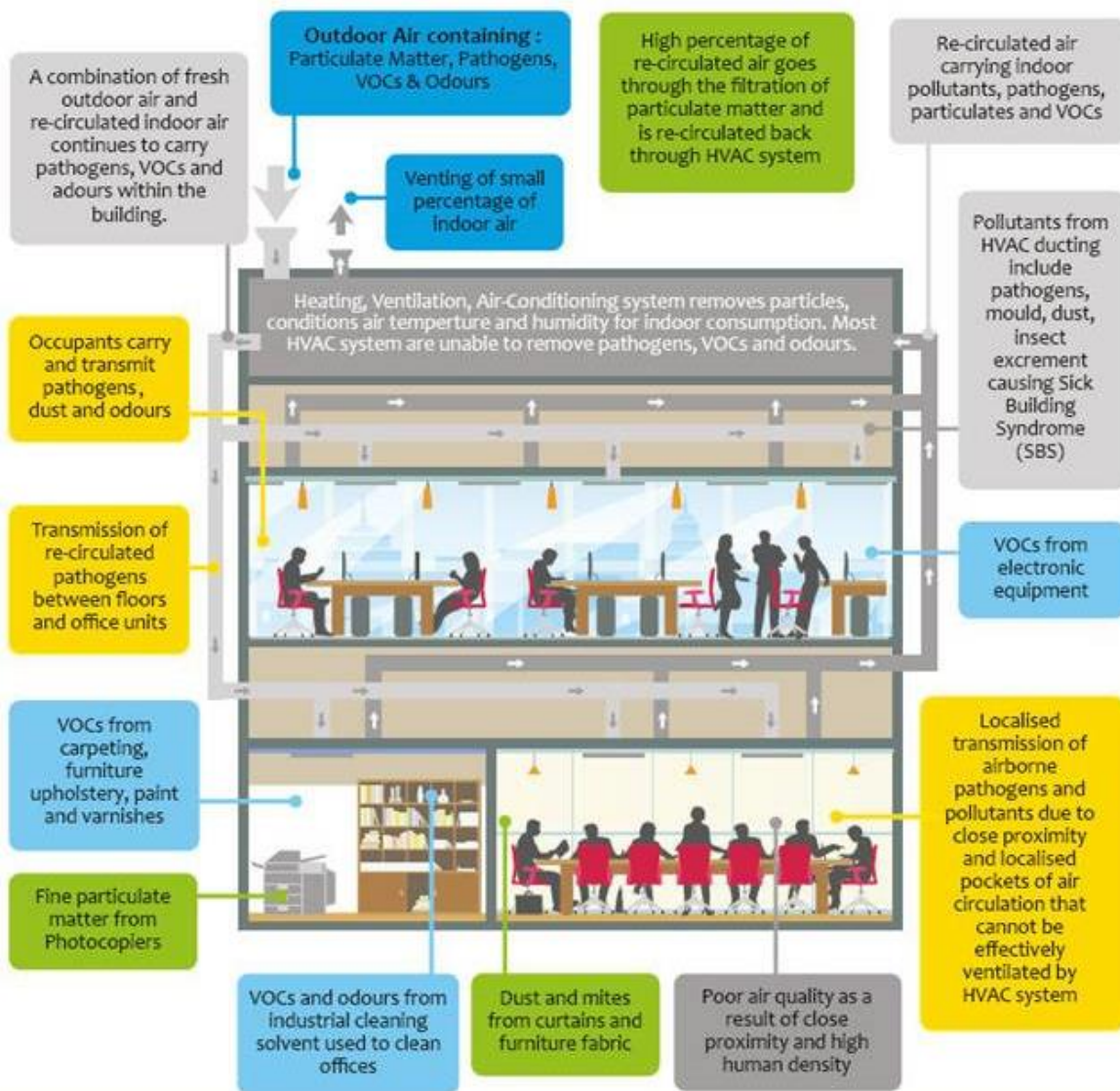
1.6 Obr. Faktory znečištění venkovního ovzduší (US EPA, 2012)

Při návrhu obálky budovy a typu větrání je proto nutné dbát i na exteriérový stav ovzduší. Jakmile se některé škodliviny (VOC, patogeny a odéry) dostanou do systému vzduchotechniky, tak tento systém není uzpůsoben k jejich filtraci a dokonalému odstranění, škodliviny zůstávají v něm a kolují dále budovou (Obr. 1.7).

IAQ ve školách podle německých výzkumů

Mezi další znečišťovatele, kterým ve školních budovách čelíme, patří podle studie od (Bischof, 2008):

- Nadměrná vlhkost v konstrukci budovy nebo v ovzduší, které vede k zvýšenému množení mikrobů
- Emise ze stavebních materiálů, instalací a příslušenství
- Různé odéry při nedostatečném větrání
- Emise z čisticích prostředků
- Možnému výskytu prachu a kouře při vyučování přírodovědných předmětů
- Prachové částice



1.7 Obr. Schéma znečištění vnitřního ovzduší vzduchotechnickým potrubím (zdroje a cesta vniknutí do vnitřního prostředí) (Lowry, 2013)

2. Současný stav problematiky

2.1. Tepelný komfort a kvalita vnitřního ovzduší

Mezi atributy kvality vnitřního prostředí (IEQ) řadíme tepelný komfort (tepelnou pohodu), kvalitu vnitřního ovzduší (IAQ), akustický komfort, vizuální komfort (schéma na 1.1 Obr. na straně 15), elektroiontové mikroklima a další. Vysokou kvalitu vnitřního prostředí určuje vhodná teplota interiéru, omezení průvanu, teplota povrchů obvodových konstrukcí, kontinuální přívod čerstvého vzduchu, optimální vlhkost interiéru, minimalizace materiálů uvolňujících zdraví škodlivé látky, akustický komfort, přirozené osvětlení, vizuální kontakt s okolím, se zahradou, zamezení přehřívání v létě. Tepelné podmínky mají mnohem větší vliv na subjektivní pocit pohody člověka, míru odpočinku i skutečnou produktivitu práce než nežádoucí škodliviny či obtěžující hluk.

Kvalita vnitřního prostředí zahrnuje široký okruh aspektů: kvalitu vnitřního ovzduší včetně množství škodlivin přenesených do prostoru z exteriéru (prachových částic a ozónu), škodlivin z interiéru produkovaných osobami, jejich činnostmi, emisemi ze stavebních materiálů a nábytku, a další parametry, které mohou ovlivňovat pohodu a zdraví uživatelů budov, jako je tepelné prostředí a přívod odpovídajícího množství čerstvého vzduchu, prevenci proti bakteriím, vzniku plísní a hub a ochranu proti hluku a vhodné osvětlení. Všechny tyto faktory jsou klíčové pro návrh takového VP, které nepřináší žádné riziko pro uživatele budov. Mnoho platných norem poskytuje návod, jak docílit VP o odpovídající kvalitě.

S vysokým podílem času stráveného v budovách rostou i očekávání osob, že se budou cítit v interiéru komfortně – z tepelného hlediska (tepelný komfort) nebo z hlediska oděrů a kvality vnitřního vzduchu obecně. Proudění vzduchu je také důležité, protože to je jediný způsob, jak odstranit oděry ze sdílených prostor.

2.2. Systémy větrání, množství větracího vzduchu a koncentrace CO₂

Jednou z prvních možností, jak ovlivnit mikroklima ve vnitřním prostoru, je větrání. Lidstvo ji využívá od počátku, kdy si budovalo první obydlí. Podstatou větrání je výměna vzduchu v interiéru, při níž se odvádí znehodnocený vzduch a nahrazuje se přívodem vzduchu nezávadného. Nejčastějším parametrem větrání místnosti je výměna vzduchu, která určuje, kolikrát za hodinu se vzduch v místnosti nahradí (vymění) čerstvým vzduchem. Minimální hodnota (je vyžadována hygienickými předpisy a platí i pro bytové jednotky) je 0,5 (tj. v místnosti se plně vymění vzduch za 2 hodiny) a ve stavbách občanské vybavenosti, kde se shromažďuje větší počet osob, může nucené větrání dosáhnout 5 až 10 - ti násobné výměny vzduchu. Základním výkonovým parametrem vzduchotechnického zařízení je vzduchový výkon (též objemové množství nebo objemový průtok vzduchu) v jednotkách m³/h, nebo m³/s.

Větrací systémy rozdělujeme na přirozené, nucené, kombinované (sdružené, hybridní).

Původně výměna vzduchu probíhala samočinně a zajišťovaly ji rozdíly mezi vnějším a vnitřním prostředím způsobené gravitačním vztlakem, dynamickým účinkem větru a obecně tlakovými rozdíly. Tento systém fungoval díky netěsným rámcům oken a také díky existenci kamen a krbů. V dnešní době je nutno pamatovat na vytvoření potřebného prostupu vzduchu přes obvodový plášť budovy.

Tepelný komfort i kvalita vnitřního ovzduší jsou ovlivnitelné větráním. Výměna vzduchu v prostoru, kdy je znehodnocený vzduch z prostoru odváděn, a do prostoru je přiváděn vzduch venkovní zabezpečuje zároveň odvod škodlivin a tím uspokojuje i podmínky VP.

Požadavky na výměnu závisí na koncentraci škodlivin, počtu osob v prostoru, provozu prostoru a umístění budovy. Pokud se v provozu nachází výrazný zdroj látky či energie, který je nutné regulovat, probíhá větrání podle této škodliviny. Dále jsou určeny dávky vzduchu pro provozy, kde je zdrojem člověk a pokud má místnost určitelný charakteristický provoz jako je škola, jsou vyžadovány výměny

vzduchu podle typu tohoto provozu. Vzduch lze vyměňovat různými systémy: přirozeně, nuceně a hybridně.

Většina faktorů vnitřního prostředí je ovlivnitelná větráním. Větrání je definováno jako výměna vzduchu v prostoru, při které je znehodnocený vzduch z prostoru odváděn a do prostoru je přiváděn vzduch venkovní. Větráním je ovlivňováno množství škodlivin, včetně mikroklimatických podmínek. Za škodliviny považujeme všechny látky (plyny, páry, dýmy, kapalně a pevně aerosoly, nadměrné teplo, vlhkost), které v určité koncentraci nebo intenzitě poškozují zdraví člověka, případně negativně působí na výrobní postup, životnost staveb. Požadavky na větrání závisí na počtu osob v prostoru, vykonávané činnosti a na používané technologii, dalších zdrojích škodlivin (vnějších i vnitřních), na konstrukci a umístění budovy a převládajícím směru větru. Výměna vzduchu v prostoru se děje způsobem přirozeným, nuceným nebo použitím klimatizace.

Přirozené větrání je výměna vzduchu v budově vlivem gravitace a vlivem větru. Princip gravitačního přirozeného větrání je založen na různé hustotě (teplotách) vzduchu uvnitř a vně budovy v důsledku rozdílných teplot vzduchu. Teplý vzduch stoupá vzhůru a chladnější klesá dolů. Při vyšší teplotě vzduchu v místnosti než venku odchází vzduch z místnosti horní částí větracího otvoru a chladný venkovní vzduch je přiváděn spodní částí otvoru. Působení větru na budovu se projevuje tím, že na návětrných stranách budovy mění vítr svoji pohybovou energii na tlakovou a vytváří se přetlak oproti atmosférickému tlaku. Na závětrných stranách vzniká podtlak. Proudění vzduchu do budovy a z budovy je důsledkem těchto tlakových poměrů. Oba principy se uplatňují v přirozeném větrání staveb, jako jsou: infiltrace, exfiltrace, provětrávání (větrání otevřenými okny), šachtové větrání, a aerace.

Pokud přirozeným větráním nelze eliminovat tepelné ztráty nebo zisky větraného objektu a zaručit tak alespoň minimální hygienickou dávku vzduchu na osobu, musí se použít větrání nucené, kde ve vzduchotechnickém zařízení dopravu vzduchu zajišťuje ventilátor. Nucené větrání musí být vždy zřízeno v provozech bez denního světla – bez možnosti přirozeného větrání okny nebo světlíky.

Ventilátor může být umístěn buď na přívodu vzduchu a odvod je přirozeným způsobem, nebo na odváděném vzduchu a přívod vzduchu je přirozeným způsobem – potom mluvíme o větrání kombinovaném, nebo na přívodu i odvodu současně. Nuceně přiváděný vzduch bývá částečně upraven, tj. může být použita filtrace, ohřev vzduchu i využívání tepelného obsahu odváděného vzduchu pro tepelnou úpravu přiváděného vzduchu (rekuperace tepla). Nucené větrání umožňuje regulaci množství vyměňovaného vzduchu podle potřeb provozu. Tam, kde je to možné, se používá hybridní větrání - inteligentními systémy s řídicími prvky, které umí automaticky zajistit požadované hodnoty fyzikálních, chemických i biologických ukazatelů a přepínat mezi režimy přirozeného a nuceného větrání, aby minimalizovaly spotřebu energie a přitom udržely požadovanou úroveň vnitřního prostředí.

Větrání zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu vnitřního ovzduší a tepelnou pohodu ve školních budovách. Legislativní podmínky jsou pro návrh větrání školních budov velmi důležité, ale v současné době v ČR neexistuje vhodný jediný přímý předpis.

Rychlost proudění vzduchu (RPV) a charakter proudění jsou hlavním parametrem vnitřního prostředí. Pro větší místnosti je definována uživatelská zóna, ve které je nutné zajistit požadovaný interval RPV podle konkrétního předpisu pro daný typ místnosti. Pobytová (uživatelská) zóna je prostor v občanských stavbách, který je definován od podlahy po výšku 1,6 – 2,0 m nad podlahu.

Pro učebny se tyto intervaly pohybují v hodnotách 0,1 – 0,2 m/s (Vyhláška č. 343 / 2009), teplé období 0,16 – 0,25 m/s a chladné období 0,13 - 0,2 m/s podle vyhlášky č. 15/2010. Pohyb vzduchu v omezeném prostoru je formován proudy vzduchu, které jsou do daného prostoru přiváděny otvory, kdy pak tyto proudy vstupují do prostoru s turbulentním charakterem. Turbulentní charakter proudění těchto proudů způsobuje strhávání okolního vzduchu do proudu.

Množství větracího vzduchu do učeben u nás je dáno legislativními předpisy. S ohledem na hospodárnost se doporučuje navrhovat průtok venkovního vzduchu, trvale přiváděného do učeben v době pobytu žáků. Toto množství bylo stanoveno podle bilance CO₂ ve větraném prostoru.

Vyhláška č. 343/2009 Sb. uvádí, že *Přirozené větrání musí být v případě těsných oken zajištěno systémy mikroventilace nebo větracími štěrbinami. 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. Je stanoven požadavek na množství větraného vzduchu na žáka 20 - 30 m³/h v těchto prostorách.*

Ve školních budovách se vyskytuje několik typů provozů – učebny, laboratoře, tělocvičny, jídelny, hygienické zázemí, ale v rozlehlých kampusech i restaurace, obchody a velké sály - auly. Pro každý provoz jsou předepsány normové požadavky a zadána návrhová kritéria. Pro podrobnější popis jednotlivých provozů a doporučení týkající se konstrukce systémů technických zařízení budov (TZB) je nutné se zohlednit individuální předpisy pro každý z těchto provozů.

Hlavní pozornost v této práci je věnována především problémům učeben.

2.2.1. Přijatelná a povolená koncentrace škodliviny CO₂ v prostoru

Maximální koncentrace škodliviny v prostoru podle (Dlouhý, a další, 2008)

$$K = \frac{(C_o - C_p)}{(C_{po} - C_p)} \leq 1$$

Rovnice 2.1 Maximální koncentrace K škodliviny v prostoru

K – poměr koncentrací škodlivin v prostoru (limit) [-]

C_{po} – počáteční koncentrace škodliviny ve zkoumaném prostoru [mg/m³ či ppm]

C_p – koncentrace škodliviny v přiváděném vzduchu [mg/m³ či ppm]

C_o – koncentrace škodliviny v odváděném vzduchu [mg/m³ či ppm]

Množství větracího vzduchu podle produkce škodliviny podle (Dlouhý, a další, 2008)

$$V = \frac{(M_{šk} * 10^{-6})}{K * (C_{po} - C_p)}$$

Rovnice 2.2 Množství větracího vzduchu podle produkce škodliviny

V – objemový průtok [m³/s]

M_{šk} – produkce škodliviny v [kg/s], 10⁻⁶ převod na [mg/s]

K - maximální přijatelná koncentrace škodlivin v prostoru (limit), [mg/m³]

C_{po} – počáteční koncentrace škodliviny ve zkoumaném prostoru [mg/m³]

C_p – koncentrace škodliviny v přiváděném vzduchu [mg/m³]

$$k(CO_2) = \left(\frac{0,5 * 4}{20} \right) + 0,03 = 0,13 \%$$

Rovnice 2.3 Vyčíslená povolená koncentrace CO₂

Jednotky: [m³/h a objemová %]

Odvození množství větracího vzduchu

Oxid uhličitý je obsažen ve vzduchu v množství cca. 0,03 %. Vydechovaný vzduch obsahuje cca 4 obj. % CO₂ a 5 obj. % vodní páry.

Vydechuje – li člověk při fyzické práci odpovídající tělesnému výkonu cca 120 W (420 kJ/h) v průměru 0,5 m³/h vzduchu a obsahuje – li čerstvý větrací vzduch 0,03 % CO₂ (tj. 0,3 l/m³ = 300 ppm = 540 mg/m³), stoupne (při přítoku větracího vzduchu na 1 osobu V = 20 m³/h koncentrace CO₂ na hodnotu 0,13 %.

Max. povolené je 0,15 % (tj. 1500 ppm)

Alternativně může čerstvý vzduch obsahovat až 0,04 % (400 ppm) CO₂ podle (Mezivládní panel pro změny klimatu (IPCC), 2001).

2.2.2. Stanovení množství větracího vzduchu

Stanovení optimálního množství větracího vzduchu je otázka poměrně komplikovaná, která je ovlivněna běžnou produkcí škodlivin od osoby a tzv. přijatelnými koncentracemi. Hlavním cílem je zajištění požadovaných hodnot hygienických parametrů VP. Za uznávané měřítko pro posuzování je považováno Pettenkoferovo kritérium, které určuje jako optimální hodnotu koncentrace 1000 ppm (tj. 1,0 l/m³ = 1800 mg/m³), která slouží jako ukazatel znečištění vnitřního ovzduší od osob (oděry).

Při běžné produkci CO₂ od osoby a venkovní koncentraci 0,03 % CO₂ (tj. 0,3 l/m³ = 300 ppm = 540 mg/m³) až 0,04 % CO₂ vychází nutné množství čerstvého vzduchu na osobu podle Pettenkofera 28,57 až 33,33 m³/h a podle přijatelné koncentrace (1300 ppm) to vychází na 20 až 22,2 m³/h na osobu.

Podle trendu měřených venkovních koncentrací CO₂ na proslulé observatoři umístěné na Mauně Loe (Mauna Loa, Havaj), (popřípadě kompilovaných NOAA jako celoplanetární průměr), a podle celoročních venkovních koncentrací měřených v České republice např. ve Sloupu, byly podle (Litschmann, a další, 2011) po dobu 2 let (2009 – 2010) revidovány předpoklady týkající se parametrů čerstvého větracího vzduchu. Průměrná koncentrace za celé dvouleté období pro Sloup byla 392,7 ppm, pro observatoř na Mauně Loe 388,6 ppm a celoplanetární průměr byl uváděn jako 384,7 ppm. Koncentrace CO₂ pravidelně narůstá. Meziroční přírůstek v pozorovaných letech činil ve Sloupu 1,8 ppm, zatímco meziroční přírůstky na M. Loe byly na hodnotě pod 2,5 ppm každý rok (2,4 ppm v roce 2010, 1,86 ppm v roce 2009, 1,66 ppm v roce 2008). V roce 2019 byly naměřeny a zprůměrovány hodnoty pro září pro Maunu Lou o hodnotě 408,55 ppm podle (Země je CO₂, 2019). Podle těchto předpokladů by průměrná celoplanetární koncentrace pro rok 2020 byly v rozmezí koncentrace 402 - 409 ppm. V následující tabulce 2-1 Tab. byly provedeny výpočty pro venkovní koncentrace pro hodnoty 300 ppm až 420 ppm. Nižší koncentrace byly uvedeny z důvodu dosud používaných standardů složení vzduchu, neboť podle nich obsahuje vzduch z objemového hlediska 0,03 % oxid uhličitý.

Pro osoby, které se už na vnitřní prostředí adaptovaly, existuje přijatelná (maximální povolená) koncentrace 1500 ppm (tj. 0,15 % CO₂ = 1,5 l/m³). Pak vychází požadované množství větracího vzduchu 16,67 až 18,18 m³/h.

Porovnání množství větracího vzduchu na osobu podle přijatelných koncentrací je možno vidět v tabulce 2-1 Tab., a závislost mezi oběma veličinami je znázorněna v grafu (2.1 Obr.)

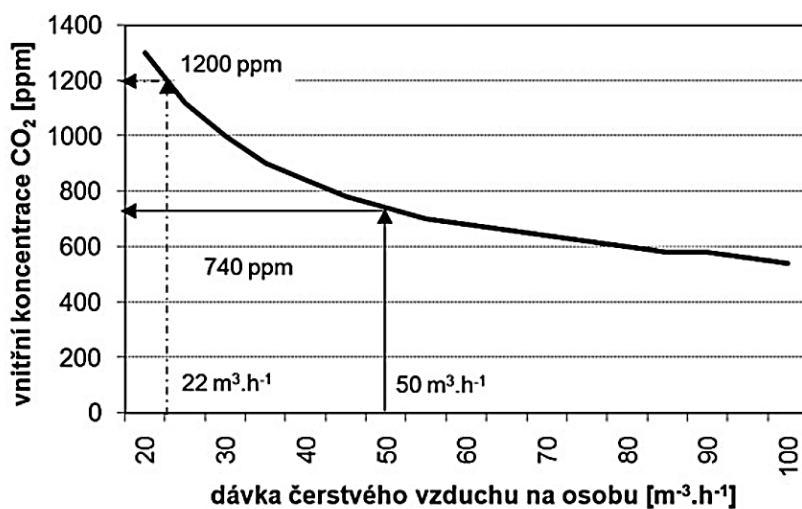
Porovnání průběhu koncentrací CO₂ v závislosti na použitém systému větrání v učebně je uvedeno na 2.2 Obr. Koncentrace škodliviny CO₂ byla měřena pouze na jednom místě v učebně. Jako reprezentativní místo bylo vybráno místo v uživatelské zóně na desce pracovního stolu učitele ve výšce 0,8 m nad podlahou. Uvedený graf tedy nepopisuje situaci v celém objemu třídy, ale pouze v tomto vybraném místě.

V posledních letech je trendem za pomoci moderních technologií (např. Internet of Things) průběžně monitorovat koncentraci CO₂ v pobytových prostorech a zvyšovat povědomí uživatelů o kvalitě vnitřního ovzduší v těchto prostorech. (Komínek, a další, 2017)

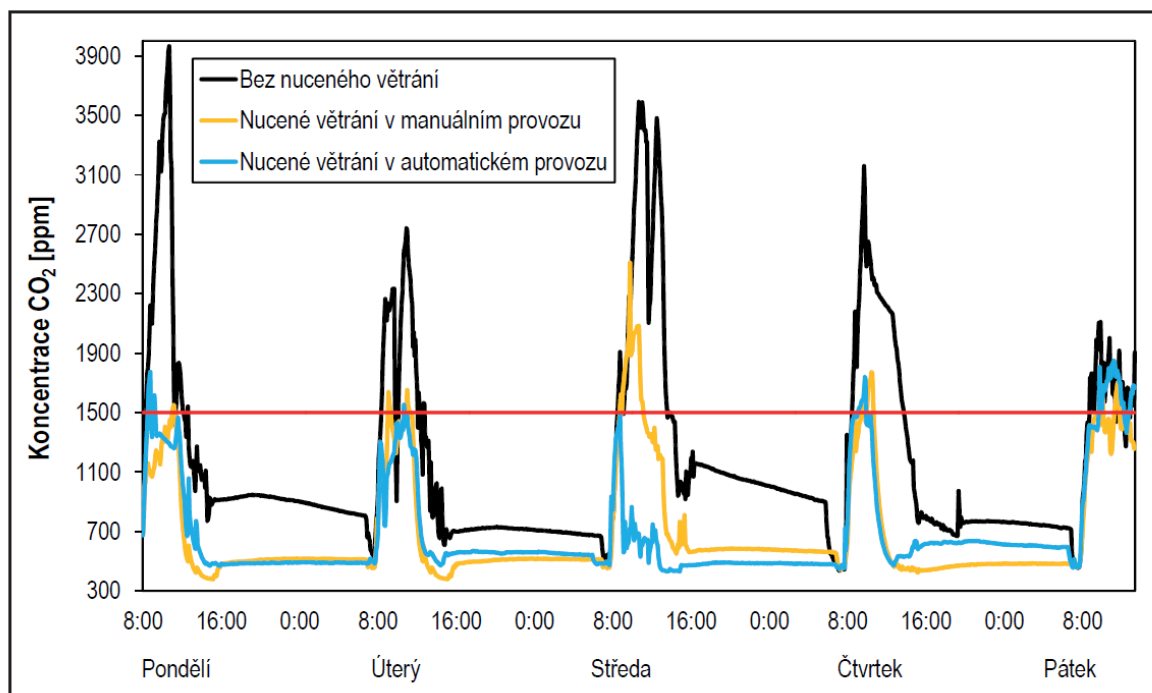
Zároveň se do povědomí dostává nutnost zabývat se stavem kvality vnitřního ovzduší pobytových místností i po provedené renovaci objektů. (Földváry, a další, 2014)

2-1 Tab. Změny množství větracího vzduchu na osobu podle změn koncentrací CO₂ (autor)

koncentrace v exteriéru (%)	přijatelná koncentrace v interiéru (%)	V - množství větracího vzduchu na osobu (m ³ /h)
0,042	0,15	18,52
0,041	0,15	18,35
0,04	0,15	18,18
0,038	0,15	17,85
0,03	0,15	16,67
0,042	0,13	22,73
0,041	0,13	22,47
0,04	0,13	22,2
0,038	0,13	21,74
0,03	0,13	20
0,042	0,1	34,48
0,041	0,1	33,89
0,04	0,1	33,33
0,038	0,1	32,26
0,03	0,1	28,57



2.1 Obr. Závislost dávky čerstvého vzduchu na množství oxidu uhličitého v interiéru - podle dizertační práce (Doležilková, 2007)



2.2 Obr. Porovnání průběhu koncentrací CO₂ v závislosti na použitém systému větrání v učebně základní školy (Begení, a další, 2014)

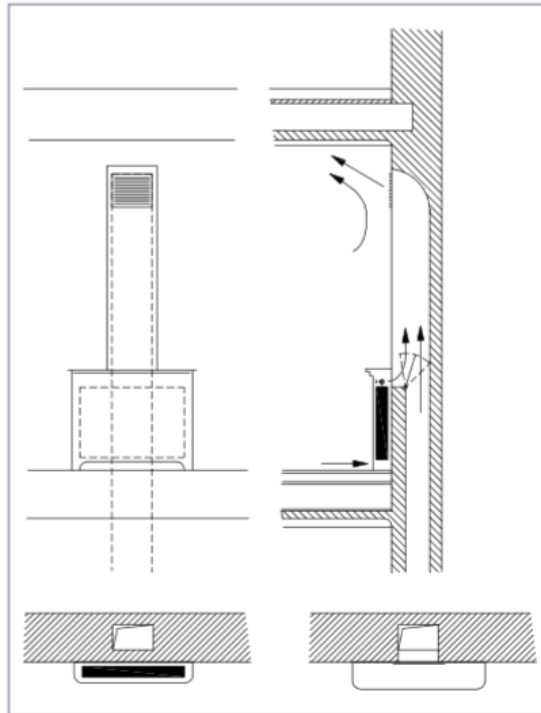
2.3. Přehled historických principů větrání ve školních budovách

První zmínky o větrání školních budov pocházejí ze 17. století. Postupem času se požadavky na větrání dostávaly do norem, vyhlášek a učebnic na konci 19. století. Jednalo se o především o šachtové větrání, které fungovalo na principu komínového efektu. Tímto větráním se zabezpečoval odvod znehodnoceného vzduchu žáky. V zimě se pak vytápělo kamny, která vždy musela mít komín a komínový odtah, aby se škodliviny vzniklé nedokonalým spalováním odvětraly. Po zrušení vytápění kamny v průběhu 20. století byly tyto šachty použity k jinému účelu, jejich prostor se využil k vedení např. elektroinstalačních kabelů, nebo byly úplně uzavřeny. Staré předpisy byly zapomenuty. Na začátku 21. století vyústily snahy o úspory energie na vytápění k utěsnění obálky budovy a nedostatečnému větrání.

První zmínky o pokynech pro větrání byly nalezeny v jezuitských análech na přelomu 17. a 18. století. Vyučující měli podle pokynů během vyučování třídy větrat větracími křídélky oken a po přestávce třídu řádně vyvětrat otevřenými okny. Místnost pro výuku byla vytápěna na 17 – 19 °C. Vytápění bylo prováděno kamny. Byl samostatně přiváděn vzduch pro spalování pod podlahou. Proti kamnům byl postaven větrací průduch se 2 klapkami – nad podlahou a pod stropem.

Už z předpisů z konce 18. století a začátku 19. století lze vyčíst, že množství větracího vzduchu na osobu bylo stanoveno pro obecné školy na 10 – 12 m³/h na osobu.

Teprve v pozdější době byly stanoveny násobnosti výměny vzduchu: pro obyčejné místnosti 1,5, pro obecné školy 2 – 2,5 (1/h). Výměna vzduchu pro tělocvičny byla dokonce stanovena na 2 - 4 (1/h).



2.3 Obr. Vytápění učeben parními tělesy s přívodem větracího vzduchu – podle (Srbeč, 1898)

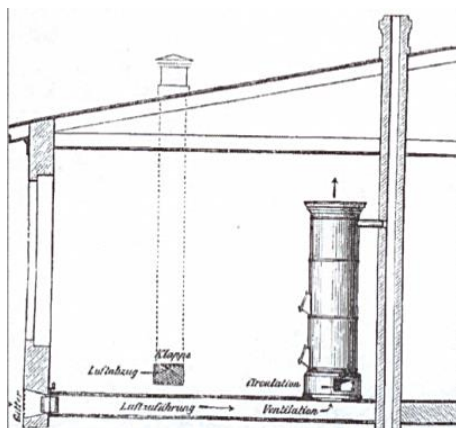
S ohledem na nevýhody teplovzdušného vytápění bylo snahou od sebe systémy vytápění a větrání oddělit. „**Pro dokonalé, na topení nezávislé větrání jest tedy nutno toto oddělit od topení úplně a pro přehřátí vzduchu zřídit zvláštní topné komory.**“ – podle (Kabrhel, 1903)

Systémy vytápění a větrání škol byly v té době vybaveny otopnými tělesy vytápěnými párou (2.3 Obr.) umístěnými v učebnách a přívod větracího vzduchu byl řešen stavebními kanály (šachtami), obdobně jako u teplovzdušného vytápění a větrání s tím rozdílem, že množství vzduchu odpovídalo pouze hygienickému minimu. Předehřátý větrací vzduch byl přiváděn k tělesům, za kterými se směšoval se vzduchem oběhovým a následně byl přiváděn do místnosti. Pro distribuci ohřátého vzduchu sloužila žaluzie umístěná pod stropem místnosti. Každá třída byla vybavena pouze jedním takovým tělesem. Čerpáno z publikace (Zmrhal, 2017).

Podle A. Scholtzeho - autora stavební učebnice z r. 1905 vydané v Lipsku, by se výměna vzduchu ve školách měla řídit i věkem dětí. Pro školní děti by průtok vzduchu na osobu měl být 12 – 15 m³ / h, pro děti na vyšším stupni 15 - 20 m³ / h. Dále se hovoří o potřebné ploše učebny a potřebném objemu místnosti na studenta. Plocha měla být 1 - 1,2 m² a za předpokladu konstrukční výšky místnosti 4 m byl objem 4 - 4,8 m³. Teplota vzduchu ve třídách měla být 16 – 18 °C, výpočtová teplota v učebnách až 18,75 °C a teplota v tělocvičně a na chodbách 5 – 10 °C. Čerpáno z (Mathauserová, 2013).

Zatímco požadavky na teploty v učebnách jsou dnes výrazně jiné, objemové průtoky vzduchu na větrání od těch stanovených na začátku 20. století se tolik neliší.

Za zmínku stojí pokyn z Židovské školy v Jáchymově ulici (2.4 Obr.) : „**Třída musí býti dostatečně větrána, aby školáci neusínali či nebyli myslí mdlé a vzdělávání jim prospívalo k radosti jich i jejich rodičů.**“ – podle (Zmrhal, 2016)



2.4 Obr. Vytápění a větrání v Židovské škole v Jáchymově ulici - (Mathauserová, 2013)

2.4. Návrhové podmínky větrání školních budov v současnosti

Pro návrh systému větrání je nutné vzít v úvahu venkovní i vnitřní návrhové podmínky.

Venkovní podmínky (teplota vzduchu, relativní vlhkost, vítr, sluneční záření apod.) závisí na podnebném pásu, ve kterém se školní budova nachází. Vítr a sluneční záření opět závisí ještě na orientaci každé jednotlivé místnosti ke světovým stranám. Venkovní podmínky značně ovlivňují tepelnou zátěž jednotlivých místností a tedy jejich požadavky na systém.

Některé vnější dopady okolí lze změnit, či aspoň částečně ovlivnit např. stojící automobily čekajících rodičů se zapnutým motorem, kouření cigaret u vchodů do škol nebo u nasávacích fasádních výustek vzduchotechniky.

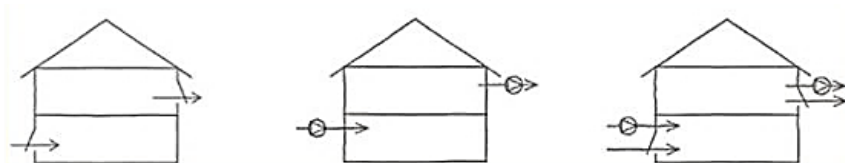
Dalším bodem, který může zlepšit venkovní podmínky je dostatek zeleně. Zeleň má schopnost pohlcovat prachové částice, zchlazovat prostředí odparem vlhkosti, pohlcovat hluk a v neposlední řadě má pozitivní vliv na psychiku člověka.

Vnitřní podmínky se týkají tepelné pohody, kvality vnitřního ovzduší a hluku. Požadavky na tepelný komfort by měly být dnes splněny podle evropských norem. Požadavky stanovují doporučené hodnoty teploty vzduchu v létě a v zimě a relativní vlhkosti vzduchu.

2.5. Systémy větrání ve školách

Obecně se větrání ve školách dělí na přirozené a nucené. K přirozenému větrání patří - větrání okny (provětrávání), infiltrací, větracími šachtami a střešní odvětrávání. Těmito typy přirozeného větrání zpravidla dnes nelze dosáhnout požadované kvality vzduchu ani pohody uživatelů. V některých případech lze použít přirozené větrání jako doplněk k nucenému, pokud je systém navržen na menší výměnu vzduchu na osobu, např. 15 - 18 m³/h na osobu.

Koncepčně je tedy možno větrání ve školních budovách rozdělit na přirozené větrání, nucené větrání a kombinaci obou - hybridní větrání. (2.5 Obr.)



2.5 Obr. Koncepční typy větrání pro školy – schémata – podle (Geier Sonja, 2012)

2.5.1. Systémy nuceného větrání

Obvykle se systémy nuceného větrání skládají pouze z nuceného odvodu znehodnoceného vzduchu, zřídka mívají i nucený přívod čerstvého vzduchu.

Dále existují plně vyvážené systémy s přívodem a odvodem vzduchu. Odvod znehodnoceného vzduchu je většinou zajišťován odsáváním z hygienického zázemí (WC). Ve vyvážených systémech je vzduch přiváděný do místnosti centrálně upravován a často je instalována rekuperace tepla z odpadního vzduchu.

V současné době se nejvíce využívají systémy nuceného větrání se zpětným získáváním tepla (ZZT). Klíčem k dobré kvalitě vnitřního prostředí jsou větrací jednotky s výměníkem ZZT o vysoké účinnosti, dále pak nízká spotřeba elektrické energie potřebná na provoz ventilátorů a správná regulace. Pro nucené větrání se ZZT se používají 3 koncepce větrání: centrální či polocentrální – pro celý objekt nebo úsek budovy, a decentrální – samostatně pro jednotlivé učebny. (Hazucha, a další, 2014)

Centrální systém

Přívod venkovního vzduchu nasáváním do centrální jednotky. Centrální větrací jednotka, která může mít funkci ohřevu, chlazení, vlhčení i odvlhčování na požadované hodnoty, přivádí vzduch do větraných tříd. Odvod vzduchu ze tříd potrubím přes ostatní místnosti do technické místnosti s jednotkou. Mezi hlavní výhody patří snadné řešení zvukové izolace, možnost centrální úpravy vlhkosti vzduchu a snadná dostupnost jednotky (za nepřerušeni výuky) pro pravidelnou údržbu – např. pro výměnu filtrů. Pokud vedou vzduchovody chodbami a dalšími okolními místnostmi, pak jsou tyto místnosti automaticky větrány. Dlouhé rozvody ovšem zvedají stavební náklady, zabírají v místnostech kvůli svým dimenzím velkou plochu. K dalším nevýhodám patří především nemožnost regulace systému uživatelem v koncovém místě, nelze jednotku vypnout či otevírat okna v učebně. (Hazucha, a další, 2014)

Semicentrální systém

Čerstvý vzduch je nasáván do centrální jednotky, kde se využívá zpětné získávání tepla (ZZT), dochází k úpravě teploty a vlhkosti vzduchu. Upravený vzduch se distribuuje do jednotlivých zón. V zónách jsou decentrální jednotky, ve kterých jsou umístěny ventilátory a prvky pro dohřev či chlazení. Pomocí decentrální jednotky je odpadní vzduch odváděn do centrální jednotky. Mezi výhody patří možnost individuální regulace v místnostech a možnost centrální úpravy vlhkosti. Mezi nevýhody patří hluk od ventilátorů, které jsou umístěny v zónách a další náklady na decentrální jednotky. (Hazucha, a další, 2014)

Decentrální systém

Čerstvý vzduch je nasáván z fasády do decentrální jednotky, která je uvnitř nebo vně větrané místnosti. V jednotce dojde k úpravám vzduchu a ZZT. Odpadní vzduch je odsáván zpět do jednotky a odváděn ven. Systém je variabilní, je možné použít jednotku pro více místností nebo sdružit nasávání a výfuk vzduchu pro více jednotek. Mezi hlavní výhody patří jednodušší instalace do stávajících objektů a menší nároky na prostor - kratší rozvody a menší dimenze rozvodů nebo žádné rozvody. Mezi nevýhody patří především mnohé zásahy do fasády objektu kvůli nasávání vzduchu, hluk z větrací jednotky a problémy s vlhčením vzduchu. Vzhledem k počtu jednotek v objektu je nákladnější a pracnější údržba než u předchozích systémů. (Hazucha, a další, 2014)

2.5.2. Různé koncepty provozu hybridního větrání ve školách

Podle studie (Ianniello, 2011) je dobrým řešením z hlediska jak počátečních nákladů tak provozních nákladů hybridní větrání s různým provozem, zejména pro rekonstrukce budov s původně navrženým přirozeným větráním. Hybridní větrání umožňuje spojit přirozené větrání se systémy nuceného větrání. Tohoto spojení může být dosaženo například takto:

- Současný provoz, kdy otevíratelná okna a systém nuceného větrání pracují společně v jednom prostoru;
- Střídatý provoz, kdy na základě okrajových podmínek se regulace rozhodne o přepínání, zda bude pracovat systém nuceného větrání nebo bude využito přirozeného větrání;

- Zónový provoz, kdy pro určité okrajové podmínky jsou některé části budovy obsluhovány systémem nuceného větrání a jiné části budovy systémem přirozeného větrání.

Řešením téměř všech zmíněných problémů způsobených nedostatečným přívodem čerstvého vzduchu ve školních budovách se zabývala řada autorů a pozornost jim byla věnována v několika velkých projektech. Cílem je vždy citlivá rekonstrukce škol a instalace nových výkonných systémů větrání, vytápění a chlazení.

Složitou problematikou se zabýval mj. projekt zvaný SchoolVentCool. Soustředili se v něm odborníci z několika evropských univerzit a společně navrhli celostní řešení tzv. integrovaný design pro obnovu stávajících evropských školních budov. Mezi cíle projektu patřilo dosáhnout kvalitního vnitřního prostředí ve školách řešením, které se vyznačuje energetickou účinností a vynikajícími podmínkami pro vyučování a učení za předpokladu zachování stávajících objektů. (Geier Sonja, 2012)

Pro ideální obnovu školních budov byla vyvinuta metodika bodového hodnocení pro různá kritéria. Obnova škol by měla probíhat za široké spolupráce odborníků na TZB, architektů, stavařů a za předpokladu kompromisního řešení. Limitovány byly dodávky energie na vytápění, na ohřev teplé vody, přednostně energií z obnovitelných zdrojů jako jsou např. fotovoltaické panely, dále spotřeba energie v kWh/ m² za rok a instalovaný větrací systém. Oblast větrání budov bylo podle (Geier Sonja, 2012) rozděleno do 4 tříd: žádný systém větrání, částečný systém větrání (odvod odpadního vzduchu), nedostatečně výkonný zastaralý větrací systém a větrací systém s rekuperací tepla.

Ukázalo se, že problémy školních budov jsou obdobné všude v Evropě. V existujících školách je systém přirozeného větrání nadále spíše pravidlem než výjimkou. Větrání je docíleno v podstatě otevíratelnými okny (ručně nebo samočinně strojním systémem). Přívod vzduchu jednotlivými otvory ve fasádě bez předeřevu způsobuje průvan. Z tohoto důvodu bylo doporučeno, aby umístění otvorů umožňovalo proud vzduchu se smíchat a poklesnout před vstupem do uživatelské zóny. Podle (Geier Sonja, 2012) by se měla věnovat pozornost systémům s předeřevem např. otopným tělesům, trubkovým topným výměníkům nebo jednoduše omezit provoz přirozeného větrání pouze na letní období. Posledně jmenované řešení vyžaduje použití systému nuceného větrání během zimního období tak, aby se vytvořil účinně fungující systém smíšeného větrání. Hlavní účelem je zajištění dostatečné kvality vzduchu během vyučování.

Hybridní systémy větrání

Hybridní systémy se skládají ze dvou složek: přirozené a nucené. Systém používá během některých období přirozené síly k vyvětrání učeben. Pokud podmínky nedovolují dostatečné větrání, je zapnut systém nuceného větrání. Nejlepším příkladem by byl systém se samočinně otevíratelnými okny, která jsou dále podpořena ventilátorem znehodnoceného vzduchu, pokud je větrání okny nedostatečné. Systémy mohou být decentrální či centrální. Centrální systémy zajišťují pro celou budovu či zónu v budově, decentrální představují lokální řešení větrání. Přirozené větrání okny je chápáno jako lokální řešení.

Systémy hybridního (smíšeného) větrání, které užívají přirozeného a nuceného větrání nabízejí výhody oddělených systémů. S použitím ventilátorů je kvalita vnitřního ovzduší během vyučování dosaženo, zatímco principy pasivního chlazení jako je např. noční předchlazení nebo provětrávání jsou dodatečně možné. Tyto kombinace umožňují odebrání vnitřní tepelné zátěže bez pomoci robustních systémů. Systémy přirozeného větrání zahrnují také větrání pomocí komínového efektu (vyzděné šachty zajišťující větrání místností). Šachtové větrání bylo v minulosti běžně používané ve školních budovách. (Geier Sonja, 2012)

Pro všechny typy větracích systémů je zásadní kvalita venkovního vzduchu. Kvalita může být snáze kontrolována v systémech nuceného větrání, kde je možné používat speciální filtry, které odstraňují znečištění jako např. prachové částice a ozon. Dosáhnout čištění vzduchu u systémů přirozeného větrání mnohem složitější, přesto existuje několik možností.

Při použití těchto systémů s otevíratelnými okny hraje důležitou roli hluk. Hluk je faktor, který limituje a ovlivňuje použití oken k větrání. Dalším limitujícím faktorem pro otevírání oken je velký rozdíl teplot

uvnitř a venku školní budovy; uživatelé mohou tímto způsobem ovlivnit „studený“ průvan. Podle (Geier Sonja, 2012) mohou příliš velké rychlosti proudění vzduchu stejně jako hluk být problematické, pokud nedojde k přesnému návrhu systému. Systémy nuceného větrání, centrální nebo decentrální, je nutné pravidelně udržovat, např. měnit filtry, servisovat vybavení atd.

Cílem dalšího projektu „Obnovme školu“ bylo zrekonstruovat vybrané školní budovy tak, aby byly ve standardu budov s téměř nulovou spotřebou energie (nZEB – nearly Zero Energy Buildings). Projekt probíhal v několika evropských zemích (např. Norsko, Německo, Rakousko a Itálie), jak ze severu, tak z jihu během let 2015 – 2017. Pro úpravu větrání škol bylo doporučeno strojní větrání s ZZT, kdy množství větracího vzduchu bylo regulováno podle koncentrace CO₂. Některé z budov využívaly princip nočního předvětrání. Jediná škola v Itálii měla větrání řešeno pouze otevíratelnými okny, kdy žáci byli instruováni o ručním řešení větrání - otvírání oken - na jednoměsíčním školení. (Renew School Project, 2017), (AEE – Institute of Sustainable Technologies: Anna Maria Fulterer, Armin Knotzer, David Venus, 2017)

Projekt EULEB – “Evropské nízkoenergetické budovy o vysoké kvalitě” poskytuje informace o stávajících budovách nerezidenčního charakteru (nízkoenergetických) a tedy i školních po celé Evropě. Projekt poskytuje data o hodnocení kvality prostředí a podrobné popisy speciálních prvků v 25 evropských budovách, které jsou užívány. Tyto speciální prvky se týkají větrání, osvětlení, materiálů a obnovitelných zdrojů energie použitých v těchto budovách. (MÜLLER, a další, 2006)

2.5.3. Certifikace SB Tool CZ pro školní budovy

Je důležitý vztah VP a certifikace budov. V ČR byla vyvinuta metodika SB Tool CZ. Jejím cílem je postihnout kvality stavby, které nejsou zahrnuty v platných normách a předpisech, jsou tzv. měkkými kritérii s širším společenským dopadem. Pro školní budovy hraje také významnější úlohu kvalita z hlediska sociálních aspektů. Mezi aspekty, které jsou pro školní budovy definovány, patří také tepelná pohoda a kvalita vnitřního vzduchu. (Tencar, a další, 2017)

Hodnocení tepelné pohody a kvality vnitřního ovzduší se soustředí na bodové hodnocení komfortu, výbavu větracích systémů, údržbu větracích systémů a principu řešení větrání.

2.6. Školní budovy a podnebí

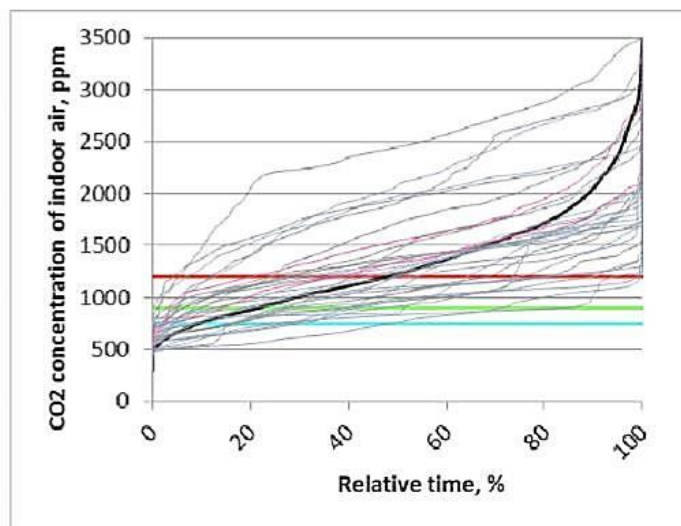
Podnebí, jak už bylo řečeno, hraje podstatnou roli při stavbě nových školních objektů, kdy by se vždy měla vzít v úvahu charakteristika podnebí v daném místě a jí odpovídající provoz budov – zda jsou všechny budovy a místnosti užívány v průběhu celého roku nebo nikoliv. Pro zimní období by se mělo zamezit zbytečným tepelným ztrátám a v letním období zbytečné tepelné zátěži.

V jižní Evropě se školní zařízení obvykle používají od září do června. Během července a srpna jsou školy zavřené nebo je jejich provoz značně omezen. V zemích s mírným klimatem se školní budovy používají i v létě, ale podnebí není výrazně teplé, takže se systémy nenavrhují jako klimatizační. Z toho důvodu se systémy TZB navrhují pouze pro vytápění a větrání bez letního chlazení, které se navrhuje pouze výjimečně. S oteplováním v našich zeměpisných šířkách se hodnocení tohoto problému mění i u nás.

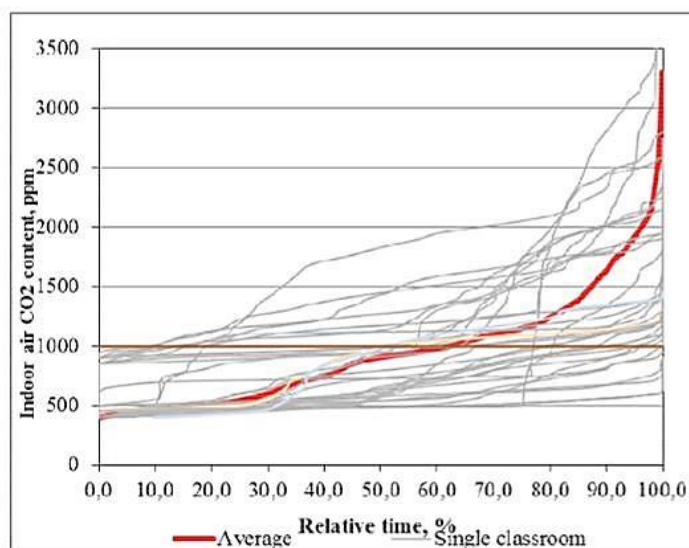
Nalezená řešení přirozeného větrání a hybridního větrání zohledňují klimatické podmínky. Na severu Evropy je vzduch nutno efektivně předehtivát před vstupem do vnitřního prostředí, zatímco na jihu především předchlazovat. Pro ČR je vzhledem ke klimatické změně začít uvažovat také o předchlazování, předehtivání vzduchu je nutnost v zimě.

2.6.1. Větrání školních budov v Estonsku

Studie spotřeby energie v několika renovovaných školách v Talinu v Estonsku ukázala, že úprava vytápění budov uspokojila požadavky na tepelnou pohodu ve všech 48 sledovaných učebnách, ale nedostatečná výměna vzduchu se špatně nadimenzovaným strojním větráním vedla ke zvýšení koncentrací CO₂, v části učeben překračující zdravotní limity i několikanásobně, jak ukazují křivky na (2.6 a 2.7 Obr.). Větrání bylo podceněno a systém je třeba revidovat. (Koiv, 2014)



2.6 Obr. Kumulativní koncentrace CO₂ v třídách střední školy (Estonsko) - (Koiv, 2014)



2.7 Obr. Kumulativní koncentrace CO₂ v třídách základní školy (Estonsko) - (Koiv, 2014)

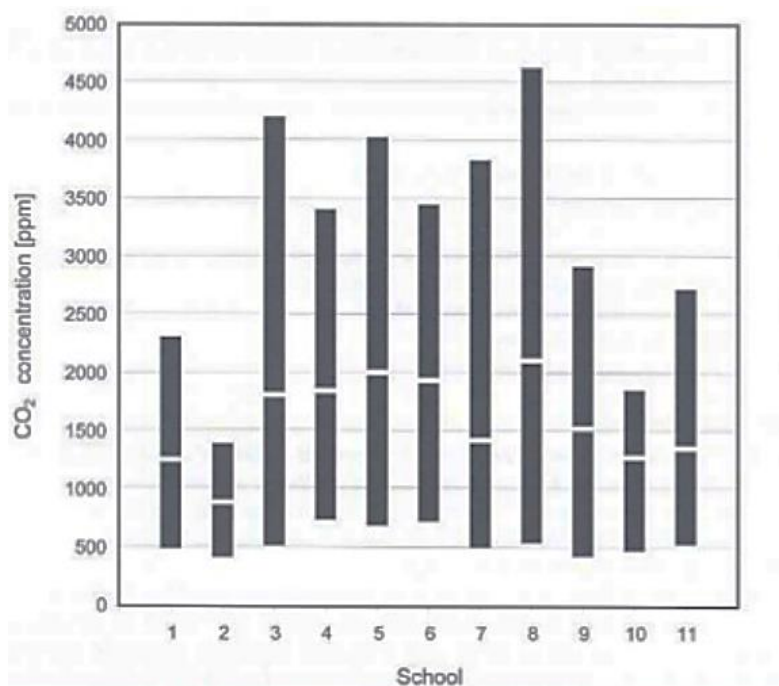
2.6.2. Větrání škol v Nizozemí

Z roku 2005 pochází následující graf monitorování situace v nizozemských školách (2.8 Obr.). Ze zkušenosti posledních deseti let, kdy byly budovány tzv. energeticky udržitelné školy, a byly silně izolovány až do pasivního standardu. Vzhledem k situaci se v následujících letech začal prosazovat větší důraz na větrání a na spotřebu energie v budovách.

Situace po roce 2010 v Nizozemí

Dalším krokem v Nizozemí bude navrhovat takové školy, které produkují více energie, než samy vyrábějí. V roce 2011 byla první takováto energeticky plusová škola vystavěna. Vyhodnocení kvality vnitřního ovzduší a tepelného komfortu a dalších dvou škol postavených v pasivním standardu bylo provedeno pomocí měření (2.9 Obr.) a dotazníkového průzkumu (školy A, B, C). Výsledky byly porovnány s výsledky 2 předchozích studií pojednávajících o energeticky efektivních školních budovách (celkem 8), a se studií, která prozkoumávala 12 školních budov postavených tradičnějším způsobem. Toto porovnání umožnilo dát do souvislosti nové udržitelné školní budovy s tradičnějšími budovami. Bylo prokázáno, že nejnovější udržitelné školy byly v průměru lepší než ty dříve navržené

udržitelné školy, ale ne lepší než nedávno tradičně navržené školy. Závěrem studie podle (Zeiler, a další, 2013) je, že by navrhování vnitřního prostředí školních budov pro energeticky efektivní budovy měla být věnována větší pozornost.



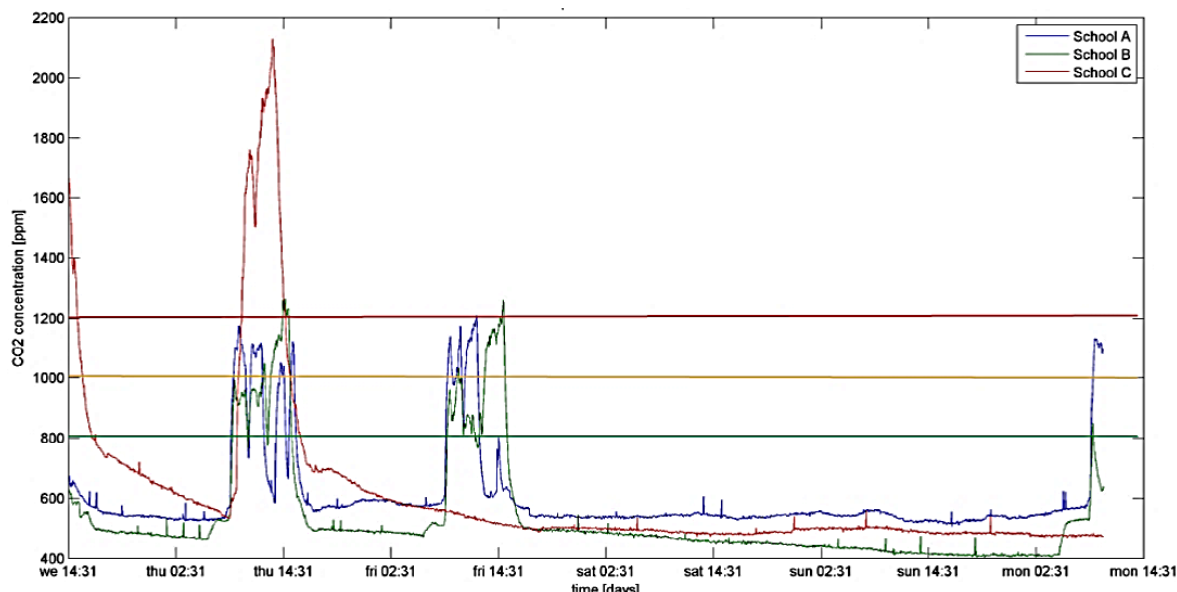
2.8 Obr. Průměrná, maximální a minimální koncentrace CO₂ v 11 základních školách v Nizozemí (Dijken, 2005)

Škola A: první škola v pasivním standardu z Nizozemí, rok výstavby 2012, řešení větrání – nucené větrání, textilní rozvody vzduchu, teplovzdušné vytápění – modrá barva v grafu (2.9 Obr.)

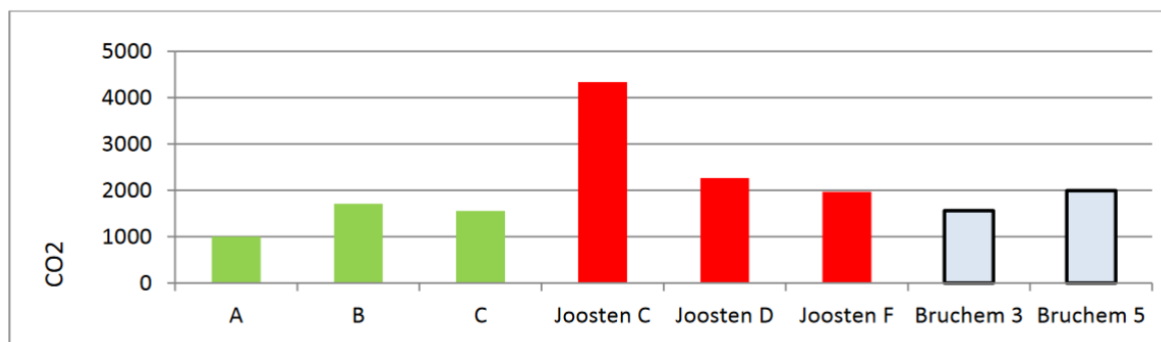
Škola B: škola vybudovaná podle pasivního standardu, rok výstavby 2011, řešení větrání – nucené větrání, teplovzdušné vytápění + podlahové nízkoteplotní vytápění – zelená barva v grafu (2.9 Obr.)

Škola C: první neutrální škola z hlediska CO₂ v Nizozemí, rok výstavby 2010, řešení větrání – nucené větrání, podlahové vytápění - červená barva v grafu (2.9 Obr.)

K porovnání bylo použito starších studií podle Jostema a van Bruchema (2.10 Obr.). Celkovým závěrem týkajícím se IAQ v budovách bylo, že nově postavené školní budovy nemají žádoucí kvalitu vnitřního prostředí, jak bylo uvedeno v požadavcích a jak bylo předpokládáno během fáze návrhu budovy navzdory tomu, že byly postaveny se zaměřením na vysokou udržitelnost a na vysokou kvalitu vnitřního ovzduší.



2.9 Obr. Porovnání koncentrací CO₂ ve 3 sledovaných školách - Nizozemí - (Zeiler, a další, 2013)



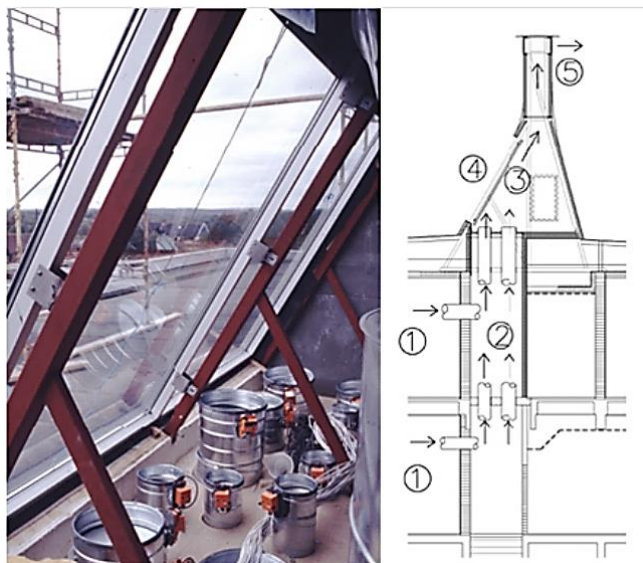
2.10 Obr. Normalizovaná koncentrace CO₂ vybraných škol v Nizozemí - (Zeiler, a další, 2013)

2.6.3. Větrání budovy školy ve Falkenbergu, Švédsko

Ukázku zajímavého řešení větrání s využitím solárního komínu představuje škola ve Švédsku. Hlavním principem větrání budovy B je pasivní komínové větrání. Pokud komínový efekt nezajišťuje dostatečný rozdíl tlaků, ventilátory zajistí jeho dostatečný rozdíl. Venkovní vzduch je přiveden do místností několika přívody umístěnými pod okny ve venkovních stěnách ve tvaru mřížek. V těchto přívodních částech jsou umístěny konvektory k předehřívání venkovního vzduchu. Znečištěný vzduch je odváděn prvky pod stropem (umístěnými na druhé straně tříd) do stoupacích částí potrubí. Klapky jsou umístěny v potrubí na přívodech i odvodech vzduchu do každé místnosti tak, aby byla umožněna regulace průtoku vzduchu pro každou třídu samostatně. Aby se zabránilo otočení proudění vzduchu, mají všechny třídy přívody proudění vzduchu proti hlavnímu směru proudění větru.

Obrázek (2.11 Obr.) ukazuje vnitřní část jednoho ze solárních komínů. Za sklem jsou umístěny desky absorbéru vyrobené z vlnité oceli. Čísla na schématu popisují následující proudění vzduchu:

- 1) Vzduch stoupá šachtami nahoru z důvodu komínového efektu.
- 2) Vzduch vstupuje do solárního komína (2.12 Obr.).
- 3) Vzduch je ohříván v solárních kolektorech, což zvyšuje komínový efekt.
- 4) Vzduch stoupá solárním komínem do exteriéru.



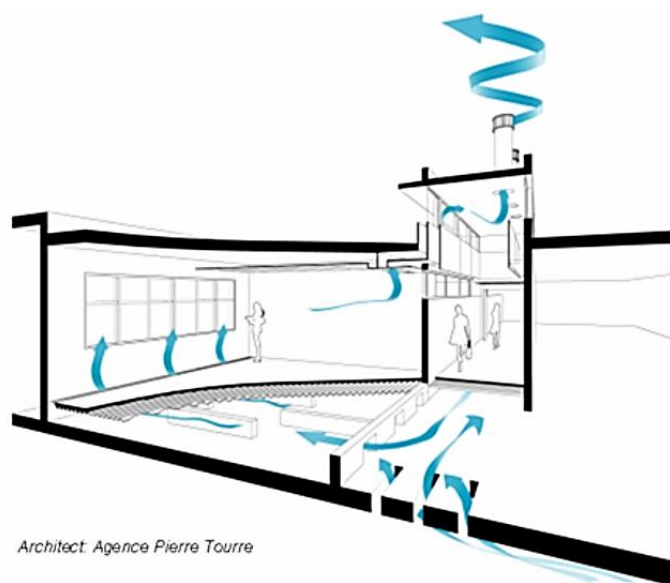
2.11 Obr. Schéma vnitřní části solárního komínu s prouděním vzduchu v budově B školy Tanga, Švédsko - (MÜLLER, 2006 - 2)



2.12 Obr. Pohled na budovu školy Tanga se solárními komíny - (MÜLLER, 2006 -3)

2.6.4. Větrání budovy střední školy v St. Clément de Rivière, Francie

Učebny střední školy jsou větrané systémem přirozeného větrání. Čerstvý vzduch prochází pod deskou betonovou podlahy, kde je zastíněný prostor. Z tohoto prostoru je vzduch do třídy přiváděn kovovou mřížkou v podlaze u oken. Přiváděný vzduch je studený a ohřívá se prouděním v učebně, kde stoupá ke stropu a je odváděn potrubím do větracího komína (2.13 Obr.). Regulace průtoku vzduchu je umožněna pomocí klapky a malého ventilátoru, které jsou umístěné v horní části komína. Důsledkem těchto opatření jsou nižší teploty v interiéru, které zůstávají o 3 až 6 °C nižší než jsou teploty v exteriéru.

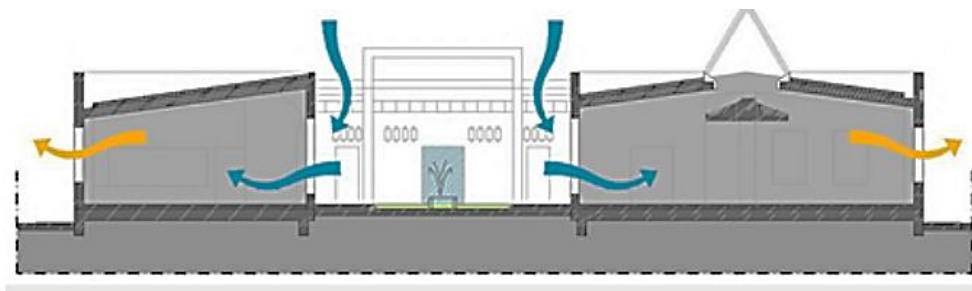


Architect: Agence Pierre Toure

2.13 Obr. Příklad řešení větrání třídy střední školy ve Francii pomocí architektonických úprav (MÜLLER, 2006-4)

2.6.5. Větrání zvláštní školy v Seville a účinek vnitřního dvoru (patia) na komfort uživatelů

Přirozené větrání je jedna z hlavních možností, jak ovlivňovat komfort v budovách během letních venkovních podmínek v teplém španělském klimatu. Pro zlepšení větrání jsou místnosti umístěny kolem dvou vnitřních dvorů (2.14 Obr.). Zde vlhkost a teplota vzduchu umožňují čerstvému vzduchu proudit do vnitřních prostor. V důsledku tohoto proudění dochází ke zlepšení tepelného komfortu uživatelů a kvality vnitřního ovzduší, protože proudění vstupujícího čerstvého vzduchu zajišťuje pohyb vzduchu již přítomného v místnosti. Sluneční záření v létě do vnitřních dvorků musí být omezeno tak, aby byly v okamžiku, kdy je slunce v nadhlavníku, tyto plochy dvorků zakryty. (MÜLLER, 2006)

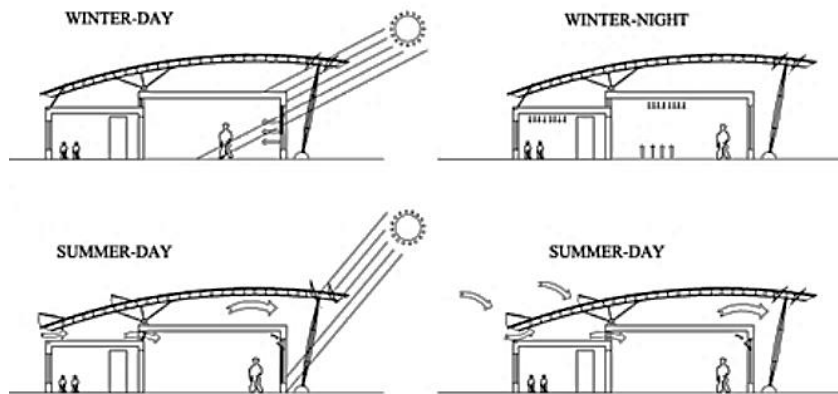


2.14 Obr. Větrání objektu zvláštní školy v Seville – řez (MÜLLER, 2006)

2.6.6. Větrání základní školy pro letní a zimní podmínky v Empoli, Itálie

Přirozené větrání je zajišťováno mnoha otvory orientovanými na jižní a severní stranu (2.15 Obr.). Během zimního dne zajišťují ovládání přirozeného větrání „inteligentní okna“ spolu s výměníkem tepla, kterým prochází vzduch, a okenními otvory umístěnými vysoko na stěně místnosti. Střecha je odvětrávaná a dvojité: její první část tvoří dutá deska a druhá část střechy je tvořena ocelovou konstrukcí s hliníkovými panely. Vzduch proudí ze severu na jih a také odvětrává učebny z okenního otvoru umístěného v horní části stěny dané místnosti. Na jižní straně střechy jsou umístěna pohyblivá zařízení ke stínění, která zlepšují pohyb vzduchu a stíní jižní fasádu. Na severní straně jsou pohyblivé otvory, které umožňují pohyb vzduchu mezi dvěma částmi střechy.

BIOCLIMATIC STRATEGIES

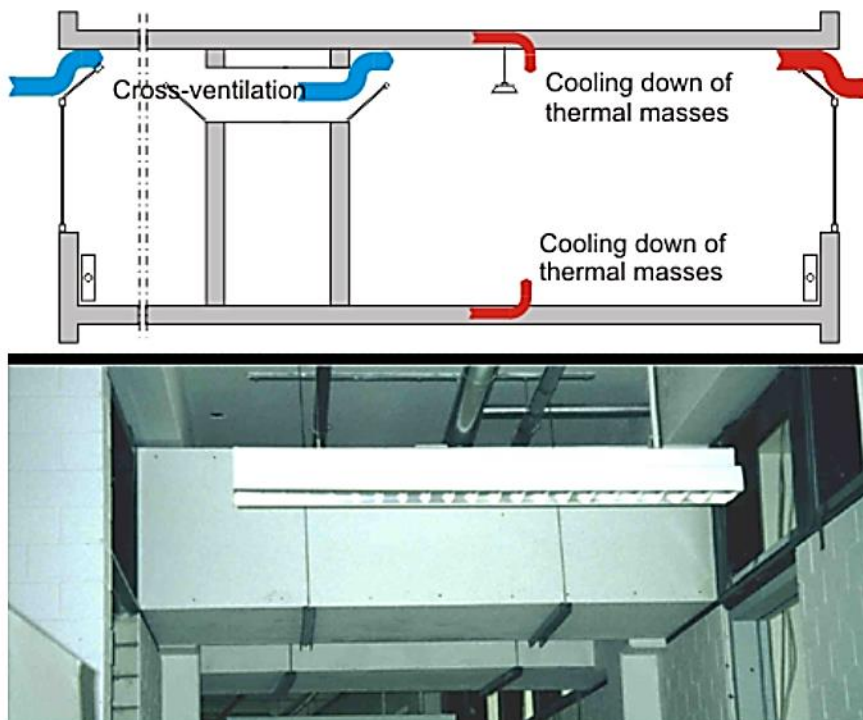


2.15 Obr. Schéma řešení větrání pro letní a zimní podmínky základní školy v Empoli – (MÜLLER, 2015-01)

2.6.7. Větrání posluchárny vysoké školy v Německu

Menší učebny jsou přirozeně větrány otevíratelnými okny. V letním provozu je během noci docíleno provětrávání mezi jednotlivými fasádami tak, že jsou otevřeny větrací šachty mezi chodbami a třídami a ve třídách jsou vysoko na stěnách otevřena okna (2.16 Obr.). Hlavním činitelem, které zajišťuje větrání, je tedy rozdíl tlaků na fasádách.

Ve velké posluchárně je větrání zajištěno strojním systémem VAV (Variable Air Volume), který je regulován podle koncentrace CO₂.



2.16 Obr. Větrání třídy vysoké školy Rhein- Sieg (MÜLLER, 2015-01)

2.6.8. Větrání budovy základní školy v Norsku

Větrací komory jsou definovány jako prostory v budovách, které jsou určeny pro distribuci větracího vzduchu, sběr tohoto vzduchu a jeho dopravu. Jedním z příkladů použití větracích komor ve školních budovách je odváděcí větrací komora základní školy Medie v Grongu (2.17 Obr.). Znehodnocený vzduch z učeben je veden do této komory společně pro několik učeben. Odváděcí vzduchová komora byla navržena tak, aby napomáhala pohybu vzduchu a zlepšovala podmínky denního osvětlení v

učebnách (2.18 Obr.). Vzduch je dále odváděn z komory skleněnou věží, jejíž stěny poskytují učebnám přirozené denní osvětlení.

Vestavěné potrubí v zemi

Pro případ potrubí vestavěného do země je značná část jeho povrchu obklopena zeminou. To dává potrubí možnost využít teplo akumulované ve stěnách potrubí a v okolní zemině pro pasivní vytápění a chlazení. Běžně se tato potrubí používají pro přívod vzduchu. Základní škola v Grongu v Norsku je typickým využitím vestavěného potrubí v moderní budově, která je umístěna v relativně chladném klimatu, kdy návrhové teploty jsou - 23 °C pro zimní podmínky a + 23 °C pro letní podmínky. (Kleiven, 2003)

Během zimního období, kdy jsou venkovní teploty nízké, přívodní potrubí přispívá k předeřevu větracího vzduchu kvůli relativně teplejší zemi. V letním období využívá potrubí v zemi nízkou hodnotu citelného tepla okolní zeminy (ve srovnání s venkovní teplotou) k předchlazení přiváděného vzduchu. (Kleiven, 2003)

Chladicí účinek potrubí vestavěného v zemi vysvětluje důvod využití těchto systémů v oblastech horkých suchých klimát, zejména v zemích v okolí Perského zálivu, kdy toto potrubí bylo často kombinované s větrací věží. V těchto tradičních potrubích byl vzduch chlazen účinkem citelného nebo často také výparného tepla.

Systém větrání budov je navržen tak, že používá vzlaku jako hlavní hnací síly. Čistý venkovní vzduch vstupuje do budovy přívodní věží a vestavěnou větrací distribuční komorou, která je včleněna pod hlavní komunikaci budovy. Znehodnocený vzduch je odváděn komorou umístěnou nad hlavní komunikací budovy a odváděn odváděcí věží umístěnou ve středu budovy. (Kleiven, 2003)



2.17 Pohled na přívodní (v popředí) a odvodní větrnou větrací věž základní školy Media v Grongu, Norsko - (Kleiven, 2003)

Účinné využití čerstvého vzduchu v místnostech větraných výtlačnou ventilací je dosaženo využitím vlastností zdrojů tepla, které jsou zdrojem konvekčního termického proudění. Čerstvý vzduch z úrovně podlahy je strháván do konvekčního proudu kolem uživatelů (studentů) a stoupá nahoru konvekční do dýchací zóny. Tělesné pachy, teplo a produkty spalování z metabolického procesu jsou ve stejném procesu transportovány směrem nahoru, z dýchací zóny, do horní zóny místnosti, kde jsou vypouštěny motorizovanými klapkami do odváděcí komory (2.18 Obr.).

Použitý a znečištěný vzduch je dopravován vodorovně odváděcí komorou a odsáván odvodní věží, která je umístěna uprostřed budovy. Věž, která zdokonaluje komínový efekt přidáním výšky mezi vstupní částí a výstupní částí, je navržena tak, aby využívala působení větru k odsávání vzduchu z věže. Věž ve tvaru trojúhelníku má nastavitelné klapky na každé ze tří stran, které lze otevírat nebo zavírat v závislosti na působícím směru větru. Odtahový ventilátor je nainstalován v horní části odváděcí věže 2.19 Obr. vlevo.



2.18 Obr. Motorizovaná skleněná dvířka v okenním otvoru (zakroužkovaná část) umožňují proudění vzduchu ze tříd do odvodního prostoru (uprostřed). Ventilátor je umístěn vysoko v odváděcí věži (vpravo) - (Kleiven, 2003)

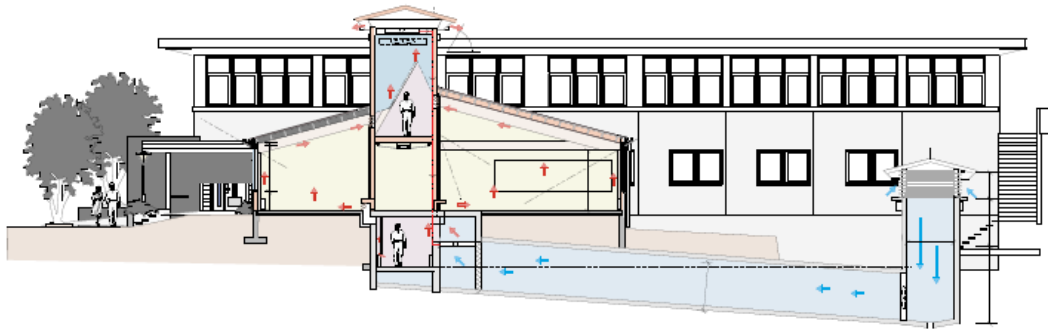
Lokální meteostanice na místě plynule dodává data do systému řízení budovy (Building Management System). Mezi tato data patří údaje o rychlosti větru, směru větru a venkovní teplotě. Čidla pro měření koncentrace CO₂ a teploty jsou instalována v každé učebně a data z těchto čidel řídí přívod čerstvého vzduchu do různých učeben. Systém zajišťuje větrání řízené podle aktuální potřeby 24 hodin denně. Ventilátory jsou automaticky vypnuty, když jsou úrovně koncentrace CO₂ a hodnoty teploty pod limitními hodnotami a větrání pak řídí pouze přirozené hnací síly, které způsobují nátok hustšího studeného vzduchu a vytlačování lehčího teplejšího. Skleněná dvířka v oknech v odváděcí komoře se nikdy úplně nezavírají, protože v budově by měla být vždy zajištěna určitá výměna vzduchu, aby se odstranily emise ze stavebních materiálů, nábytku atd. Prostory hygienického zázemí a šatny jsou vybaveny přepadovým vzduchem a odpadní vzduch i s metanem je nuceně odváděn z toalet bez jakékoli formy zpětného získávání tepla.



2.19 Obr. Panel filtrů (celkem šest, tři kazety vlevo jsou na tomto obrázku odstraněny) na konci zabudovaného přívodního kanálu (vpravo), tlumiče hluku v distribuční komoře (uprostřed) a odsávací ventilátor v odváděcí věži (vlevo) - (Kleiven, 2003)

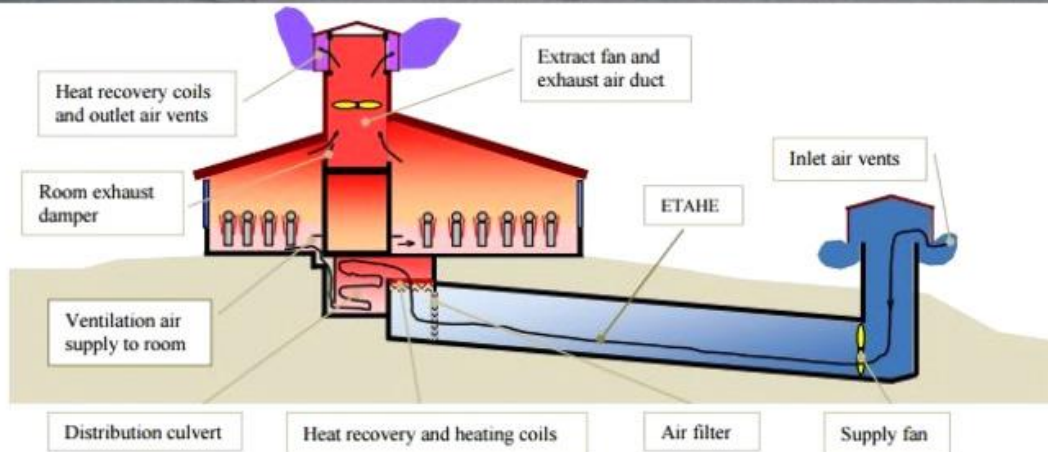
Koncept hybridního větrání zahrnuje systém zpětného získávání tepla. Teplo je získáváno z odpadního vzduchu v odváděcí věži pomocí výměníků tepla. V horní části věže jsou umístěny tři výměníky, jeden na každé ze tří stran věže. Zpětně získaná energie se potom používá k předehřevu přiváděného vzduchu prostřednictvím jiného tepelného výměníku umístěného těsně za jemným vzduchovým filtrem v zabudované distribuční komoře (2.20 a 2.21 Obr.).

Účinnost zpětného získávání tepla byla změřena do 60 %. Vestavěný přívodní vzduchový kanál a distribuční komora také zajišťují předehřev a předchlazení větracího vzduchu v zimním a letním období, respektive ve spojení se zemním chlazením (potrubí v zemi). Zvýšené noční větrání během období přehřívání (extrémních letních podmínek) poskytuje značné množství chladicí energie pro budovu s odhadovaným 12 – ti hodinovým zpožděním. (Kleiven, 2003)



2.20 Obr. Schéma větrání nového křídla základní školy v Grongu, Norsko, (Kåre Herstad, Letnes Architects, 1998)

Hnací síla představovaná horkým vzduchem v odváděcí komoře snižuje potřebu energie hnacího ventilátoru. To je obzvláště důležité v letních podmínkách, kdy se pro chlazení budovy používají zvýšené rychlosti proudění větracího vzduchu spolu s využitím akumulace do stěn a nočního chlazení. Chlazení lze také dosáhnout provětráváním pomocí otevřených oken a větracích otvorů. (Kleiven, 2003)



2.21 Obr. pohled na větrací komory základní školy ze zadní strany a schéma větrání školní budovy v Grongu, Norsko s umístěním ventilátorů, klapek a přívodních a odvodních otvorů - (Chenari, a další, 2016)

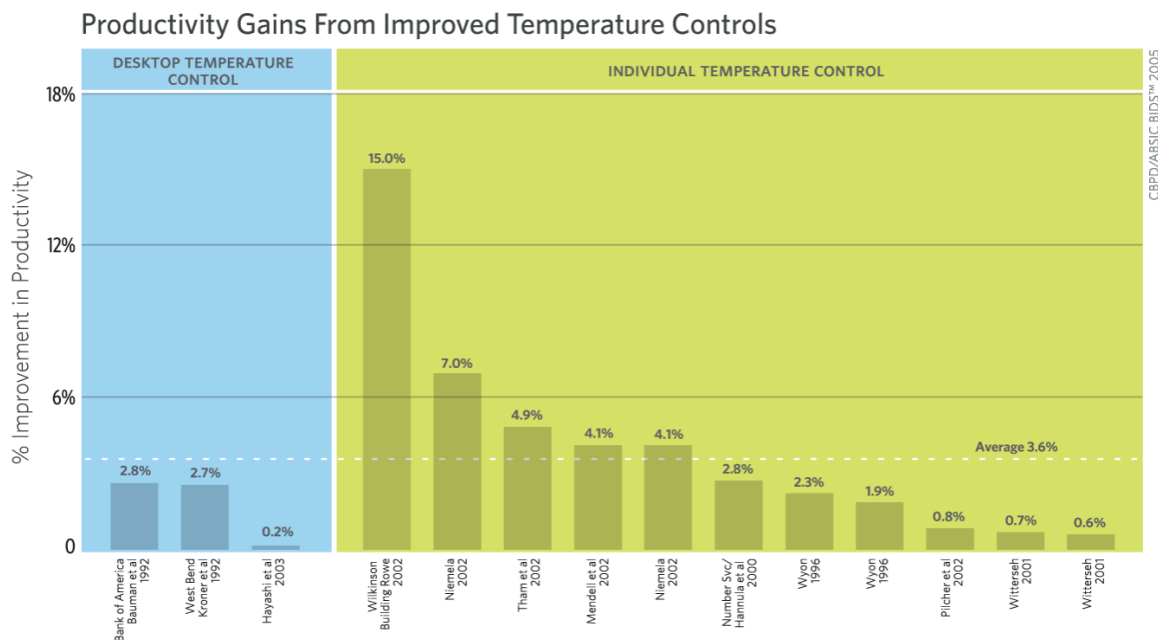
2.6.9. Stav ve Spojených státech amerických (USA)

V USA je hlavním cílem snah snížit spotřebu energie a zároveň dodržet kvalitu VP ve školních budovách.

Pro tento účel byl vytvořen průvodce pokročilým energetickým navrhováním pro stavbu nových školních budov za použití stávajících norem ANSI / IESNA / ASHRAE 90.1-1999. Obsahuje doporučení pro budování nových škol, které jsou o 30% energeticky účinnější než budovy postavené podle současných průmyslových norem při dodržení kvalitního vnitřního prostředí. (ASHRAE, 2016)

Energetické úspory a vnitřní prostředí

Lepší prostředí, které zahrnuje příznivé osvětlení a snížený hluk, může pomoci studentům lépe se učit (2.22 Obr.). V mnoha případech vede vylepšení těchto parametrů také ke snížení spotřeby energie budovy. Ve studii Katse (Kats, 2006) Udělejme školní budovy zelenými: Náklady a přínosy, autor dokládá 17 studií, které ukazují, že produktivita učení vzrostla o více než 25% za zlepšené kvality vnitřního ovzduší, akusticky vhodně navrženého vnitřního prostředí a vysoce výkonných systémů osvětlení.



2.22 Obr. Vliv možnosti ovládat teplotu na produktivitu (Kats, 2006)

Zdokonalené energeticky účinné systémy vytápění a chlazení poskytují tepelný komfort a jsou tiché. To vytváří klidnější, pohodlnější a produktivnější prostory. Různé studie ukazují, že vystavení hluku - dokonce i mírné úrovni okolního hluku - negativně ovlivňuje výsledky vzdělávání. Dopad na učení je zvětšen pro mladší děti. Zdokonalené, energeticky účinné systémy vytápění a chlazení vytvářejí čistší, zdravější vnitřní prostředí, které snižuje počet nepřítomností u studentů a pracovníků, a delší zaměstnávání učitelů. To se projevuje vyššími výsledky v testech a nižšími náklady na zaměstnance. Například Škola Ash Creek Intermediate v Oregonu snížila záškoláctví (dobrovolnou absenci) oproti předchozímu zařízení o 15%. (Kats, 2006)

Dosažení úspor energie

Vybudování nové školy, která by splnila nebo překročila cíl úspor energie ve výši 30%, není obtížné, ale vyžaduje to podrobnější úvahy odborníků, kteří budovu navrhují. Škola se musí zavázat ke spolupráci na kvalitním provozování budovy. Dále se musí také zajistit, aby byla budova postavena tak, jak byla navržena, a aby zaměstnanci byli vyškoleni k řádnému provozu energetických systémů.

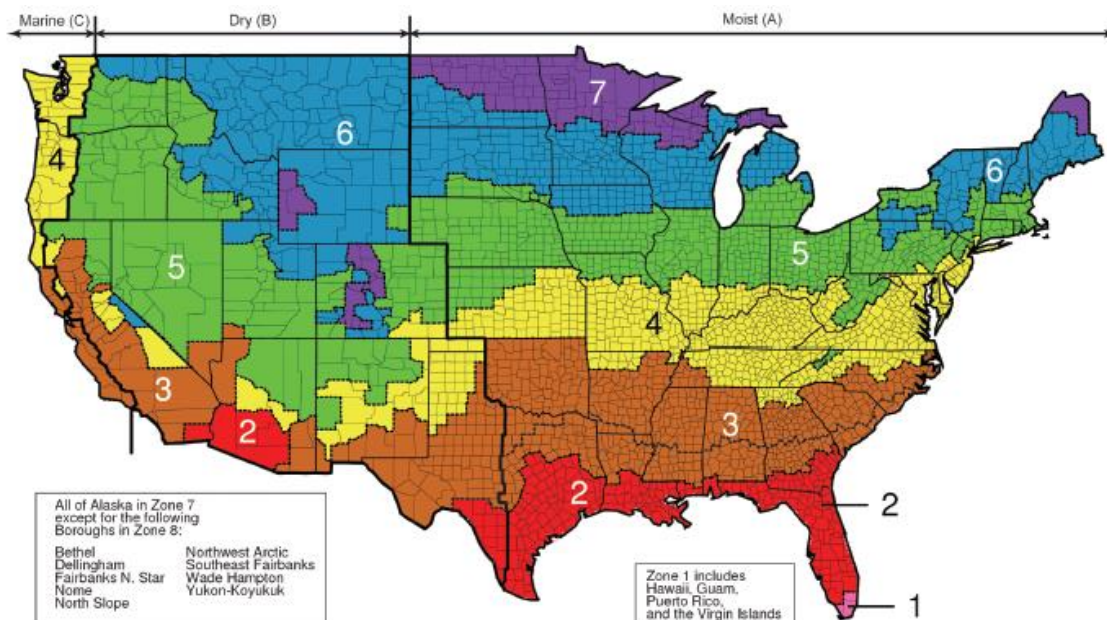
Příručka platí pro budovy s administrativními a kancelářskými prostory, učebnami, chodbami, toaletami, tělocvičnami, montážní prostory, prostory pro přípravu potravin a vyhrazené prostory, jako jsou mediální centra a vědecké laboratoře. Je primárně určena pro nové budovy, ale může být stejně použitelná pro rekonstrukce, přestavby a modernizace projektů.

Součástí příručky jsou doporučení pro návrh pláště budovy; fenestrace; osvětlovacích systémů (včetně elektrických světel a denního osvětlení); vytápění, větrání a klimatizačních systémů; automatizace a řízení budov; ošetření venkovním vzduchem; ohřevu užitkové vody.

Příručka navíc nemá nahradit systémy hodnocení budov ani další studie, které se zabývají celou škálou udržitelných otázek ve školách, jako je akustika, produktivita, kvalita vnitřního ovzduší (IAQ), a

další. Tato příručka neříká, jak navrhovat školní budovy, ale předpokládá zkušenosti a odborné dovednosti v tomto navrhování. (ASHRAE, Inc., 2008)

Příručka rozděluje budovy do 8 klimatických zón a dále podrobně uvádí doporučení pro jednotlivé zóny (2:23 Obr.).



2.23 Obr. Mapa klimatických zón USA podle (ASHRAE, 2016)

Pro každou zónu jsou navrženy postupy, jak navrhovat obálku budovy, jak si poradit se střešní konstrukcí, podlahami, otvory apod.

Prototypy školních budov

Jako základ byly vyvinuty tři návrhy prototypů škol s různými obálkami budov, různou konfigurací osvětlení a energetických systémů budov a analyzovány pomocí hodinových simulací budov v osmi klimatických zónách (Tab. 2-2).

Příklad školy v Alder Creeku, USA

Ukázková školní budova je přehlídkou vysoce výkonných stavebních strategií, včetně řešení denního osvětlení, energetické účinnosti, zdravé IAQ, správné akustiky, udržitelných materiálů, snižování odpadu, preventivní údržby, ochrany lokality a ochrany vod (Tab. 2-3). V opatřeních pro úspory energie nejsou uvedena čidla CO₂ v učebnách, ale pouze v jídelně a tělocvičně.

Doporučení pro školní budovy v USA

Ze seznamu návrhů uvádím jako ukázkou doporučení pro okenní otvory.

Otevíratelná / neotevíratelná okna (Doporučení pro všechny klimatické zóny)

Otevíratelná okna nabízejí výhodu osobního komfortního ovládání a příznivého propojení s okolním prostorem. Individuální ovládání oken, které není v souladu s nastavením a požadavky energetických systémů budovy, však může mít extrémní dopad na spotřebu energie těchto systémů. Energeticky efektivní budovy s otevíratelnými okny by měly usilovat o vysokou úroveň integrace mezi návrhem obálky budovy a energetických systémů. Obálka by měla být navržena tak, aby plně využila možnosti přirozeného větrání s dobře umístěnými otevíratelnými otvory. Systém nuceného větrání by měl být vzájemně propojen s otevíratelnými okny, aby byla zajištěna vazba k vypnutí systému v dané zóně

během doby, kdy je okno otevřeno. Návrh zón s otevíratelným oknem a vazbou na větrací systém a systém vytápění by měl korespondovat se zónou, kterou větrací a vytápěcí systém obsluhuje.

2-2 Tab. Návrhové místnosti prototypu školní budovy (ASHRAE, 2016)

Space Types	Elementary	Middle	High
Classrooms	x	x	x
Library	x	x	x
Media center	x	x	x
Computer lab	x	x	x
Science lab		x	x
Music	x	x	x
Arts/crafts	x	x	x
Multipurpose room	x		x
Auditorium/theater			x
Special ed/resource	x	x	x
Gymnasium		x	x
Auxiliary gymnasium			x
Offices	x	x	x
Infirmery/clinic	x	x	x
Cafeteria	x	x	x
Kitchen	x	x	x
Hall lockers		x	x

2-3 Tab. Opatření k úspoře energií v budově školy Alder Creek (ASHRAE, 2016)

Energy Saving Measures	Description	Tips
Envelope		
Building Orientation	Long east-west axis	DL9
Opaque Components	Roof and walls R-19; cool roof	EN1, EN3, EN7
Vertical Glazing	Low-e	EN19
Lighting		
Lighting Systems Used	T5 direct/indirect in classrooms and offices; T5 HO in gym; T8 in all other areas	EL2-3
Controls	Sensor on row of lights near windows; Room occupancy sensors	EL6
Daylighting		
Window Design	Low-e with dual glazing	DL1-4
Controls	Blinds inside windows act as light shelves	DL12
Skylights	Located in stairwells in classroom wing	
HVAC		
Equipment	GSHPs	HV2
Boilers	Backup and peak use only	HV26
SWH	Dedicated domestic boiler for hot water	WH1-2
System Controls		
Measurement and Verification	EMCS system used district wide	HV23
Temperature Control	Individual room controls with a 5° limit on user control	
CO ₂ Sensors	Used in gym and cafeteria	
Additional Savings		
Computers	ENERGY STAR features enabled	AS2
Exterior/Field/Parking Lot Lighting	Metal halide lamps	EX1-3
Energy Use Characteristics		
Simulated Energy Use	25% below Title 24 in California	
Measured Energy Use	54 kBtu/ft ² -yr	
Years of Measured Data	2.75 years	

2.7. Přehled současného stavu v ČR

V České republice převažují 2 typy školních budov podle doby vzniku, a to sice z dob Rakouska – Uherska a pak z 2. poloviny 20. století. V ČR nejsou dostupné dostatečné finance na jednorázovou komplexní obnovu všech těchto budov.

V okolních státech se obdobná situace řeší tím, že existuje soustava instruktáží a školení, jak předcházet extrémně nepříznivému stavu vnitřního prostředí (vysoké koncentrace škodlivin), pokud školní budova nemá nucený systém větrání. Organizační řád předepisuje (studentům a učitelům), jak udržovat vnitřní podmínky během dne přijatelné (konkrétní intervaly větrání.)

Kvalitu vnitřního prostředí ve školách v České republice řeší především Ministerstvo zdravotnictví ČR. Budovy z konce 19. století, které jsou chápány jako památky, vyžadují respekt k původní architektuře. Jejich výhodou jsou cihelné nosné konstrukce, které jsou hmotné a mají tak větší akumulaci schopnost. Konstrukční výšky učeben jsou vyšší, tudíž větší jsou i objemy místností. Ke znečištění vnitřního ovzduší zde dochází po delší době než u novějších budov. Naopak pro vytápění větších objemů místností jsou potřeba vyšší výkony a náklady na vytápění jsou tedy vyšší.

Jak ukazují zkušenosti z provozu a závěry výzkumu u nás i ostatních států Evropy úpravy, potřebují i novější budovy z 2. poloviny 20. století, protože vyjma jiných měřítek nevyhovují z hlediska trendu úspor energie.

2.7.1. Souhrn současných problémů vnitřního prostředí školních budov ve vztahu k použitému systému větrání

V souvislosti se státními příspěvky a programy podpory došlo k zateplování fasád budov, výměně oken za okna těsnější, aby se snížila spotřeba energie na vytápění. Důsledkem bylo utěsnění obálky budovy, která zůstává téměř neprodyšná. Ve vnitřním prostředí dochází k vysoké produkci škodlivin žáky, která není odvětrávána infiltrací. Infiltrace je velmi malá až zanedbatelná, výměna vzduchu je nedostatečná. O přestávkách také není zajištěno větrání, protože okna se z bezpečnostních důvodů nesmějí otvírat. Větrací systém s rekuperací má zabránit zbytečným tepelným ztrátám, které vzniknou právě otevřením okna. Novým trendem je tedy instalovat systémy nuceného větrání do školních budov či jejich levnější varianty – větrací jednotky a rekuperační jednotky.

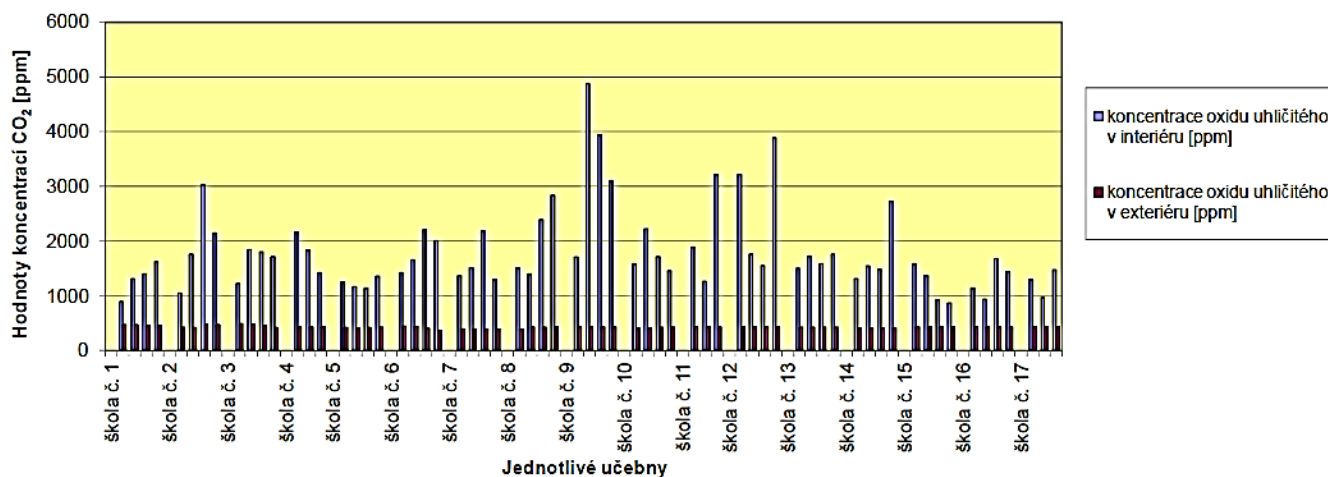
Výsledky měření koncentrace CO₂ v 17 školách

Na základě snah o zmapování stavu vnitřního prostředí ve školních budovách v ČR byly vybrány budovy tak, aby vystihovaly fond budov v ČR. Měření koncentrací CO₂ probíhalo celkem v 17 školních zařízeních, v každém z nich byly měření podrobeny 4 učebny.

Výsledný souhrnný graf je na 2.24 Obr., kde jsou uvedeny průměrné koncentrace oxidu uhličitého v exteriéru a interiéru budov. Výsledky ukázaly, že interiérové koncentrace nad 1500 ppm, které jsou nepříjemné, se vyskytují se u 11 škol ze 17 škol. Koncentrace nad 2500 ppm mohou mít nepříznivé vlivy na zdraví a vyskytují se u 6 škol. Obecně výsledky měření dokládají nedostatečnou kvalitu vnitřního ovzduší a nutnost tuto situaci řešit. Měření se věnovala pouze škodlivině CO₂.

Vzhledem k výsledkům měření a předepsaným hygienickým limitům se doporučuje provozovatelům nejen školních budov se zabývat větráním objektů. Doporučeno je zvážení instalace rekuperační jednotky osazené spínacím čidlem CO₂ tak, aby docházelo k řízenému větrání v závislosti na koncentraci CO₂ v místnosti. Tak dojde k omezení nákladů na vytápění a k větrání v době, kdy je to nezbytné. Instalací rekuperace zároveň dojde ke snížení spotřeby energie na vytápění, i když je nutné podotknout, že dojde k mírnému zvýšení spotřeby elektřiny potřebné pro pohon ventilátoru.

Jedná se o v ČR neřešený problém, který je způsobený nesystémovým přístupem k rekonstrukci škol. K řešení by mohl přispět nově Metodický pokyn (MŽP, 2017) ohledně větrání, který alespoň stanovuje výpočet objemového průtoku vzduchu pro různé větrací systémy.



2.24 Obr. Průměrné hodnoty koncentrace CO₂ v učebnách v průběhu jedné vyučovací hodiny ve venkovním prostředí (Šubrt, 2011)

2.7.2. Příklady škol v ČR

Kostelní Lhota

V roce 1879 byla v obci Kostelní Lhota postavena škola. Budova prošla přestavbou v 2. polovině 20. století, kdy byla zmenšena okna. Podle nové studie osvětlení se okna vybourala zpět do původního tvaru (2.25 Obr.). Poslední rekonstrukce školní budovy, proběhla v průběhu roku 2012, tehdy došlo k výměně všech oken školy za okna s trojsklem, zateplení obvodového pláště budovy a instalaci tepelného čerpadla vzduch voda, (které nahradilo elektrická akumulční kamna), dimenzovaného na nové parametry školní budovy. Dále proběhla kompletní rekonstrukce vytápěcího systému s dimenzováním velikosti otopných ploch s ohledem na nízký teplotní spád. (JINDRÁK, 2014 - 2)



2.25 Obr. Škola v Kostelní Lhotě v letech 1876, po přestavbě v 2. polovině 20. století a po rekonstrukci v r. 2013 (Jindrák, 2012)

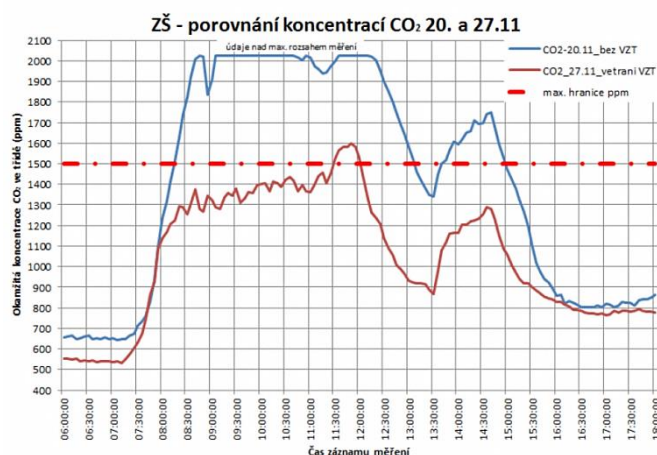
Byly posuzovány varianty větracího systému, které představovaly maximální přínos a zároveň dodržely zadaný finanční rámec. Úkolem bylo zajistit větrání pro dvě třídy s rozdílnými požadavky podle obsazenosti třídy. Také byly požadovány minimální stavební úpravy a minimální zásahy do interiéru školy. Na chodbách školy, kudy bylo nutné vést část vzduchovodů, jsou klenby. Nakonec byla pro obě třídy osazena společná rovnotlaká větrací jednotka s rekuperací tepla, která se běžně používá pro velké rodinné domy. Umístěna je pod stropem chlapeckých toalet, kde je zároveň napojen i odvod kondenzátu. Čerstvý venkovní vzduch je nasáván z fasády, prochází rekuperačním výměníkem a je přiváděn do obou tříd pomocí přívodních ventilů pod stropem nad tabulemi v přední části učeben. Odvod vzduchu je ze zadní části tříd sací žaluzií, umístěnou také pod stropem. Odtud vzduch proudí přes rekuperační výměník v jednotce a následně je odveden z objektu ven. (JINDRÁK, 2014 - 2)

V každé třídě je umístěno čidlo CO₂. Dle okamžité koncentrace CO₂ v prostoru tato čidla přímo upravují větrací výkon jednotky. Žáci třídu opouštějí za stálého přivádění čerstvého vzduchu. Po

dovětrání se v odpoledních hodinách větrání zastaví, znovu se zařízení spustí ráno po příchodu prvních žáků do třídy a po zvýšení koncentrace CO₂ nad nastavenou startovací hodnotu.

Za celou topnou sezonu byla okna otevírána pouze pro snížení teploty vzduchu ve třídě na začátku hodin zpěvu. K překročení koncentrace CO₂ nad 1 500 ppm došlo celkem 5x při výrazně vyšším počtu osob, než je běžné.

Na 2.26 Obr. vidíme graf průběhu koncentrace CO₂ v čase. Bez použití rovnotlaké větrací jednotky (modrá křivka) se koncentrace CO₂ pohybuje nad 1500 ppm v čase 8:20 – 13:10. Za použití větrací jednotky (červená křivka) dochází k překročení limitu pouze na půl hodiny v čase 11:30 – 12:00. (Jindrák, 2012)

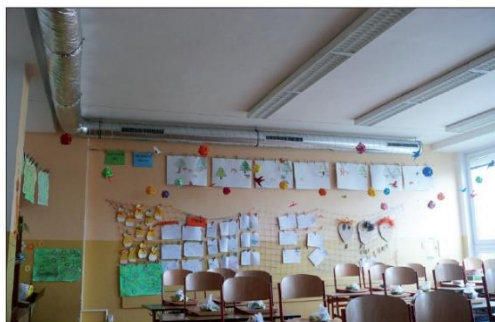


2.26 Obr. Koncentrace CO₂ v průběhu dne bez vzduchotechniky – modrá křivka bez, a se VZT – červená křivka (Jindrák, 2012)

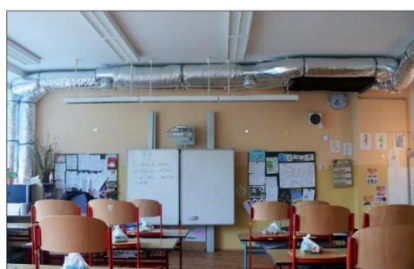
Základní škola v Praze na Jižním městě

ZŠ v Praze na Jižním městě, které je typickou sídlištní zástavbou z druhé poloviny 20. století, je dalším příkladem školy s úpravou větrání. Budova školy prošla v uplynulých letech revitalizací v podobě zateplení obálky včetně výměny oken. Původní větrání učebny bylo přirozené – okny, následně bylo do učebny instalováno nucené větrací zařízení v podobě větrací jednotky se zpětným získáváním tepla. Na 2.27 Obr. je budova pavilonu, kde je umístěna třída, ve které probíhalo měření kvality vnitřního prostředí.

Prezentované výsledky potvrzují špatné zkušenosti s výměnou oken z hlediska vnitřního prostředí učeben a nutnost řešit větrání školských zařízení. Učebny jsou specifickým prostorem, ve kterém při nedostatečném větrání, dochází k poměrně rychlému nárůstu koncentrace oxidu uhličitého na vysoké hodnoty ve chvíli, kdy do prostoru vstoupí žáci. Koncentrace CO₂ v průběhu vyučování v prostoru zpravidla roste a dosahuje hodnot, které mohou vést k problémům. CO₂ není jedinou znečišťující látkou v prostoru, ale dobře vypovídá o kvalitě vnitřního vzduchu a větrání. Mnohem závažnějším problémem může být např. výskyt radonu, zejména ve starších budovách, kdy protiradonová ochrana je nedostatečná. Problémy s větráním nastávají hlavně v zimních měsících, kdy nízké teploty venkovního vzduchu vedou k omezení přirozeného větrání okny z důvodu možného vzniku tepelného diskomfortu. Nucené větrání je jedním ze způsobů jak uvedenou problematiku řešit (2.27 a 2.28 Obr.). Systémy nuceného větrání s sebou přinášejí problém investičního charakteru a určité provozní náklady, proto je nutné na větrání myslet od počátku případné rekonstrukce. (Begeni, a další, 2014)



2.27 Obr. Příklad moderní budovy školy a učebna s nuceným větráním – přívodem vzduchu - (Begeni, a další, 2014)



2.28 Obr. Nucené větrání – odvod vzduchu a větrací jednotka v učebně – detail řešení přívodních a odvodních prvků na fasádě - (Begeni, a další, 2014)

2.8. Provozní stavy pro různé typy škol a provozní doporučení pro přednáškové místnosti

2.8.1. Provozní stavy školních budov dle jejich typu

Provozní stav tříd základní školy je obvykle od 8:00 – 13:00 hod. Oproti tomu u poslucháren vysoké školy je od 8:00 – 20:00 hod. To znamená 12 hodinovou směnu, která se liší obsazeností v průběhu času. Pro učebny se systémy VZT jsou rozvrhy provozu VZT předprogramovány pro stavy Obsazeno / Neobsazeno a Efektivní obsazenost.

2.8.2. Provozní doporučení pro přednáškové místnosti

Mezi požadavky patří tepelný komfort, kvalitní vnitřní ovzduší (IAQ) a velmi důležitá je bezhlučnost prostředí. Systémy TZB musí navrženy na všechny tyto požadavky a měly by být snadno udržovatelné pro školní techniky a správce. Vhodným provozem lze zlepšovat kvalitu vnitřního ovzduší ve školních budovách, ale i v obytných budovách obecně.

2.8.3. Šest hlavních doporučení pro školní budovy v USA

V následujících odstavcích jsou uvedena doporučení po zřizovatele a provozovatele školních budov. (Yeager, 2014)

- 1) Snížit chemické znečištění – používat filtry o vysoké účinnosti, nízko emisní čisticí prostředky – vede ke snížení počtu zameškaných hodin ve výuce kvůli chronickým chorobám dýchacího ústrojí
- 2) Udržovat optimální relativní vlhkost vzduchu – vysoké hodnoty RH jsou spjaty s astmatem, vytvářejí příhodné prostředí pro vznik a množení plísní, bakterií a roztočů; pro horká podnebí se doporučuje odvlhčovací systém, jehož činnost se reguluje podle naměřených hodnot vlhkosti
- 3) Měřit a sledovat koncentraci CO₂ – nedostatek čerstvého vzduchu může velmi snížit schopnost se soustředit jak u studentů, tak u pedagogů; větrací systém, který zaručí dostatečnou výměnu vzduchu a přivede čerstvý vzduch v závislosti na naměřené koncentraci CO₂ v budově

4) Snížit nebezpečí znečištění vnitřního prostředí od srsti zvířat a organismů – astma, snížením množství či počtu spouštěčů astmatu jako jsou např. zvířecí srst, roztoči, švábi a plísně – snížení může pomoci zamezit absencím v docházce a vylepšit vnitřní prostředí pro zaměstnance i učitele. Obvyklým řešením jsou filtry o vysoké účinnosti a germicidní lampy.

Pozn. Germicidní lampy – způsob dezinfekce plochy UV - zářením, kdy se volí počet svítidel na zadanou plochu či povrch. Rozhodujícím kritériem pro účinnost UV záření je stanovení minimální dávky, která bude aplikována při daném provozním stavu na desinfikovaný předmět. Dávka se definuje jako součin intenzity záření a doby ozáření a udává se v mJ/cm². K dezinfekci dle druhu média se vyžaduje minimální dávka 30 mJ/cm². (Bulva, 2014)

5) Větrání učeben nejen za přítomnosti uživatelů, ale i v jejich nepřítomnosti – možnost před - větrání či předchlazení učebny

6) Osvěta učitelů a zaměstnanců školy - Řada osob si potřebu větrat pravidelně neuvědomuje. Přítom nejčastějším problémem v učebnách je nedostatečný přívod čerstvého vzduchu. Doporučuje se přizvat na uvedení do problému a návod na udržování optimálního větrání specialistu.

2.8.4. Doporučení podle Krajské hygienické stanice v Ostravě

Z našich předpisů je možno citovat doporučení:

- *Vhodným uzpůsobením režimu větrání (v zimě nárazově - krátce co největším průřezem větracích otvorů), čímž lze dosáhnout i vyhovujícího stavu proudění vzduchu.*
- *V kombinaci s režimem vytápění může větrání pomoci při optimalizaci teplotně-vlhkostního mikroklimatu v učebnách (u plastových oken je nezbytná mikroventilace).*
- *Regulací teploty nejlépe pomocí čidel nebo alespoň po častější kontrole nástěnných teploměrů.*
- *Udržováním čistoty řádně a důsledně prováděným úklidem na mokro s častou výměnou vody dle velikosti vytíraných ploch a povrchů (jeden kbelík vody na třídu nestačí!).*
- *Nepřepřehováním tříd nábytkem, pomůckami, letitými dekoracemi, textiliemi.*
- *Pravidelným malováním (min. 1x za 3 roky) méně propustným materiálem s následným důkladným úklidem (osvětlovací tělesa nevyjímaje).*
- *Denně vysáváním kobereců vysavačem s mikrofiltrem nebo záchytem do vody.*
- *Nepřípustností jakýchkoliv stavebních prací v průběhu školního vyučování (bourání, rekonstrukce rozvodů, opravy apod.).*

Mezi vhodné interiérové rostliny, které příznivě ovlivňují vnitřní prostředí tříd a působí jako dobré čističky vzduchu, patří (např. potosovec, azalka, chamaedorea, banánovník, břečťan, fikus, kapradě, dracéna). (KHS MKvO, 2012)

Další doporučení se týká budov vybavených větracími systémy. Podle (Bischof, 2008) pokud je budova vybavena klimatizačním či vzduchotechnickým systémem, je nutno vyjma pravidelné výroční kontroly dodržovat kontroly stanovené hygienickými normami pro tato zařízení. V Německu je to například norma VDI 6022, která se týká hygienických požadavků na klimatizační systémy a zařízení. Speciální kontroly jsou nutné pro prvky, které obsahují vlhkost či zkondenzovanou vodu, jako jsou zvlhčovače nebo výměníky tepla.

2.9. Shrnutí

Na základě výzkumu, šetření, průzkumů a uvedených případových studií doložených příklady školních budov v Evropě, v USA a v naší republice lze konstatovat, že

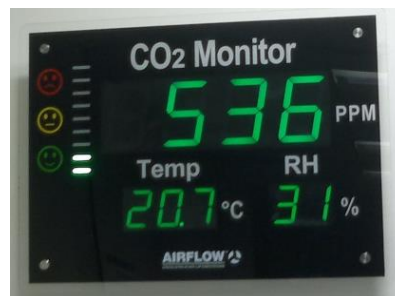
Optimální podmínky pro větrání problematických existujících školních budov lze zajistit v zásadě dvěma základními způsoby:

a) Technickými úpravami: optimální je oddělení větracího systému od systému chladicího a vytápěcího, použití radiačního vytápění místo teplovzdušného vytápění, instalovat otevíratelná okna a zajistit vnitřní teplotu nastavitelnou uživateli v každé místnosti.

b) Pokud technické úpravy nejsou z jakéhokoli důvodu možné, je nutno zajistit plán větrání, (a školení v oblasti větrání) okny pomocí kontrolovatelných administrativních opatření.

Pokud škola nemá strojní větrání, měly by třídy být větrány provětráváním, pokud je to možné např. jednou za 45 minut a na začátku a na konci školního dne. Učitel rozhoduje o tom, kdo vyvětrá třídu po každé hodině a jak bude třída větrána. Na prvním stupni základní školy bude provádět větrání učitel, na druhém stupni může větrání zajistit skupina žáků.

Jedním z dostupných možných řešení kvality vnitřního ovzduší je podávat informaci uživatelům o koncentraci CO₂. Na obrázku (2.29 Obr.) je fotografie displeje CO₂, který zároveň spolu s koncentrací škodliviny ukazuje, kdy je nutné vyvětrat. Když koncentrace překročí uvedenou mez, tak se zobrazí červeně upozornění. Problémem však je určení umístění měření koncentrace CO₂. Mělo by identifikovat stav odváděného vzduchu.



2.29 Obr. Monitor hodnotící IAQ (fotografie autora)

3. Cíle práce

Důvody, motivace a dílčí části práce pro dizertační práci byly vypracovány takto:

- Identifikace stavu vnitřního prostředí školních budov
 - identifikace skutečné koncentrace CO₂ v prostoru učebny s řízenou výměnou vzduchu centrální klimatizací a učebny s přívodem větracího vzduchu klasickými okny
- Přehled stávajícího stavu systémů větrání školních budov
 - Shrnutí současných problémů vnitřního prostředí školních budov ve vztahu k použitému systému větrání

Cíle dizertační práce byly stanoveny takto:

- Systémové možnosti řešení větrání školních budov (přívod vzduchu) do učeben, které nemají centrální systém větrání (klimatizace)

Dílčí úlohy:

- Popsat proudění vzduchu v prostoru učebny – možnosti využití přirozeného větrání, v učebně s konvekčním zdrojem tepla
- Jak je možné řešit problém přirozeným větráním, je – li v místnosti zdroj tepla
- Popis pohybu vzduchu v místnosti
- Stanovení množství čerstvého vzduchu, který je nutné přivést, aby se udržela přijatelná koncentrace škodlivin (koncentrace CO₂)

4. Metody zpracování

- a) Identifikace vnitřního prostředí učeben měření
 - Měření koncentrace CO₂ v učebnách (ve školních budovách)
 - Diskuze výsledků měření, lokální stav a jeho změny

- b) Simulace proudění pro třídy bez nuceného větrání
 - Zjednodušení problému celé třídy – počet osob a geometrie prostoru
 - Výběr a okrajové podmínky simulačního modelu (výběr vhodného modelu turbulence)
 - Ladění simulačního modelu

- c) Ověření simulace (modelu) porovnáním s řízeným experimentálním měřením
 - Postavení experimentálního měření podle modelu
 - Měřené varianty – s otevřenými otvory – s vyklopeným oknem, s mírně otevřeným oknem, se zcela otevřeným oknem, s mírně otevřenými dveřmi a mírně otevřeným oknem

5. Rozbor dílčích úloh

Dílčí úlohy byly rozděleny na odbornou rešerši týkající se současného stavu problematiky, část měření a identifikaci stavu vnitřního prostředí učeben, teoretickou část (simulace) a experimentální část.

Odborná rešerše týkající se stavu větrání školních budov v Evropě a ve světě je uvedena v druhé kapitole.

Identifikace stavu prostředí v učebnách je provedena během přítomnosti studentů a za použití měřicí techniky, která měřila následující parametry vnitřního prostředí učeben a poslucháren: teploty vzduchu, teploty kulového teploměru, rychlosti proudění vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu a koncentrace škodliviny CO₂, a je uvedena v šesté kapitole. V následujících částech páté kapitoly uvádím rozbor teoretické části práce a experimentální části práce.

5.1. Teoretické řešení – model posluchárny v softwaru + simulace proudění

Přítomnost osoby prostředí posluchárny ovlivňuje prostředí 3 způsoby:

- a) produkci tepla – multizdrojová bodová produkce tepla
- b) produkci vodní páry – multizdrojová bodová produkce vodní páry
- c) produkci CO₂ – multizdrojová bodová produkce koncentrace CO₂

Vnitřní prostředí v posluchárně je vytvářeno:

- a) přítomností osoby
- b) větracími otvory (okna, mřížky) a systémem vytápění
- c) odděleným systémem vytápění a větrání (vzduchotechnika)
- d) spojeným systémem vytápění a větrání (klimatizace)

Sledované parametry prostředí důležité pro komfort osob:

- Teploty vzduchu a radiální teploty
- Rychlosti proudění vzduchu
- Koncentrace škodlivin

Komfort osoby v prostředí posluchárny

Rychlosti proudění vzduchu propojují tepelný komfort a kvalitu vnitřního ovzduší

Komfort:

- a) Tepelný – lze popsat teplotními poli, vlhkostními poli a rychlostními poli proudění vzduchu
- b) Kvality ovzduší – popsán poli koncentrací škodlivin v prostoru a rychlostními poli proudění vzduchu

Jedná se o komplexní úlohu, kterou popisují rovnice přenosových jevů (přenosu tepla a hmoty), Navierovy – Stokesovy (N - S) rovnice.

5.1.1. Nároky na přívod vzduchu podle produkce škodlivin

Osoby produkují CO₂ – větrací průtok podle produkce CO₂

$$V_e = \frac{M}{C_{max,hm} - C_{p,hm}}$$

Rovnice 5.1 Větrací průtok podle produkce CO₂

V_e - potřebné množství čerstvého vzduchu pro udržení nejvýše přípustné koncentrace škodliviny [m³.h⁻¹]

M – produkce vznikající škodliviny [g.h⁻¹]

C_{max,hm} maximální přípustná koncentrace škodliviny podle hygienických předpisů [g.m⁻³]

C_{p,hm} koncentrace škodliviny v čerstvém vzduchu přiváděném do místnosti [g.m⁻³]

Osoby produkují vlhkost – větrací průtok podle produkce vlhkosti

$$V_e = \frac{G}{\rho * (x_i - x_p)}$$

Rovnice 5.2 Větrací průtok podle produkce vlhkosti

V_e - potřebné množství čerstvého vzduchu pro udržení nejvýše přípustné měrné vlhkosti v prostředí [m³.h⁻¹]

G - produkce vlhkosti ve větraném interiéru [g.h⁻¹]

X_i - měrná vlhkost interiérového vzduchu [g.kg⁻¹s.v.]

X_p - měrná vlhkost čerstvého vzduchů [g.kg⁻¹s.v.]

P - měrná hmotnost vzduchu [kg.m⁻³]

5.1.2. Zjednodušení úlohy pro aplikaci pro školní budovy:

- z hlediska problémů školních budov a jejich nákladných rekonstrukcí bez systémů nuceného větrání vybírám variantu bez systému VZT
- zjednodušení geometrie pro 1 osobu
- zjednodušení vlivu osoby na prostředí – vliv produkce tepla na prostředí
- náhrada člověka v modelu lidským simulátorem

5.2. Experimentální měření v referenční místnosti (v laboratoři)

- Náhrada člověka tepelným modelem člověka (TMČ)
- Náhrada vnitřního prostředí třídy pomocí vnitřního prostředí laboratoře

6. Identifikace stavu vnitřního prostředí školních budov

Tato kapitola obsahuje identifikaci vnitřního prostředí učeben měření. Soustředí se především na kvalitu vnitřního ovzduší a koncentraci CO₂. Na závěr je uvedena diskuze výsledků měření, lokálního stavu a jeho změn.

Byly měřeny stavy vnitřního prostředí školních budov. Podrobné grafy dalších veličin jsou uvedeny v příloze č. 2 na str. 124. V textu uvádím vybrané grafy.

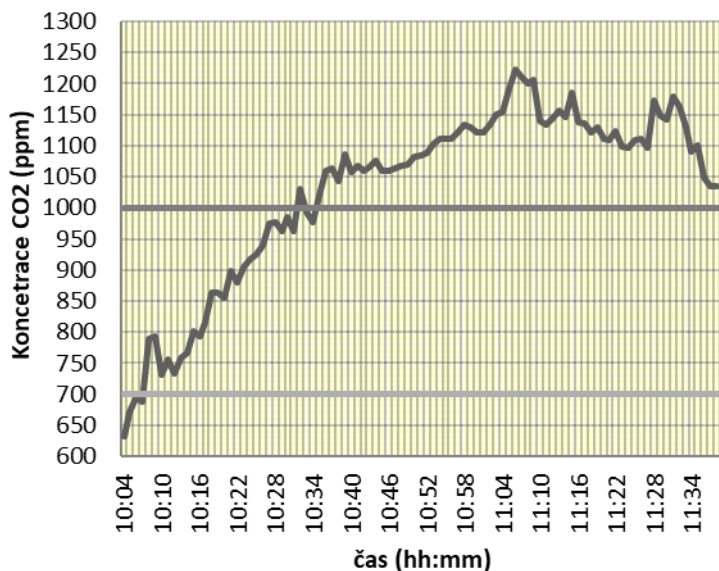
6.1. Analýza větrání v posluchárně školy (As135) – bez vzduchotechniky



6.1 Obr. Pohled na ústřednu a čidla prostředí z měření v posluchárně As135 (autor)

6.1.1. Zimní měření v As135

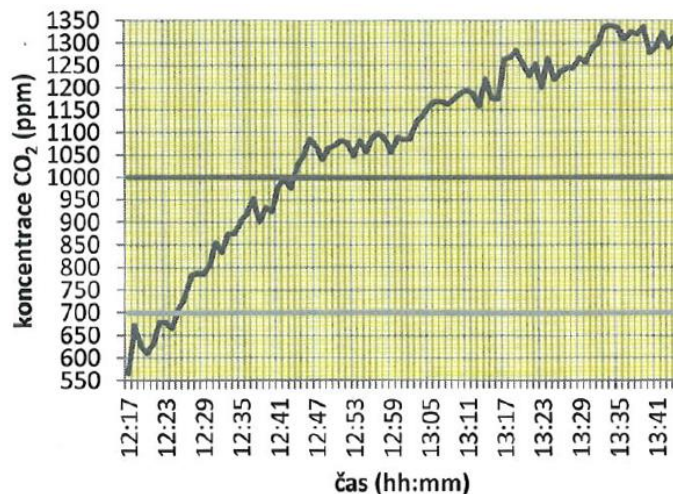
Okna byla zavřená v posluchárně As135 (6.1 Obr.), neboť je nebylo možné otevřít z důvodu zamčení. Měření ovlivňovaly postupně opožděné příchody studentů (otevřené dveře). Přítomno bylo 32 osob z maximální kapacity 98 míst.



6.2 Obr. Zimní měření koncentrace CO₂ - (As135) s vyznačenými hranicemi 700 ppm a 1000 ppm - přirozené větrání, zavřená okna (autor)

6.1.2. Letní měření v As135

Okna byla zavřená, neboť je nebylo možné otevřít z důvodu zamčení. Přítomno bylo 38 osob z maximální kapacity 98 míst.



6.3 Obr. Letní měření koncentrace CO₂ - (As135) s vyznačenými hranicemi 700 ppm a 1000 ppm - přirozené větrání, zavřená okna (autor)

6.1.3. Závěr dílčí analýzy pro As135

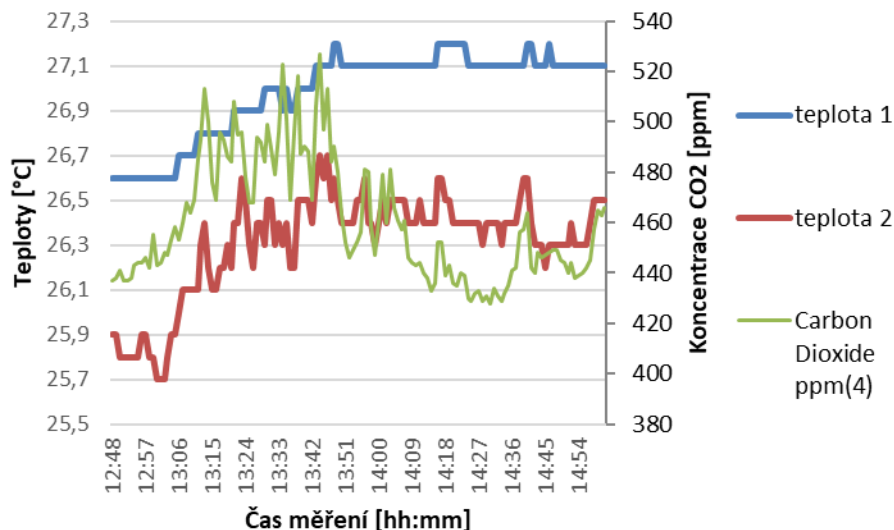
V obou případech bylo přítomna pouze třetina osob z možné celkové kapacity posluchárny. Přesto koncentrace CO₂ raketově roste. Při větší obsazenosti by koncentrace rostla výrazně rychleji a prostředí by nevyhovovalo požadavkům z hlediska norem. Při celodenním měření za předpokladu přítomnosti studentů by koncentrace rostla zobrazeným trendem na 6.3 Obr.

6.2. Analýza a měření v učebně A231 vysoké školy – analýza provětrávání

Měření proběhlo v učebně vysoké školy (A231) dne 6. 9. 2017 po výměně obvodového pláště a oken. Měření během teplých exteriérových podmínek a tedy za možnosti větrání bez ztráty tepelného komfortu. Před měřením bylo 5 minut otevřené okno u tabule a dveře. Během měření bylo použito provětrávání (6.4 Obr.), kdy bylo otevřené okno a dveře umístěné na protější straně učebny. Měřicí technika byla umístěna u tabule na lavici, nejdále od okna a dveří. Během měření bylo přítomno 20 osob. Měření proběhlo v čase od 13 - 14 hod. V 13:30 hod. 1 osoba odešla. Další grafy z měření jsou uvedeny v příloze 2 na str. 124.



6.4 Obr. fotografie z měření kvality vnitřního ovzduší a teplot v učebně vysoké školy (autor)



6.5 Obr. teploty a koncentrace CO₂ během měření v A231 (autor)

6.2.1. Dílčí závěr analýzy pro A231

Koncentrace kolísá mezi 400 – 520 ppm při stálém větrání protilehlými otvory do interiéru a exteriéru (6.5 Obr.) – opět se jedná o obraz koncentrace pro jedno místo. Při daných exteriérových tepelných podmínkách je možné takto větrat a udržovat příznivé koncentrace CO₂ za vysoké obsazenosti učebny.

6.3. Identifikace prostředí s VZT v posluchárně C215

V rámci mapování problematiky byla zkoumána kvalita vnitřního prostředí v posluchárně vysoké školy po rekonstrukci (6.6 Obr.)



6.6 Obr. Fotografie z měření v posluchárně C215 před a po rekonstrukci – umístění měřicího stojanu (autor)

6.3.1. Měření vnitřního prostředí posluchárny

Měření v letních podmínkách proběhlo v dubnu a v květnu. První měření se konalo ve dnech 8. 4. – 11. 4. 2013. Jednalo se o průběžné několikadenní měření. Když byla posluchárna obsazena studenty v čase 16 – 18, tak se viditelně zvýšily hodnoty koncentrace CO₂, teploty vzduchu a teploty kulového teploměru. Kontrolní měření 6. 5. – 9. 5., které potvrdilo výsledky měření z dubna 2013.

6.3.2. Vzduchotechnický systém

Vzduchotechnický systém byl navržen jako náhrada stávajícího systému. V systému je využíváno zpětného získávání tepla. Tepelné ztráty vzniklé činností větracího zařízení jsou pokrývány

instalovanými teplovodními ohřivači, které jsou součástí navržených zařízení pro přívod čerstvého vzduchu. Systém jej v zimě využíván k teplovzdušnému vytápění a je napojen na stávající okřskovou kotelnou. Chlazení přívodního vzduchu se provádí přes stávající vodní chlazení, které je instalované v objektu. Přívod vzduchu do posluchárny je umístěn pod stropem, odsávání odváděného vzduchu je pod stupni posluchárny. K sání čerstvého vzduchu dochází z fasády objektu. Výfuk odpadního vzduchu je proveden nad střechou objektu.

Větrací systém funguje jako rovnotlaké větrání s možností cirkulace sloužící jako teplovzdušné vytápění a chlazení přívodního vzduchu. Větrací jednotka má následující kapacitu: přívod 6 000 m³/h, a odvod 6 000 m³/h. Podle dokumentace návrhu větracího systému byl systém vybaven deskovým rekuperačním výměníkem o účinnosti 67 %. Přívod vzduchu je umístěn pod stropem anemostaty (6.7 Obr.) s termostatickým ovládáním a šterbinovými vyústkami u oken. Odvod vzduchu je řešen mřížkami ve stupních v podlaze.

Regulace vzduchotechnického systému

K ovládání regulačních prvků vzduchotechnického systému slouží program Metasys, který používají vzduchotechnické systémy na Stavební fakultě. Program zároveň ovládá systém monitorování vnitřního prostředí v posluchárně a měřicí systém měřící parametry venkovního vzduchu. Program kontroluje a řídí provoz ve všech malých zrekonstruovaných posluchárnách v budově C a v některých velkých posluchárnách, které jsou vybaveny vzduchotechnickým systémem.

Regulace vzduchotechnického systému sleduje parametry vzduchu na různých místech v potrubí, v posluchárně a ve venkovním prostředí. Ve venkovním prostředí je měřena teplota vzduchu. Dále se teplota vzduchu měří u katedry přednášejícího, v místě ležícím nejnižší v místnosti, pak u vchodu do místnosti, v místě které leží v pobytové zóně osob nejvýše. Teplota se dále měří na výstupu z vzduchotechnického potrubí. Koncentrace oxidu uhličitého je měřena ve vzduchotechnickém potrubí na potrubí odváděného i přiváděného vzduchu. Průtok v systému lze dále regulovat různými klapkami. Jedna z klapek je umístěna v potrubí v místě nasávání venkovního vzduchu, další je umístěna na potrubí odváděného vzduchu. Další klapka je umístěna na potrubí, které propojuje přiváděný a odváděný vzduch. Na potrubí jsou dále umístěny v blízkosti ventilátorů snímače diferenčního tlaku (6.8 Obr.).

Žádané hodnoty jsou nastaveny pro teploty vzduchu 20 °C v prostoru a teploty vody pro chladicí a topný okruh 15 °C. Provozní stavy jsou řízeny dvěma způsoby. První je časový plán obsazenosti budovy, kterým byl dopředu předprogramován, kdy podle rozvrhu nastávají možnosti obsazeno nebo neobsazeno. Dalším provozním stavem je takzvaná efektivní obsazenost.

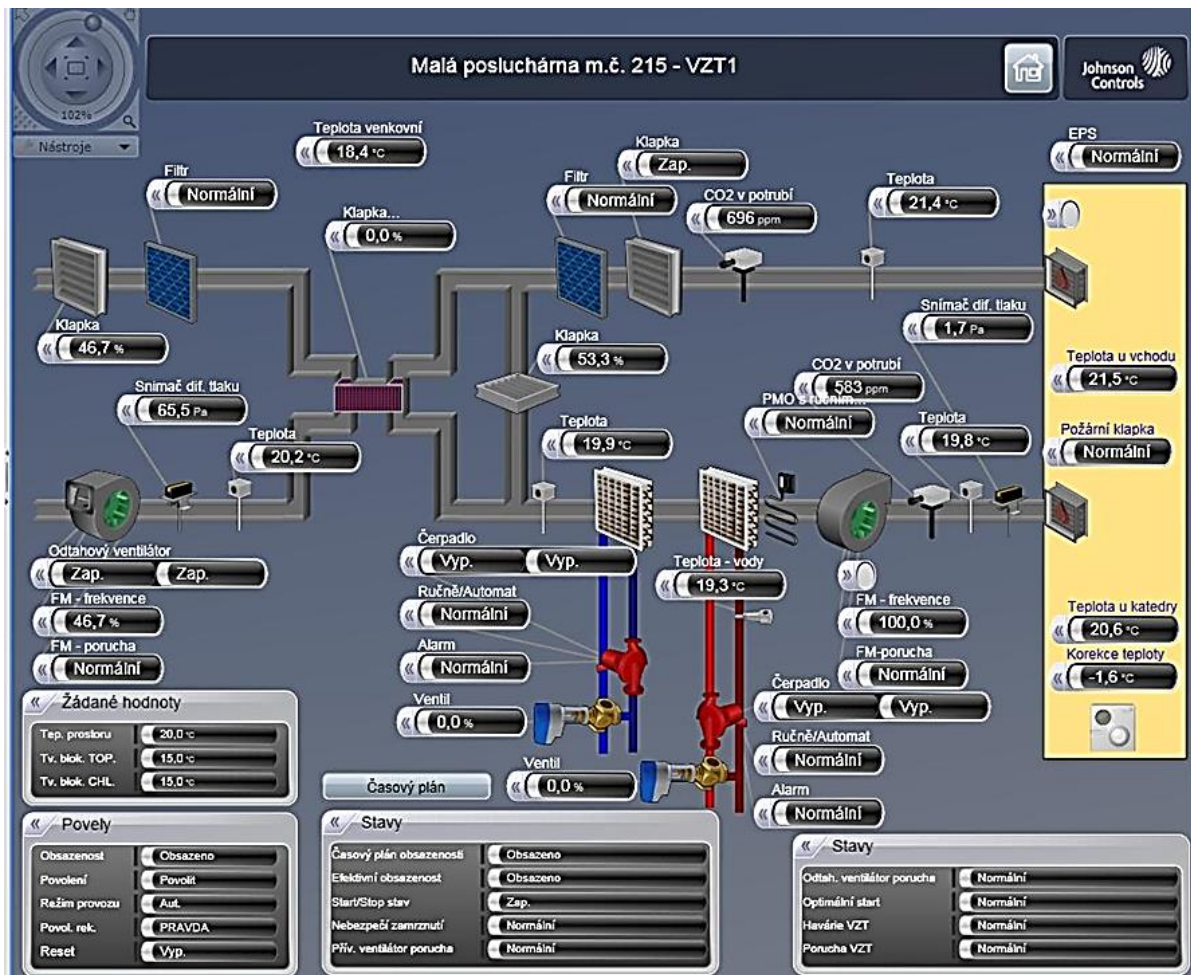


6.7 Obr. Přívod vzduchu anemostaty v posluchárně C215 (autor)

Z dotazníkového průzkumu vyplývá, že studenti si i po rekonstrukci a zavedení větracího systému stále stěžují. Obsluha vzduchotechnického systému nebyla vyškolená ohledně dynamických změn nastavení systému řízení. Opět by bylo nutné zavést speciální školení zaměstnanců a zajistit jim povolení regulovat průtok podle aktuální potřeby uživatelů.

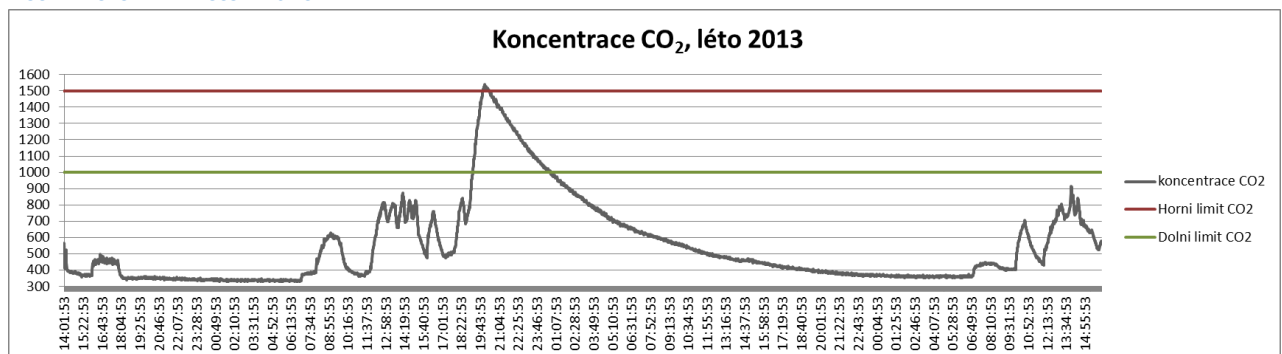
6.3.3. Měření po rekonstrukci – stav s VZT (C215)

Měření v letních podmínkách proběhlo v dubnu a v květnu. První měření se konalo ve dnech 8. 4. - 11. 4. 2013. Jednalo se o průběžné několikadenní měření. Když byla posluchárna obsazena studenty v čase 16 - 18, tak se viditelně zvýšily hodnoty koncentrace CO₂, teploty vzduchu a teploty kulového teploměru. Kontrolní měření 6. 5. - 9. 5., které potvrdilo výsledky měření z dubna 2013.



6.8 Obr. Regulační schéma vzduchotechniky pro posluchárny vysoké školy v programu Metasys (Metasys, 2013)

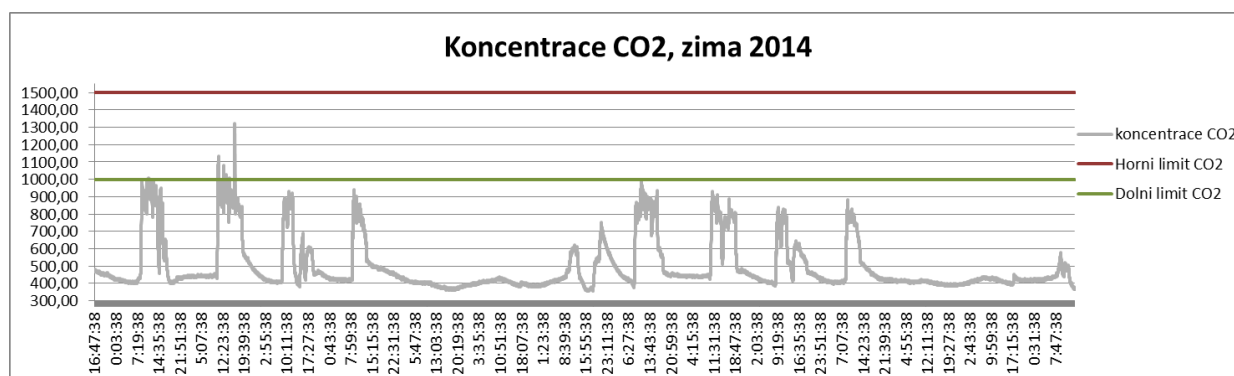
Letní měření – květen 2013



6.9 Obr. měření kvality vnitřního ovzduší (koncentrace CO₂) pro letní období v posluchárně vysoké školy po rekonstrukci (Kohoutková, 2013)

Zimní měření proběhlo na přelomu února a března. Jednalo se o průběžné měření ve dnech 24. 2. - 10. 3. 2014. Byly měřeny následující veličiny: teplota kulového teploměru, teplota vzduchu, koncentrace CO₂, rychlost proudění vzduchu, relativní a absolutní vlhkost. Měřené teploty vzduchu a kulového teploměru se pohybovaly v rozmezí 22 - 26,7 °C. Čím byla větší obsazenost, tím byla vyšší i teplota. Maximální teplota dle vyhlášky č. 343/2009, kterou je teplota o hodnotě 28 C, nebyla překročena. Nicméně teploty se pohybovaly mimo optimální rozhraní 22 +- 2 C. Koncentrace CO₂ se pohybovaly ve většině případů pod 1000 ppm. Pouze v případě jedné přednášky došlo k naměření hodnoty nad 1300 ppm. Podle legislativy by doporučená koncentrace měla být 1000 ppm a maximální hodnota byla měla být 1500 ppm. Rychlost proudění vzduchu se pohybovala většinu času v nízkých hodnotách do 0,2 m/s s vrcholovými hodnotami 0,4 m/s, což není přijatelné. Hodnota dle vyhlášky se má pohybovat mezi 0,1 - 0,2 m/s. V jednom extrémním případě byla naměřena hodnota až 0,91 m/s způsobená pravděpodobně větráním dveřmi učebny. Bylo to v době během přednášky. Co se týče relativní vlhkosti vzduchu, tak ta byla nízká. Pohybovala se v rozmezí 20 - 35 %. Za nepřítomnosti uživatelů byla její hodnota mezi 20 - 25 %. Během přednášek narůstala až do hodnot kolem 35%. Přijatelné hodnoty jsou podle výše zmiňované vyhlášky 30 - 65 %. Během měření se tedy hodnoty pohybovaly pod limitními hodnotami.

Zimní měření – 24. 2. – 10. 3. 2014



6.10 Obr. měření tepelného komfortu a kvality vnitřního ovzduší pro zimní období v posluchárně vysoké školy po rekonstrukci (Kohoutková, 2014)

Zmapování stavu kvality vnitřního prostředí v posluchárně C215 po rekonstrukci

Bylo zjištěno, že kvalita prostředí je vyhovující a zároveň potřebuje zlepšit komfort pro uživatele učebny. Byly nalezeny slabiny řešení větrání posluchárny. Patří mezi ně vysoká rychlost proudění vzduchu, nízká relativní vlhkost vzduchu a hluk způsobený provozem vzduchotechniky. Výše zmiňované slabiny systému způsobují nižší produktivitu studentů. V ideálním případě by mělo dojít k návrhu úpravy provozu vzduchotechniky nebo návrhu dalšího opatření. Jako řešení stížností studentů na průvan v horních lavicích je možno navrhnout snížení rychlosti proudění vzduchu v systému a tím snížení rychlosti proudění vzduchu, který proudí vyústkami do posluchárny. Na nedostačující relativní vlhkost vzduchu bych navrhla zvlhčování vzduchu. Hluk způsobený provozem větracího systému by se měl snížit se snížením rychlosti proudění větracího vzduchu.

6.3.4. Dílčí závěr analýzy pro C215 s vzduchotechnikou

V analýze se ukázalo, že instalovaný vzduchotechnický systém má své slabiny. Regulace pouze na základě škodliviny CO₂ způsobuje vysoké rychlosti proudění vzduchu v posluchárně. K větrání by mělo docházet i za nepřítomnosti uživatelů, nikoliv jako nyní, kdy je koncentrace CO₂ chápána jako jediný ukazatel rozhodující o nutnosti větrání. Průběžným větráním či větším předvětráním místnosti za nepřítomnosti uživatelů by se mohl snížit i diskomfort pro uživatele (snížení rychlosti proudění vzduchu za přítomnosti uživatelů).

Zjištění aktuálního stavu vnitřního prostředí po rekonstrukci

Aktuální stav vnitřního prostředí byl zjištěn měřeními. Teplota vzduchu v létě se držela v požadovaném intervalu, kdy se hodnoty pohybovaly mezi 20 – 23 °C. V létě se teplota kulového teploměru a teplota vzduchu liší, kdy teplota kulového teploměru je vyšší než teplota vzduchu cca o 0,5 °C. V zimě se teplota vzduchu v posluchárně pohybovala stále nad 22 °C. Během nejvyšší obsazenosti učebny teplota stoupla nad doporučené maximum na hodnotu přes 25 °C. Vyšší teploty ke konci měření jsou způsobeny náhlým oteplením počasí o víkendu 8. – 9. 3. 2014, kdy nebyly pracovní hodiny a systém regulace tedy nepracoval. Podobné hodnoty nabývá i teplota kulového teploměru. V posluchárně je během přednášek, kdy je velká obsazenost, zajištěno dostatečné větrání, které drží koncentraci CO₂ většinou pod 1 000 ppm, jedenkrát během měření v létě přesáhla koncentraci 1500 ppm. V zimě výjimečně dochází ke koncentraci vyšší než 1 000 ppm, jedenkrát koncentrace přesáhne 1 300 ppm. Relativní vlhkost vzduchu v létě se drží v požadovaném rozmezí a neklesne pod 45 %. V době nejvyšší obsazenosti se pohybuje v hodnotách kolem 63%. V zimě se relativní vlhkost pohybuje pod požadovaným rozmezím v hodnotách 20 – 35 %. Vlhkost 35 % nastává pouze v okamžiku nejvyšší obsazenosti učebny. Rychlost proudění vzduchu v létě se během provozu v učebně pohybuje v požadovaném rozmezí 0,1 – 0,2 m / s. Mimo dobu přednášek je rychlost proudění vzduchu nedostatečná. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že vzduchotechnický systém je regulován na nižší výkon.

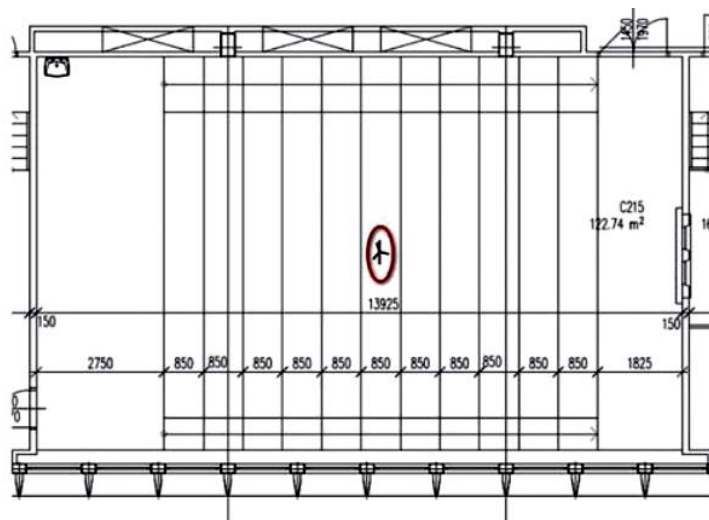
Vyhodnocení stavu vnitřního prostředí

Vnitřní prostředí je z hlediska koncentrace CO₂ a teploty vzduchu v pořádku. Vzduchotechnický systém zajišťuje dostatečnou výměnu vzduchu a udržuje požadovanou teplotu vzduchu. Nedostatečná je relativní vlhkost vzduchu. Stav vnitřního prostředí byl dále hodnocen subjektivně studenty, kteří se vyjadřovali mnohem pozitivněji k současnému stavu vnitřního prostředí než studenti, kteří stav hodnotili před rekonstrukcí a osazením nového vzduchotechnického systému.

6.4. Zjišťování vlivu přirozeného větrání v posluchárně školy (C215) – bez systému vzduchotechniky

6.4.1. Měření vnitřního prostředí v zimě, klimatické podmínky a vyhodnocení

Měření probíhalo v posluchárně v budově C během zkoušky dne 9. 2. 2012. Posluchárna o rozměrech 14 x 8,5 m má kapacitu 132 osob. V posluchárně je 11 řad uspořádaných stupňovitě, měřicí stojan byl umístěn v 6. řadě uprostřed, jak je označeno červenou elipsou na 6.11 Obr.. Okna posluchárny jsou orientována na jihovýchod, dveře do místnosti jsou umístěny naproti oknům.



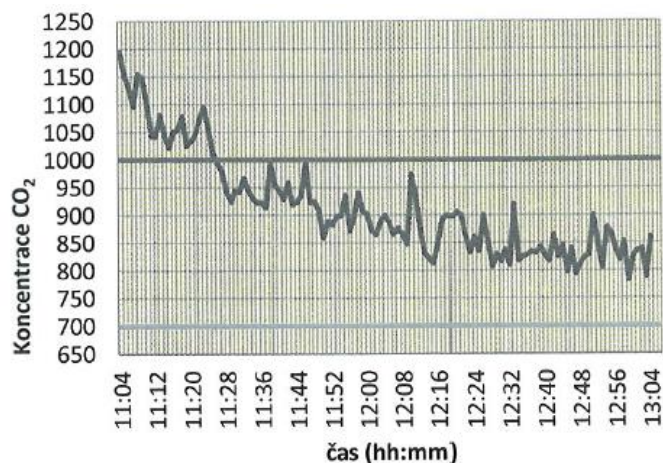
6.11 Obr. Měřicí stojan v posluchárně vysoké školy (Kohoutková A., 2013)

Byla měřena teplota kulového teploměru, relativní vlhkost, rychlost proudění vzduchu a koncentrace CO₂. Vytápění posluchárny bylo zajištěno deskovými otopnými tělesy bez možnosti regulace. Větrání

bylo přirozené. V podhledu byla instalována vzduchotechnika, která nebyla v provozu. Zkouška měla 2 části.

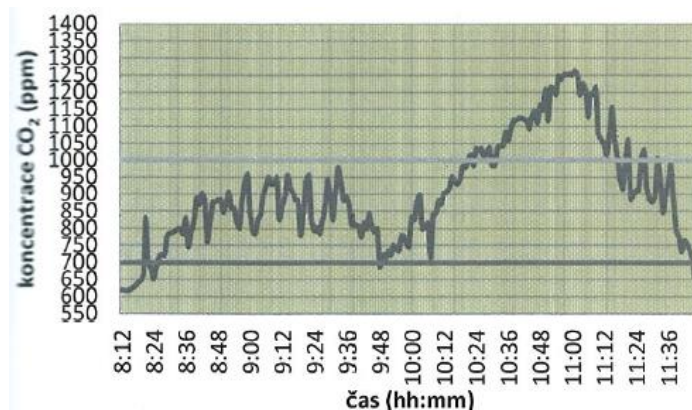
Měření koncentrace CO₂ v C215 bez vzduchotechniky

Každá část zkoušky trvala hodinu. Během první části zkoušky došlo k opožděnému příchodu 2 studentů. Mezi první a druhou částí byla přestávka (6.12 Obr.). Na zkoušce bylo přítomno 16 osob. Posluchárna byla obsazena jen z 12 %. Před měřením se uskutečnila v posluchárně ranní zkouška o vysokém počtu studentů, která ovlivnila měření.



6.12 Obr. Naměřené koncentrace CO₂ v posluchárně C215 s vyznačeným hranicemi 700 ppm a 1000 ppm při zimním měření (autor)

Měření v létě probíhalo během dvou po sobě jdoucích zkoušek. Na první zkoušce bylo přítomno 24 uživatelů, na druhé 25. Dveře do atria byly během zkoušky zavřeny, aby studenty nerušil hluk. Po skončení první zkoušky došlo k vyvětrání učebny dveřmi, a příchodu studentů na druhou zkoušku. Daná skutečnost je patrná v poklesu koncentrace po 10. hodině (6.13 Obr.). Učebna byla málo obsazena, a přesto se koncentrace vyšplhala na 1250 ppm.



6.13 Naměřené koncentrace CO₂ v posluchárně C215 s vyznačeným hranicemi 700 ppm a 1000 ppm při letním měření (autor)

4. Závěr dílčí analýzy pro C215 bez VZT

Vnitřní ovzduší zásadně ovlivňuje stav před měřením, obsazenost místnosti před měřením a nemožnost otevírat okna a dveře během zkoušky. I při nízkých obsazenostech učeben koncentrace přesahuje 1000 ppm.

6.5. Diskuze výsledků měření, lokální stav a jeho změny

V praxi lze uvedené poznatky využít pro podobný typ místnosti, která slouží k shromažďování osob např. zasedací místnosti, jednací sály, soudní síně, malé koncertní místnosti.

V následující tabulce (6-1 Tab.) jsou shrnuta všechna provedená měření pro zkoumané místnosti, plochy a objemy daných místností, režimy větrání, provoz, obsazenost učeben během měření, délka měření a kvalita vnitřního ovzduší popsaná měřenou koncentrací CO₂.

Z vlastních měřicích experimentů je možno vyvodit následující poznatky a dedukce. Obecně lze říci, že velmi důležitou úlohu hraje umístění lavic a stolů k dlouhodobému sezení. Správným umístěním lavic a stolů vzhledem k vzduchotechnickému systému, k poloze oken a dveří lze docílit vylepšení osobního tepelného komfortu uživatelů.

Pro praxi je dále také důležité zjištění, že vnímání komfortu výrazně ovlivňuje věk a pohlaví uživatele. Ženy vnímaly prostředí chladnější, než jak je vnímali muži. Dalším zajímavým poznatkem je vliv psychického rozpoložení uživatelů na jejich pocity komfortu. Studenti ve stresu (při zkoušce) byli výrazně méně spokojeni s vnitřním prostředím než ti bez stresu (při přednášce).

Z měření poslucháren, které byly obsazeny jen zřídka, lze usoudit, že při plném obsazení by se hodnoty dostaly do větších extrémů v kratším čase.

Objem místnosti slouží jako kapacita pro koncentraci CO₂. Větší objem místnosti znamená delší možnou dobu výuky při přijatelné koncentraci.

Pro klima v ČR musíme řešit zvlášť letní a zimní stav a potenciálně vyšší nároky na vytápění prostoru.

6-1 Tab. Shrnutí analýzy VP školních budov ve vztahu k použitému systému větrání (autor)

Zkoumaná místnost	Plocha (m ²) a Objem místnosti (m ³)	Režim větrání	Letní/ Zimní provoz	Počet osob přítomných během měření, max. kapacita	Délka měření	Kvalita vnitřního ovzduší (CO ₂ v ppm)
As135	96,1 m ² , 247,9 m ³	Zavřená okna, bez VZT	letní	38, max. 98	2 hodiny	550 - 1350
As135	96,1 m ² , 247,9 m ³	Zavřená okna, bez VZT	zimní	32, max. 98	2 hodiny	630 - 1250
C215	121,5 m ² ; 574 m ³	bez VZT	letní	25 a 24, max. 132	2 hodiny	600 - 1250
C215	121,5 m ² ; 574 m ³	bez VZT	zimní	16 (+2), max. 132	2 hodiny	1220
C215	121,5 m ² ; 574 m ³	s VZT	letní	45, max. 132	4 dny	350 – 1510 (delší úsek nad 1000 ppm)
C215	121,5 m ² ; 574 m ³	s VZT	zimní	36, max. 132	4 dny	350 - 1309
A231	24,4 m ² , 70,0 m ³	Přirozené: Otevřené okno + otevřené dveře na chodbu, provětrávání	letní	20, max. 26	2 hodiny	440 - 530

Diskuze k výsledkům měření:

- Měření je ovlivněno stavem před začátkem měření, tzn. výší obsazenosti (či existencí obsazenosti) před začátkem měření, zda vzduch již nebyl znečištěn předchozí skupinou uživatelů.
- Měření je ovlivněno počtem osob a objemem prostoru.
- Měření je ovlivněno umístěním měřicího stojanu.
- Produkce škodlivin je ovlivněna stářím osob a pohlavím osob, které v prostoru jsou přítomny (podle různé plicní ventilace a různého množství škodlivin vydechovaných do prostoru)
- Z měření poslucháren vyplývá to, že i při malé obsazenosti dochází k vysokému nárůstu CO₂.

Obecně bylo zkoumáno vnitřní prostředí v přednáškových místnostech budovy vysoké školy. Přednáškové místnosti jsou místnosti o vyšším objemu, kde je standardně přítomno mnoho desítek studentů.

Nárazový provoz přednáškových místností, kdy se sejde větší počet osob do daného objemu místnosti, byl dříve řešen právě dostatečným objemem místnosti a tím dostatečným objemem vzduchu místnosti a výměnou vzduchu spárami oken nebo důmyslnými systémy větracích šachet.

6.5.1. Problémy s kvalitou vnitřního prostředí a komfortem ve větších místnostech:

- Problém zajistit komfort pro všechny, když máme různé okrajové podmínky – místo u okna, místo u dveří, místo uprostřed řady - Stížnosti ovlivněné tím, kde uživatel seděl – polohově závislý komfort
- Problém s umístěním terasovitým – různé výškové profily a tím pádem mění se teplota – vliv geometrie na komfort
- Rozdílné stavy prostředí pro systémy s vzduchotechnikou a bez ní

6.5.2. Problémy s větráním

- Problém s proměnností počtu přítomných osob – velice kolísá potřeba větracího průtoku během dne (počet míst k sezení neznamená automaticky násobně přepočtený průtok vzduchu) – učebna C215 po rekonstrukci
- Řešeno buď agilně studenty či přednášejícím – otevření oken – v našem podnebí vhodné pouze pro letní a přechodová období, v zimě je nežádoucí tepelná ztráta a tepelná nepohoda pro osoby u oken, nebo je otevírání oken zakázáno z důvodu bezpečnosti – učebny As135, A231 a učebna C215 před rekonstrukcí
- Řešeno regulačním systémem VZT, který má přeprogramovány denní režimy výuky nebo speciální režimy efektivní obsazenosti či neobsazenosti, nereaguje na skokové nárůsty přítomnosti – učebna C215 po rekonstrukci

6.5.3. Problémy s kvalitou výpovědi měření o stavu prostředí v posluchárně

- Měření popisuje situaci v jednom bodě, což je pro geometrii třídy a popisy situace pouze ilustrativní (velký objem třídy, neřešena uživatelská - pobytová zóna)
- Obecně při skutečném měření je limitován počet čidel a počet míst, kde měření může probíhat pro všechny sledované veličiny – vždy se musí odhadem určit, kde se bude měřit
- Tento odhad umístění se provádí bez konkrétních podkladů
- Dalším problémem je pak i umístění čidel koncentrace CO₂ pro regulaci vzduchotechniky a nuceného větrání – tradičně na odvodu vzduchu z učebny, opět poloha, která nevyovídá o skutečném stavu koncentrace škodliviny a stavu prostředí v místě pobytu osob (v uživatelské zóně)
- nastávají různé situace pro místnosti bez funkčního systému vzduchotechniky a s tímto systémem

Bodová měření zjišťují průběh veličiny v konkrétním místě a jeho blízkém okolí. Kdyby bylo čidel o dva řády více, bylo by možné zjistit situaci v celém objemu, a proto jsem se rozhodla použít software k řešení. Aby bylo možné zmapovat stav prostředí, tak je nutno provést simulaci proudění a pokusit se zjistit, jak se škodliviny po prostoru pohybují (transportují). Výsledkem simulace bude obraz proudění

v prostoru učebny, ze kterého po ověření funkčnosti modelu měřením budu moci odvodit transport škodlivin v prostoru a využít to pro potřeby větrání.

Pro ověření možnosti simulace stavů v prostředí učebny jsem zvolila simulační systém CFD, který je obecně nejpoužívanějším nástrojem pro řešení úloh proudění tekutin.

7. Systémové možnosti řešení větrání školních budov (přívod vzduchu) do učeben, které nemají centrální systém větrání (klimatizaci)

Pokud není možno zajistit nucený systém větrání a klimatizaci pro učebny, existují následující investičně i provozně méně náročné možnosti větrání:

- Učebna větraná ručně otevíratelnými okny – okenní otvor zajišťuje průtok vzduchu podle míry otevření či vyklopení okna
- Učebna větraná automaticky ovládanými okny – otevírání a zavírání okenního otvoru je zajišťováno předprogramováním (podle časových rozvrhů, podle mezní koncentrace CO₂)
- Učebna větrána ručně a automaticky otevíratelnými okny – kombinace obou předchozích variant
- Učebna větraná automaticky ovládanými okny a odtahovým ventilátorem – ventilátor může být umístěn do obvodové stěny (nebo na okraj potrubí odvětracího systému)

Další možnosti přinášejí speciální přívodní prvky a větrací jednotky. U těchto systémů investiční a provozní náklady velmi závisí na typu a rozsahu instalace:

- Učebna větraná přívodními prvky – speciálními profily procházející obvodovým pláštěm budovy, umístěnými nad zdroj tepla (otopné těleso), prvky umožňují průtok vzduchu z venkovního prostoru do interiéru bez přehřevu či předchlazení vzduchu, regulace průtoku je zajištěna klapkou, filtrují vzduch
- Učebna větrána větrací jednotkou – jednotky obsahují ventilátory, které umožňují regulovat průtok vzduchu do interiéru, mohou zajišťovat také filtraci vzduchu, chrání proti hluku z okolí
- Učebna větrána větracími jednotkami se zpětným získáváním tepla (rekuperační jednotky) - jednotka přivádí vzduch do objektu, filtruje vzduch, rekuperační výměník přehřeje či ochladí vzduch
- Učebna větrána rekuperačními jednotkami s vestavěným ohříváčem vzduchu – pokud účinnost rekuperace není v extrémních venkovních zimních podmínkách dostatečná, může být přiváděný vzduch dohřán

8. Matematický model

Navrhla jsem aplikaci matematického modelu CHD, která má ověřit, zda je možné místnost dostatečně vyvětrat otevřením okna. Model nezahrnuje vliv větru na proudění vzduchu, neboť je jisté, že proudění s vlivem větru je větší, a pravděpodobnost dostatečného vyvětrání prostoru vysoká. Vědecká otázka tedy zní, zda lze místnost dostatečně vyvětrat bez vlivu větru, když v exteriéru panují zimní venkovní podmínky. K získání odpovědi na tuto otázku je nutné se zabývat prouděním vzduchu oknem způsobeným rozdílem teplot v exteriéru a interiéru. Za předpokladu malého rozdílu teplot v interiéru a exteriéru je možné předpokládat dlouhé využití větracího otvoru bez vzniku tepelné nepohody uživatelů. Z tohoto důvodu byly vybrány extrémní zimní podmínky jako nejnepríznivější situace, kdy je velký rozdíl teplot v interiéru a exteriéru, a zároveň je předpokládán také rychlý nástup tepelné nepohody pro uživatele, takže prakticky by byl čas větrání značně omezen oproti situaci s malým rozdílem teplot v interiéru a exteriéru.

8.1. Proudění

Proudění tekutin lze charakterizovat hodnotou Reynoldsova čísla jako laminární nebo turbulentní. Laminární proudění je typické velmi pomalým pohybem nebo vysokou hodnotou viskozity, částice tekutiny se pohybují uspořádaně ve vrstvách (lamina je latinsky vrstva). Turbulentní proudění je neperiodické a nahodilé (turbulentus je latinsky neuspořádaný). Je charakterizováno rychlým pohybem nebo malým vlivem viskozity, kdy i malé poruchy v proudu rostou a způsobují nepředvídatelné chování tekutiny na lokální úrovni, intenzivní vířivé promíchávání v celé oblasti.

Také při proudění spojeném se sdílením tepla je možno pozorovat chování tekutiny, které lze označit za turbulentní. Pokud proudění tekutiny nastává v důsledku sdílení tepla, jedná se o tzv. volnou konvekci. Tepelná energie potom způsobuje proudění tekutiny, které může být za určitých podmínek turbulentní.

Představu o proudění lze získat dvěma způsoby:

a) Pomocí experimentů, které dávají realistický obraz o skutečném proudění, ale většinou jsou nákladné a jejich realizace vyžaduje dlouhý čas.

b) Pomocí matematických modelů. Většina matematických modelů proudění tekutin je reprezentována soustavou parciálních diferenciálních rovnic vyjadřujících základní fyzikální zákony zachování hmoty, hybnosti, momentu hybnosti a energie. K nim přistupují uzavírací rovnice představující tzv. konstitutivní vztahy a termodynamické zákony a dále počáteční a okrajové podmínky. Numerickým řešením těchto rovnic a počítačovou simulací proudění se zabývá počítačová dynamika tekutin (=překlad anglického názvu Computational Fluid Dynamics, který je běžně nahrazován zkratkou CFD). Cílem této oblasti vědy je na základě matematických modelů pomocí numerických metod, výpočtových algoritmů a specializovaných systémů programů realizovat na počítačích simulaci proudění, která by vedla k vytvoření realistického kvalitativního i kvantitativního obrazu proudění a také k získání výsledků srovnatelných s experimenty provedenými na modelu ve skutečné velikosti.

Navierovy-Stokesovy rovnice představují základní rovnice používané v dynamice tekutin. Navier odvodil tyto rovnice již v roce 1823. N - S rovnice v sobě obsahují všechny aspekty skutečného chování tekutin včetně jevu turbulence, jak ukazují experimentálně ověřené případy. N-S rovnice jsou parciální nelineární diferenciální rovnice druhého řádu eliptického typu pro případ stacionárního proudění a parabolického typu pro proudění nestacionární. Tyto rovnice jsou analyticky řešitelné jen v několika málo případech jednoduchých toků. Ve složitějších případech se řeší numericky. K tomu slouží CFD.

8.2. Metodika

Základní postup matematického modelování začíná preprocesorovou fází, kdy se vytváří geometrie oblasti, ve které je umístěna tekutina. Následně je oblast rozdělena síťováním pomocí CAD na diskrétní struktury (konečné objemy, konečné prvky) vhodných tvarů, hustoty a velikosti pro daný

problém. Definují se fyzikální vztahy pohybu tekutiny. Definují se okrajové podmínky, které zahrnují určení vlastností chování tekutiny a vlastnosti všech povrchů ohraničujících oblast. Určují se počáteční podmínky pro pohyb tekutiny. Poté se spustí simulace, v které se rovnice vyřeší iterací. V postprocesorové části se analyzují výsledky a zpracují se vizualizace výsledného řešení.

Metody matematického modelování většinou využívají metody konečných objemů a vhodných numerických schémat. Implementace všech metod používaných v turbulenci je založena na použití metod numerické matematiky – provádí se diskretizace problému v prostoru i v čase. Obecně každá metoda matematického modelování vyžaduje takovou prostorovou i časovou diskretizaci, aby byla schopna modelovat hodnoty gradientů všech veličin, které v daném případě přicházejí v úvahu. Maximální hodnoty těchto gradientů jsou dány minimální velikostí struktur. K diskretizaci je dále možno užít metodu konečných prvků, metodu hraničních prvků, metodu konečných diferencí, metodu spektrálních prvků a další.

Diskretizace problému v prostorové a časové oblasti je úzce provázána. Časová diskretizace musí být taková, aby model byl schopen zachytit dynamické chování struktur, které jsou modelovány na prostorové síti. To znamená, čím menší prvek diskretizační sítě, tím menší struktury simulujeme a tím kratší časový krok musíme použít. Ten přímo souvisí s rychlostí změn těchto nejmenších struktur.

V současnosti jsou k dispozici pro řešení N-S rovnic tři metody. Je to jednak přímá numerická simulace N-S rovnic (DNS), kdy řešíme problém v prostoru i v čase, Reynoldsova formulace pro řešení středních polí v prostoru (RANS) a kombinace obou přístupů, kdy simulujeme velké víry, a malé struktury modelujeme pomocí Reynoldsových rovnic (LES). Výsledek získaný pomocí jednotlivých přístupů v daném bodě prostoru: RANS je konstanta, Metoda DNS poskytne přesný časový průběh a výsledkem metody LES je vyhlazená křivka.

Výběr metody matematického řešení pro konkrétní úlohu je obvykle předurčen praktickými hledisky. DNS přichází v úvahu pouze v případě, že úloha je charakterizována jednoduchou geometrií, Reynoldsovo číslo je velmi nízké a současně máme k dispozici potřebné hardwarové vybavení. Při řešení naprosté většiny praktických inženýrských úloh se můžeme spokojit s přístupem RANS, pouze ve výjimečných případech lze aplikovat metodu LES, metoda DNS je využívána pro speciální úlohy výzkumného charakteru.

Okamžité stavy proudového pole nestlačitelné tekutiny jsou úplným způsobem popsány soustavou N-S rovnic doplněných o rovnici kontinuity. Řešení těchto okamžitých stavů je pro praktické případy z různých důvodů stěží aplikovatelné, proto se používá úprava matematického modelu pro výpočet statisticky středních stavů. Reynolds již roku 1894 formuloval příslušné rovnice, které jsou po něm nazvány. Tekutinový systém ve stavu turbulence mění neustále v čase svou strukturu. Přesto pro popis turbulentního proudění existují statické modely, které využívají statistického popisu pomocí statistických momentů. Jedná se o modely založené na Reynoldsových rovnicích, v literatuře jsou označovány jako RANS modely. Pracují s rozumnou přesností pro inženýrské úlohy. Jednou z klasických metod modelování Reynoldsových napětí je „hypotéza turbulentní vazkosti“ (angl.: turbulent-viscosity hypothesis), kterou roku 1877 zavedl Boussinesq. Tato metoda využívá analogii s Newtonovým zákonem pro vyjádření tečných napětí v tekutině. Metoda využívá algebraickou rovnici pro řešení Reynoldsových napětí. Zavádí se pojem turbulentní viskozity. Turbulentní viskozita je vlastnost proudění (nikoliv kapaliny), je obecně funkcí polohy a času. Složitější modely pracují s transportními rovnicemi pro různé turbulentní veličiny. I v těchto modelech je však používán koncept turbulentní viskozity podle Boussinesqova předpokladu. Nejjednoduššími modely využívajícími transportní rovnice jsou tzv. jednorovnicové modely. V těchto modelech je řešena transportní rovnice pro jistou turbulentní veličinu (obvykle kinematickou energii), další turbulentní veličina (obvykle měřítko turbulence) je získáno z algebraického vztahu.

Složitější model jsou „dvourovnicové modely“. Zde jsou řešeny dvě transportní rovnice pro dva skaláry charakterizující turbulentní proudění. Těmito skaláry může být např. kinetická energie a rychlost disipace. Tensor Reynoldsových napětí je potom zpravidla počítán při použití Boussinesqovy hypotézy

z gradientů rychlosti a turbulentní viskozity. Ta je vyhodnocena z hodnot dvou skalárů získaných z transportních rovnic. Jedním z nejnámějších a v inženýrské praxi často používaným modelem je $k - \epsilon$.

8.3. Výběr modelu turbulence a jeho konkrétní podoba s odůvodněním výběru

Model učebny vyžaduje zpracování mnoha simulací. CFD je přijatelný prostředek, protože je široce dostupný. Přednostně je nutné vybrat model turbulence vhodný pro použití na výpočet proudění ve vnitřním prostředí budov. Konkrétně hlavním cílem bylo najít odpovídající model pro popis výměny vzduchu v místnosti (obraz proudění v místnosti). Některé modely nefungují s dostatečnou přesností v oblasti u stěny, což by pro aplikaci na proudění ve třídě tolik nevadilo, ale nefungují přesně např. v malých rychlostech proudění.

Rovnice metody časového středování (RANS) představují transportní rovnice pouze pro střední veličiny proudění vzduchu se všemi měřítka modelované turbulence. Přístup RANS byl použit ve většině stávajících výpočtů CFD s využitím modelů turbulence, jako jsou standardní model $k - \epsilon$ a jeho varianty, standardní model $k - \omega$ a jeho varianty a Reynoldsův napěťový model (RSM = Reynolds Stress Model).

Standardní model $k - \epsilon$ je polo empirický model, který platí pouze pro plně turbulentní proudění. Model je založen na přenosových rovnicích pro turbulentní kinetickou energii, k , a její disipační rychlost, ϵ .

(Pozn. rychlost disipace turbulentní kinetické energie ϵ (Energy dissipation rate ϵ). Turbulentní proudění se skládá z vírů různých velikostí a rozsah velikostí se zvyšuje se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem. Kinetická energie klesá působením interakčních sil mezi víry – energie klesá z velkých na malé víry. Pro víry o velmi malém měřítku platí, že kinetická energie těchto vírů se přemění na teplo (disipuje) kvůli viskózním silám. Rychlost disipace energie je parametr pro určení množství energie, která se ztratí působením viskózních sil v turbulentním proudění – konec poznámky).

Z těchto hodnot se vypočítá turbulentní viskozita. Zásadním předpokladem modelu je, že turbulentní viskozita je izotropní (všech směrech stejná), tedy poměr mezi Reynoldsovým napětím a deformací je ve všech směrech stejný. Formulace modelu $k - \epsilon$ je odvozena z hypotézy vysokého Reynoldsova čísla. Bylo prokázáno, že standardní model $k - \epsilon$ je vhodný pro proudění ve vnitřním prostředí jen částečně. Určité charakteristiky proudění vzduchu v místnostech, například vytváření oblastí s velmi nízkými rychlostmi proudění a tedy nízkými Reynoldsovými čísly, zejména v blízkosti hranic stěny, však vyžadují použití přesnějších modelů. Tento požadavek vedl k vytvoření přizpůsobených modelů turbulence $k - \epsilon$, u kterých se očekává, že budou pro tyto oblasti proudění přesnější. Tyto modely se nazývají model s nízkým Reynoldsovým číslem (LR $k - \epsilon$) a model RNG $k - \epsilon$.

Model RNG $k - \epsilon$ je odvozen pomocí statistické metody renormalizace grup (RNG). Zahrnuje teorii pro velká měřítka, ve kterých jsou účinky malých měřítek zastoupeny přizpůsobenými přenosovými součiniteli.

Základní charakteristikou modelu RNG $k - \epsilon$ je, že se jedná o analyticky odvozený diferenciální vztah pro efektivní viskozitu, který odpovídá vlivu nízkého Reynoldsova čísla. Tato funkce v kombinaci s vhodnou úpravou oblastí blízkých stěn činí model RNG $k - \epsilon$ přesnějším a spolehlivějším pro širší třídu proudění vzduchu v místnosti než standardní model $k - \epsilon$. Z těchto důvodů byl tento model vybrán. Matematické vztahy a okrajové podmínky vybraného modelu RNG $k - \epsilon$ jsou uvedeny v příloze č. 3 na str. 133.

Tato část osmé kapitoly byla vytvořena na základě následujících zdrojů:

(Malalasekera H. K., 2007), (Loomans, 1998-2), (Loomans, 1998-2 str. 3), (Zácha, 2018)

(Stamou, a další, 2006), (Jahoda, 2016), (Vlček, a další, 2013), (Rouaud, a další, 2002)

(Cheong, a další, 2003), (Fluent Inc., 1998), (Posner, a další, 2003), (Wilcox, 1988)

(Gebremedhin, a další, 2003), (Orszag, 2018), (Zácha, 2018), (Wilcox, 2006)

(Brown, a další, 1974), (Piomelli, 2001), (Zhang, a další, 2000), (Wang, a další, 2012)

8.4. Fáze preprocesorová, popis obsažených prvků, tvorba dat

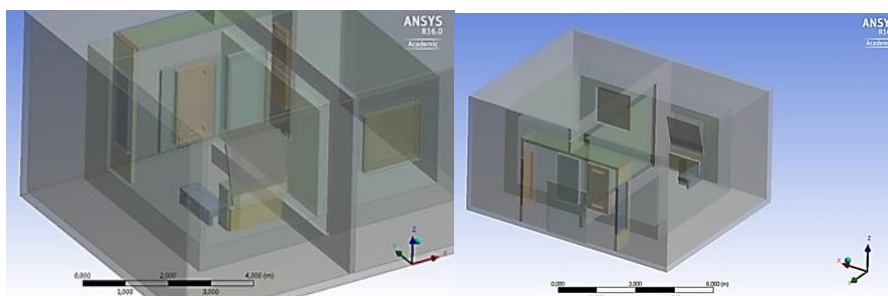
Byla zpracována data pro konkrétní učebnu, ve které bude probíhat jev proudění. Její rozměry a vlastnosti jsou přizpůsobeny prostorovým možnostem laboratorní komory.

Byl navržen zjednodušený model učebny s jedním oknem, dveřmi a školní lavice s modelovou osobou (lidským simulátorem). Model prezentuje různé lokace v místnosti s ohledem na tradiční prvky učeben a seminárních místností, a to pozice u okna a u dveří a ve větší vzdálenosti od okna.

Je nutné nahradit spojitě prostředí (kontinuum) systémem diskretních bodů, v nichž se soustředí fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti příslušného místa kontinua tak, aby bylo výsledné řešení tímto procesem co nejméně ovlivněno. Diskretizací se rozumí náhrada spojitěho prostředí (kontinua) systémem diskretních bodů. Diskretizací se nejen při popisování proudění myslí zpravidla nutnost řešení parciálních diferenciálních rovnic převádí na řešení obyčejných diferenciálních, popřípadě algebraických rovnic.

Fluent má dva typy zón, kterým je možné nastavit určité vlastnosti. Každá část objemu v modelu tedy musí mít nastaveny všechny vlastnosti, ať už se jedná o hraniční podmínky či materiálové podmínky (8.1 Obr.).

Model je vytvořen v kartézské soustavě souřadnic jako trojrozměrný (3D) model. Rozměry komory a exteriérového prostoru odpovídají skutečným rozměrům laboratoře. Konkrétní rozměry lidského simulátoru (náhrady člověka v modelu) jsou uvedeny později.



8.1 Obr. Rozdělení kontinua do bloků (autor)

Půdorys komory (interiérového prostoru) byl namodelován o rozměrech 3,1 m * 4,4 m a o světlé výšce 2,85 m. Okenní otvor má rozměry 1,5 m x 1,5 m. Lavice byla namodelována o rozměrech 0,5 m x 1,2 m. Obtížnost zadávání je definovaná tím, že celá komora musí být vyplněna tekutinou (vzduchem), kdy všechny předměty umístěné v komoře musí být obtékány vzduchem.

Model umožňuje si vybrat geometrické umístění uživatele místnosti a předmětu kolem něho – lavice. Parametrické zadání předmětu do modelu umožňuje ovlivňovat vzájemné vzdálenosti mezi jednotlivými předměty, je možné s nimi pohybovat, a tím dosáhnout všech předpokládaných variant umístění.

Prvky jsou charakterizovány svým skupenstvím, typem materiálu, který určuje jejich vlastnosti (8-1 Tab.).

8-1 Tab. Materiálové parametry modelu (materiálové charakteristiky U) – (autor)

Skutečný prvek	Modelový prvek	Součinitel prostupu tepla (W/m ² K)
Zasklení	Pevná látka sklo	1,2
Lavice	Pevná látka, dřevo	-
Volný objem	Kapalina, vzduch	-
Otopné těleso	Pevná látka, kov	-
Stěna	sádrovláknité desky, dřevěná nosná konstrukce tepelná izolace 240mm	0,134
Mezikomorová příčka	dřevěná konstrukce, tepelná izolace 160mm	0,2
dveře	dveře	1,2
strop	Pevná látka	0,103
podlaha	Pevná látka	0,132

8.4.1. Prvky podstatné pro provoz učeben s přirozeným větráním a odůvodnění výběru:

- okno otevírací (umožněné vyklopení, různé stupně otevření), okno je klíčovým parametrem pro přirozené větrání budov, a zároveň platí, že všechny učebny musí být přímo větratelné
- dveře – potenciální větrací otvor využitelný například pro provětrávání
- otopné těleso – nejčastější systém vytápění učeben v ČR
- osoba (lidský simulátor) – počet osob významně ovlivňuje vnitřní ovzduší a vnitřní prostředí třídy
- lavice a židle – jednotlicí prvek pro učebny
- exteriérové klimatické podmínky – důležité pro simulaci exteriérových podmínek, kdy se v ČR řeší především zimní varianta

8.4.2. Náhrada člověka v modelu

Přenos tepla mezi lidským tělem a vnitřním prostředím budov je složitý proces. Detailním rozбором těchto rovnic, kdy dochází k přenosu tepla radiací a konvekcí a výpočtu přesných součinitelů přenosu tepla se zabývají mnohé studie, mj. ta od (Croitoru, 2011). Pro přesný výpočet jsou zde použity uživatelsky definované funkce, které zohledňují také disipaci tepelné energie během nádechu a výdechu.

Obecně lze říci, že skutečná charakteristika lidského těla a proudění kolem něj – geometrický model osoby, je ovlivněna produkcí metabolického tepla, tepelnou izolací oděvem, fyzickou činností a dýcháním. Všechny tyto faktory také ovlivňují okolní vnitřní prostředí. Pro účely tohoto modelu byla použita konvekce a člověk byl namodelován jako lidských simulátor (hranol o daných rozměrech), protože pro účely simulace není podstatná detailní geometrie osoby. Je uvažována produkce tepla a teplota vydechaného vzduchu. Jako povrchová teplota lidského simulátoru byla zvolena 37 °C.

Rozměry lidského simulátor byly určeny na základě literatury podle (Srebric, a další, 2008).

Lidský simulátor (human simulator HS)

Lidský simulátor má tvar hranolu o rozměrech 0,35*0,4*1,1 m, a jedná se o ověřenou náhradu osoby pro potřeby simulací.

Plocha simulátoru činí: $A = (2 \cdot 0,35 \cdot 1,1) + 2 \cdot (0,4 \cdot 1,1) + (2 \cdot 0,35 \cdot 0,4) = 0,77 + 0,88 + 0,28 = 1,93 \text{ m}^2$

Průměrná plocha dospělého člověka činí 1,8 m²

Objem lidského simulátoru činí: $V = 0,35 \cdot 0,4 \cdot 1,1 = 0,154 \text{ m}^3$

V reálném světě se průměrná emise tepla na osobu liší podle pohlaví, kdy se jako průměr uvažuje hodnota 100 W, kdy hodnota pouze pro muže je 120 W, a hodnota pouze pro ženy je 97 W. Pro osoby, které tiše sedí (studenti), se uvažuje hodnota 1 met = 58,2 W/m².

Rozměry otopného tělesa byly nadefinovány takto: 0,6 * 1,5 * 0,2 m

V následující tabulce (8-2 Tab.) je uveden přehled všech prvků, které jsou v modelu užity, a jejich variabilita.

8-2 Tab. Přehled prvků modelu a jejich variabilita (autor)

Prvek modelu	Variabilita prvku	Variabilita prvku
Okno	otevřeno	zavřeno
Okno	Úhel vyklopení okna	0°; 15°; 30°; 45°
otopné těleso	vypnuto	zapnuto
Uživatel místnosti	nepřítomen, netopí	přítomen, topí
Venkovní podmínky	Zimní podmínky	Letní podmínky
Libovolné umístění uživatele a stolu	Vzdálenost podle geometrie místnosti	Vzdálenost podle geometrie místnosti

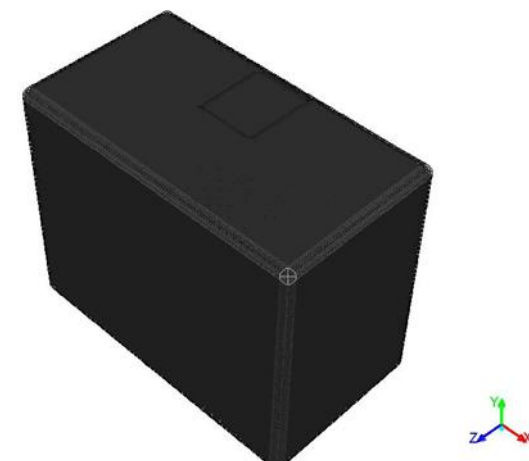
V následující tabulce (8-3 Tab.) je uvedeno rozložení povrchových teplot, které tvoří okrajové podmínky simulací.

8-3 Tabulka povrchových teplot (autor)

K	°C	umístění
261,15	-12	Exteriérové stěny
310,15	37	Lidský simulátor
288,15	15	Interiérové stěny
343,15	70	Otopné těleso

Pro pozorování fyzikálních jevů probíhajících ve větším objemu je nutné stanovit si priority ohledně části objemu, která je pro danou problematiku důležitá. Detailnější rozlišení se provádí např. pro tzv. uživatelskou zónu (pobytovou zónu osob), kdy se simulace do větších podrobností řeší v místě zajímavém pro pozorování. Detaily jsou řešeny zahuštěním tzv. zjemněním sítě.

Pro úspěch simulace bylo nutné správně vybrat vhodné rozšířování modelu (resp. velikosti buněk sítě). Podle typu problému, který byl k nasimulování (radiace, konvekce, typ proudění), byl vybírán vhodný typ rozšířování, protože některé druhy rozšířování nejsou kompatibilní s modelováním vybraného problému. Dalším limitujícím prvkem pro rozšířování je geometrické uspořádání modelu. Na hranicích styku míst s výrazně odlišnou geometrií je občas komplikované docílit vytvoření kvalitní sítě. Zvýšení hustoty sítě sebou nese zvýšenou přesnost výpočtu, ale také delší dobu simulace, takže přesnost a rychlost výpočtu jsou proti sobě. Přesnost závisí na celkovém počtu prvků (buněk) a tvaru těchto buněk. Rychlost výpočtu každé iterace lineárně roste s počtem prvků. Pro daný typ konvekce byl vybrán tzv. cutcell mesh (8.2 Obr.). Počet buněk v modelu byl 661252.



8.2 Obr. Použitý mesh v modelu (autor)

Cíl řešení (vhodnost programu CFD pro simulaci proudění a lokálních stavů sledovaného objemu) bylo nutno ověřit na dílčích modelech, zda výpočet funguje v jednoduchých případech.

Uvažované případy

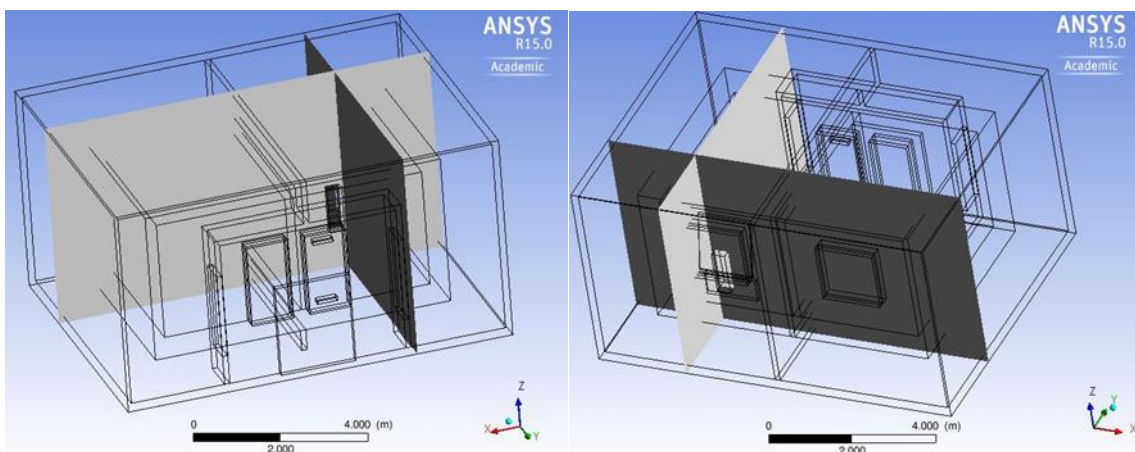
- a) prázdná učebna, zavřené okno
- b) s osobou, zavřené okno
- c) s osobou, okno pootevřeno
- d) s osobou, celé okno otevřeno

Experimenty měly ověřit, zda byl uskutečněn vhodný výběr prvků a zda byl vhodně vybrán model turbulence. K nastavení vlastního výpočtu slouží modul SETUP nebo SOLUTION. Před spuštěním modulu SOLVER bylo nutno vybrat vstupy a výstupy a určit u nich řídicí veličiny a jejich hodnoty. Dále jsou určeny referenční hodnoty (teplota, hustota vzduchu). Na závěr je možné nastavit počet iterací a podmínky konvergence modelu.

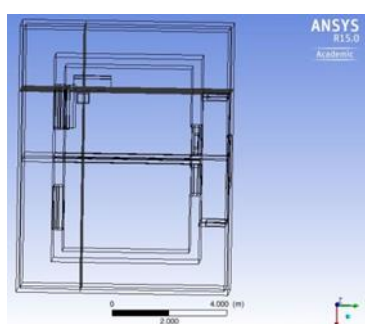
Před provedením simulací bylo provedeno několik pokusů s počtem iterací jednotlivých modelů a délkami výpočetních kroků. U modelu $k - \epsilon$ byla potřeba přibližně počet iterací 100. Modely RNG $k - \epsilon$ potřebovaly pro dosažení konvergence (nebo stavu, kdy nedocházelo k výrazným změnám veličin) více iterací. Z tohoto důvodu u nich byl maximální počet podle potřeby zvětšen na 300 – 500. Důležitý parametr, sledovaný v průběhu numerického řešení, je průběh „reziduálních veličin“ definujících chybu výpočtu jako střední kvadratickou odchylkou jednotlivých počítaných veličin (v tomto případě reziduálních složek rychlosti v_x , v_y , v_z a energie). Uživatel definuje přesnost výpočtu jako hranici pro konvergenci úlohy. Pro běžné inženýrské úlohy se doporučuje přesnost $1 \cdot 10^{-4}$.

8.5. Fáze postprocesorová (vyhodnocení proudění pro třídy bez nuceného větrání)

Další důležitou součástí počítačové simulace je vyhodnocení jejích výsledků. K vyhodnocení a grafickému zobrazení slouží program ANSYS CFD Post. Zde je možné vytvářet konturované obrázky počítaných veličin, vektorového zobrazení veličin, vytvářet grafy a dopočítávat další veličiny odvozené z veličin počítaných.

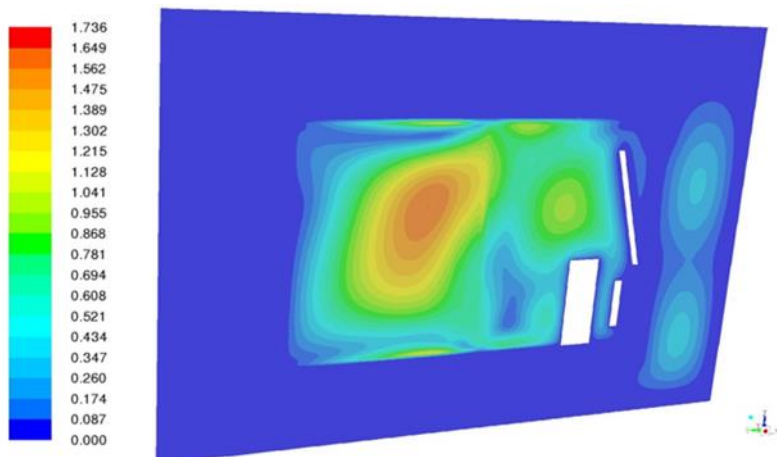


8.3 Obr. Některé vyhodnocovací řezy X a Y zobrazené společně – pohledy z boků (autor)

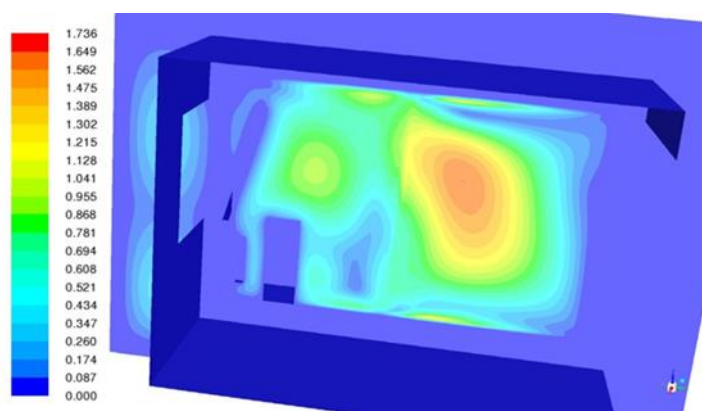


8.4 Obr. Některé vyhodnocovací řezy X a Y zobrazené společně – pohled zeshora (autor)

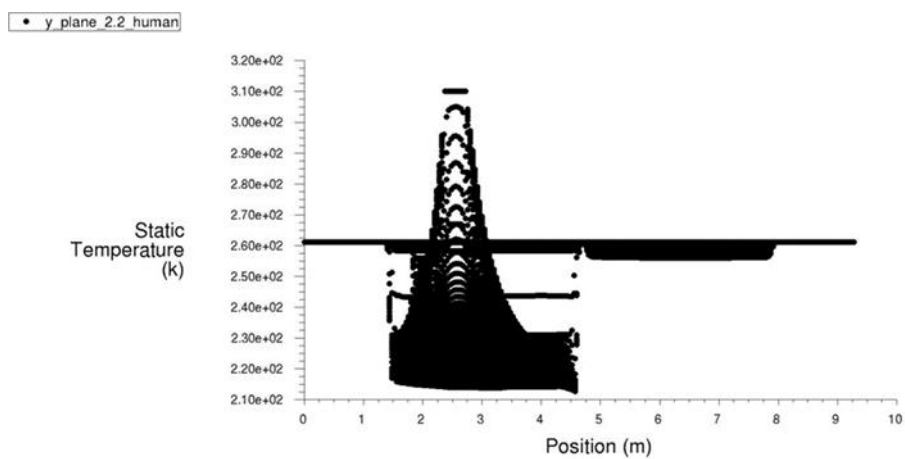
Výsledkem simulace je komplexní 3D obraz teplotního a rychlostního pole (popř. vektorů rychlosti) v libovolných řezech. Na obrázcích 8.3 a 8.4 Obr. je vidět vytvořený model s vybranými rovinami. Na obrázku 8.8 Obr. je vidět rozložení teplotního pole v podélném a příčném řezu místnosti. Na obrázku 8.9 Obr. je graficky znázorněno rozložení rychlostního pole v příčném řezu. Na obrázku 8.13 Obr., znázorňujícím detailní rychlostní profil, je jasně patrné proudění v komoře. Vnitřní vzduch je vydechován podle typu úlohy do okolního prostředí otevřenými dveřmi nebo se vrací zpět stejným okenním otvorem do externího prostoru. Toto proudění je dáno rozdílnými teplotami uvnitř a vně místnosti. Výsledky numerické simulace jsou vyhodnoceny ve dvou typech řezů (Řez X, Řez Y – 8.3 a 8.4 Obr.). Na 8.11 Obr. je zobrazeno vektorové pole rychlostí v řezech 1 a 2. Z výsledků je patrné, že je zobrazena pouze polovina výpočetní oblasti. V počáteční fázi vytváření simulací bylo ověřeno několik podmínek určujících vhodnost parametrů modelu jako kontrola ve vztahu k reálným podmínkám v komoře. Na 8.5 a 8.6 Obr. je pomocí kontur pole proudění ověřen trend rozložení proudění v komoře a okolním exteriéru, na 8.8 Obr. působení osamocené lidského simulátoru a rozložení teplot na obr. 8.7 Obr. Prostorový model komor s gradientem rychlosti okolo okna je na obr. 8.9 Obr.. Rozložení teplot v počátku experimentu je ověřeno na obr. 8.10 Obr.. Výsledky skutečných komplexních simulací jsou zobrazeny na obr. 8.11, 8.12, 8.13 a 8.14 Obr..



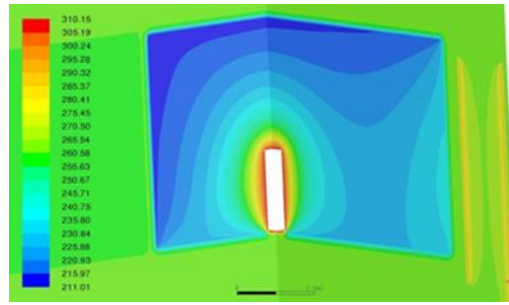
8.5 Obr. Vyplněné kontury rychlosti proudění v [m/s] zobrazené na rovině X (autor)



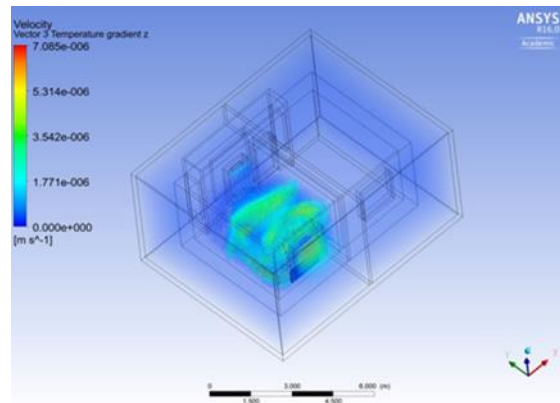
8.6 Obr. Vyplněné kontury rychlosti proudění v [m/s] zobrazené na rovině X a na doměně lidského simulátoru pro vyklopené okno ve 2 rovinách (autor)



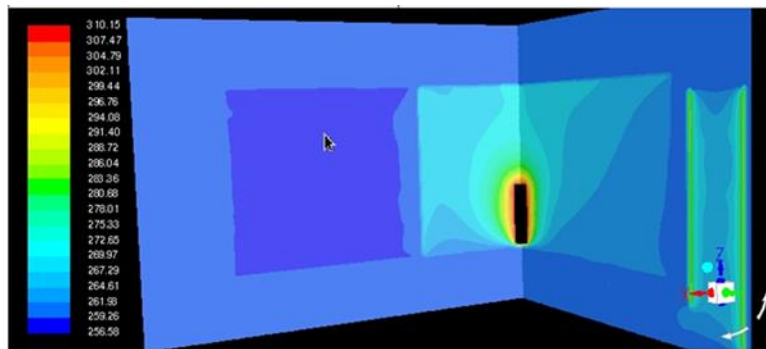
8.7 Obr. Rozložení velikosti teplot v [K] v řezu při působení lidského simulátoru v chladné učebně (autor)



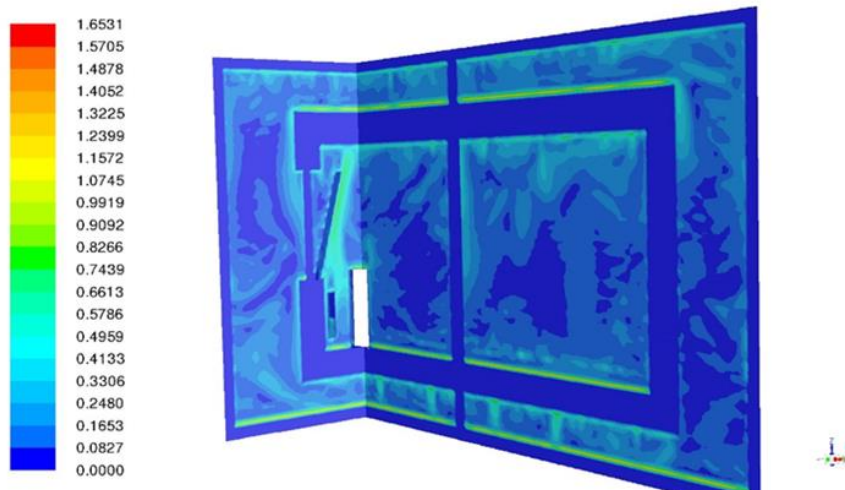
8.8 Obr. Ověření rozložení teplot v [K] při působení lidského simulátoru v chladné místnosti, zobrazení vyplněných kontur teploty (autor)



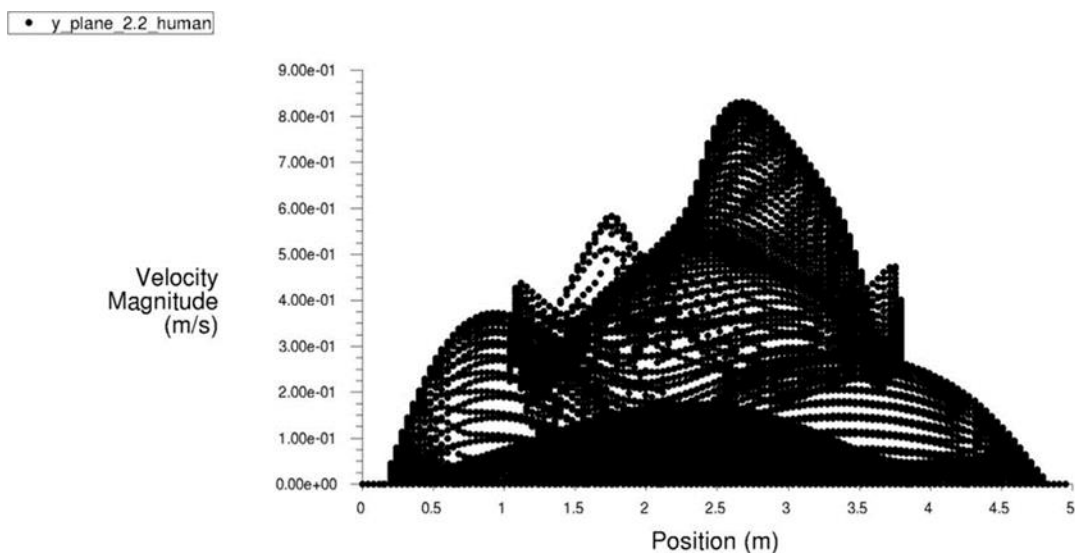
8.9 Obr. Prostorový model uspořádání dvou komor, znázornění vektorového pole rychlostí v [m/s] v okolí okna v komoře s experimentem (autor)



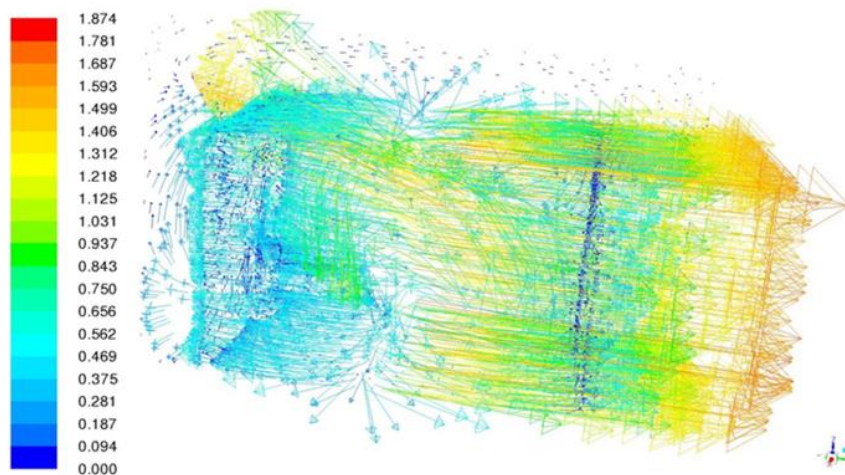
8.10 Obr. Rozložení teplot v okolních prostorech na počátku experimentu v [K], zobrazení ve 2 kolmých rovinách (autor)



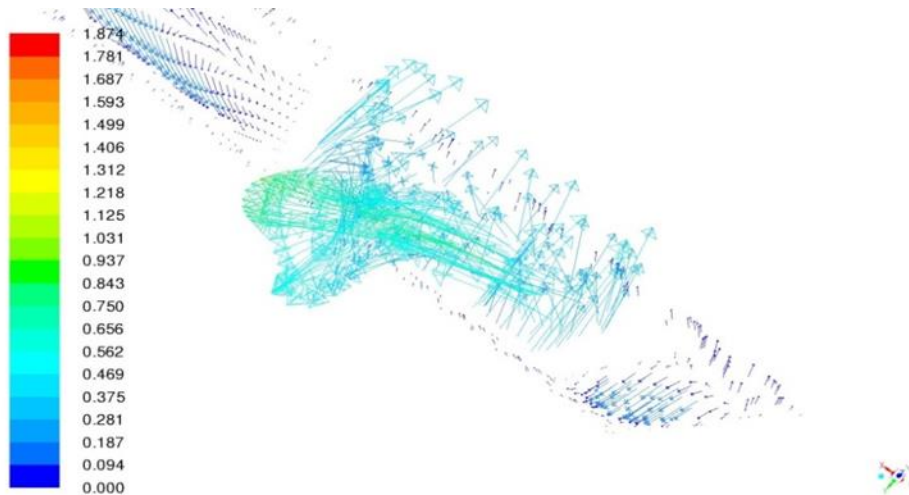
8.11 Obr. Vyplněné kontury rychlostí proudění v [m/s] uvnitř a vně komory (autor)



8.12 Obr. Rozložení velikostí rychlosti proudění v [m/s] ve svislé rovině $Y=2,2$ (autor)



8.13 Obr. Vektory rychlosti proudění v [m/s] zobrazené na rovině (řezu) X a v doméně lidského simulátoru (autor)



8.14 Obr. Detail rozložení vektorů rychlosti proudění v [m/s] v rovině (řezu) Y (autor)

K tvorbě této části osmé kapitoly byly využity následující zdroje:

- (Ning, a další, 2016), (Fan, 2010), (Novoselac, a další), (Software Ansys 16. 2. 3 Help)
 (Ansys 16, 2. 3 Help), (Olmedo, a další, 2012), (Hayashi, a další, 2002)
 (Srebric, a další, 2008), (Ansys Fluent Inc.), (Rongguang Jia, 2015), (Ansys Fluent, 2006)
 (Engen, 2005), (Ansys Fluent Help, 2009), (Ansys Inc., 2010), (Fluent, Ansys, 2000)
 (Sutikno Wirogo, 2004), (Fluent User Services Center, 2006), (Chawner, 2011)
 (Zelenský, a další, 2013), (Zimmermann, a další, 2014), (Béghein, a další, 2005)
 (Wang, a další, 2012), (Viček, a další, 2013), (Jahoda, 2016)

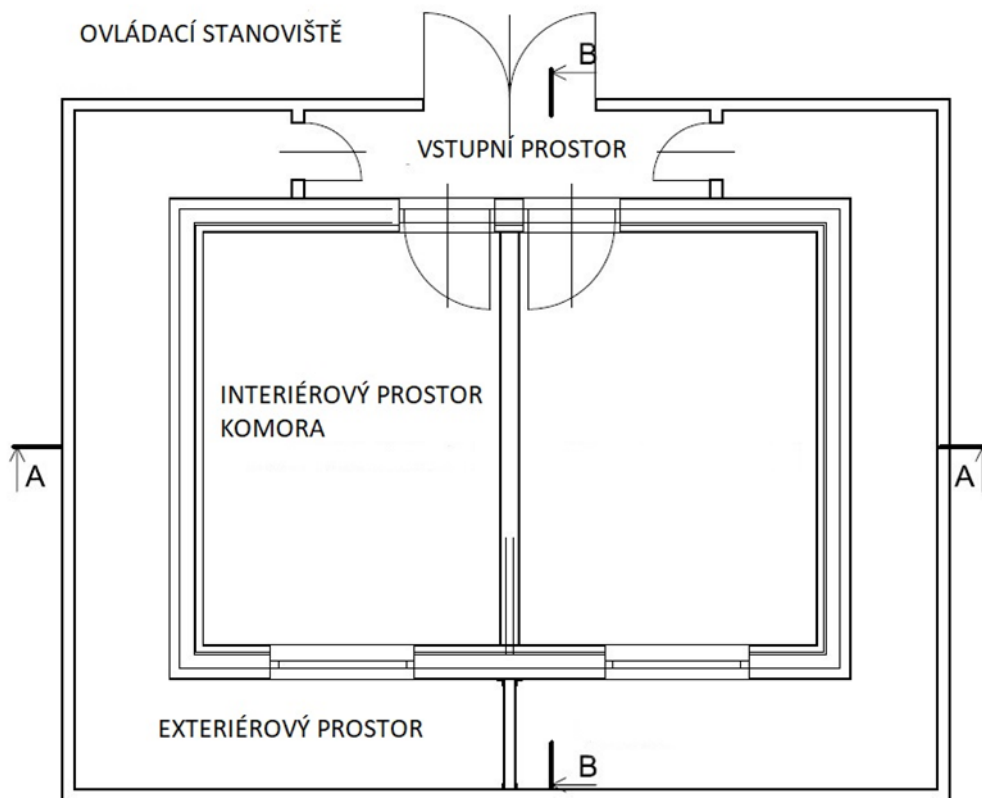
9. Experimenty

Experimenty byly provedeny za účelem ověření funkčnosti modelu a jeho výstupů. V experimentech byla osoba nahrazena tepelným modelem člověka (TMC) a vnitřní prostředí třídy bylo nahrazeno vnitřním prostředím laboratoře s řízenými podmínkami.

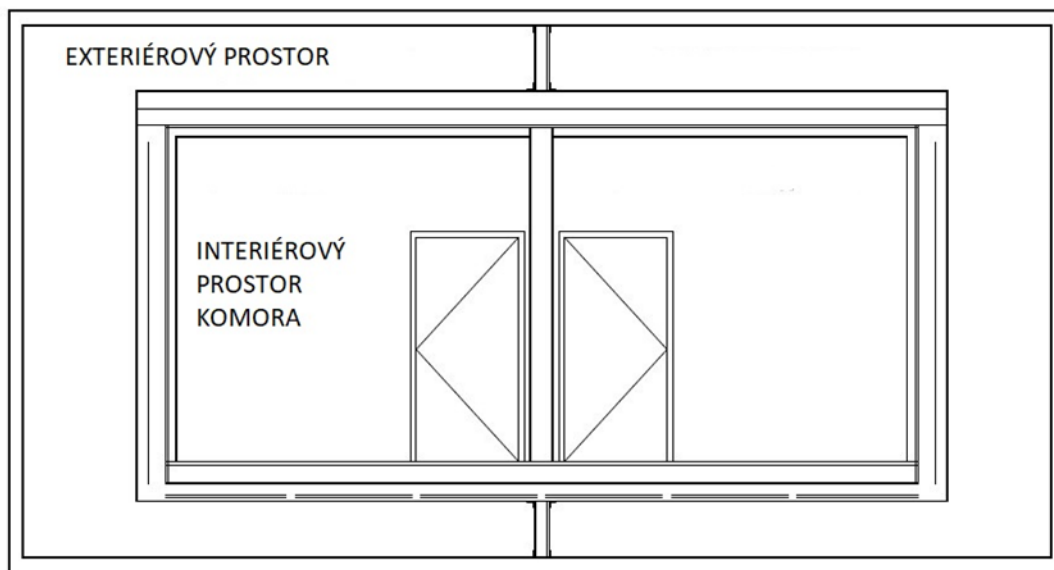
9.1. Uspořádání experimentů (konfigurace)

9.1.1. Použité vybavení

Komplexní zařízení se nazývá Laboratoř vnitřního prostředí s vybavením pro vytápění a chlazení interiéru a exteriéru (viz 9.1 a 9.2 Obr.) a s měřicí technikou pro stanovení parametrů vnitřního prostředí a společně s tepelným modelem člověka tvořily základní zařízení v uspořádání experimentů. Laboratoř se skládá ze dvou klimatických komor s příslušnými oddělenými exteriérovými prostory. Byla použita pravá komora při pohledu ze vstupu do laboratoře. Zařízení zahrnovalo laboratorní ovládání teplot povrchů konstrukcí interiéru. Ovládací stanoviště je umístěno před vstupem do laboratoře.



9.1 Obr. schéma laboratoře – půdorys – interiérový a exteriérový prostor (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, 2012)- úprava autor



9.2 Obr. schéma laboratoře – řez – interiér a exteriér (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, 2012), úprava autor

9.1.2. Klimatická komora s řízeným vnitřním prostředím

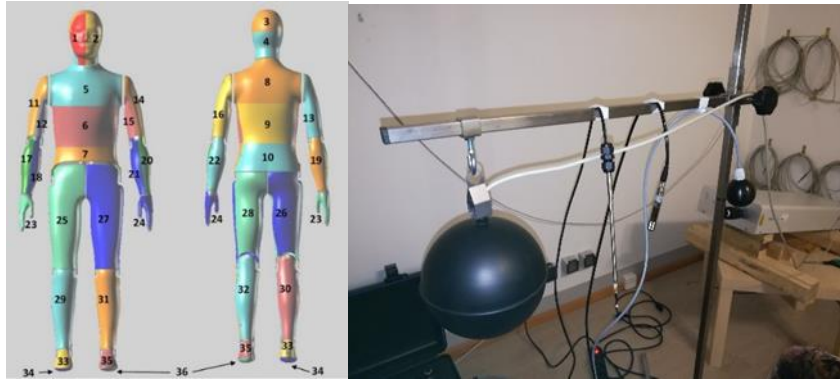
Komora je opatřena jedním oknem a dveřmi v protějších stěnách. Komora je vybavena klimatizací v exteriérovém prostoru, který je možno vytápět a chladit prostřednictvím systému měření a regulace klimatizace. Stěny exteriérového prostoru jsou monitorovány čidly povrchové teploty. Umístění čidel je volitelné. Interiér je možno regulovat zabudovaným stropním a podlahovým vytápěním a pro urychlení lze použít přenosné zdroje tepla (elektrická otopná tělesa) či chladu (vodní rohože). V případě školní učebny vybavení tvoří lavice a židle. K zaznamenávání dat slouží sběrač dat a ústředna Datataker DT85-3.

K měření teplot vzduchu, měření teplot kulového teploměru a měření povrchových teplot vybraných povrchů byly použity:

- teplotní sondy klimatické komory – kabelové snímače teploty vzduchu Pt 1000 – čidla TG8-40
- teplotní sondy klimatické komory – kabelové snímače teploty povrchů (odporové snímače Pt 1000) byly aplikovány spolu s termovodivou pastou – čidla TG7
- teplotní sondy klimatické komory – kulový teploměr - LM150/TG8-70
- teplotní sondy TMČ (čidla teploty vzduchu, malý kulový teploměr) + čidlo rychlosti proudění vzduchu - termický anemometr TSI 8455 o měřicím rozsahu 0 – 2,5 m/s
- čidlo rychlosti proudění vzduchu – termické anemometrické všesměrové čidlo o měřicím rozsahu 0 - 5 m/s Ahlborn s ústřednou Almemo 710

9.1.3. TMČ – tepelný model člověka

Chování člověka v prostředí je reprezentováno složitým zařízením s názvem TMČ. Tepelný model lidského těla je rozdělen na 36 zón viz obr. 9:3. Každá zóna má nastavitelnou povrchovou teplotu. Dále je na TMČ napojeno několik čidel prostředí – 2 čidla teploty vzduchu, malý kulový teploměr a čidlo rychlosti proudění vzduchu. TMČ je vhodný k měření tepelného komfortu a kvality vnitřního ovzduší ve vnitřním prostředí budov. Je také možné ho používat k optimalizaci vnitřního prostředí.



9.3 Obr. Jednotlivé zóny TMČ - (Thermetrics, 2014)

9.4 Obr. Vybraná ambientní čidla TMČ (zleva kulový teploměr laboratorní, čidlo RPV a teplotní čidlo s kulovým teploměrem TMČ (fotografie autora)

Při přípravě experimentu byla zvažována možnost použít stopovací plyn. V příloze č. 4 na str. 135 je uveden experiment, který ukazuje rozdílné vlastnosti stopovacího plynu, který se používá pro simulaci prostředí znečištěného CO₂, a mohl být při experimentech eventuálně použit. Nekorektnost se skutečným plynem (CO₂) mne vedla k implementaci fyzikálně relevantní metody, která stav prostředí v experimentální místnosti posuzuje z hlediska dosažené výměny vnitřního vzduchu. Tato metoda spočívá v měření teplot a rychlostí proudění vzduchu jako objektivních fyzikálních veličin.

9.2. Metody a postupy

Pro vybrané případy v předem definovaných bodech se měří pole prostředí – teploty a rychlosti proudění vzduchu. Experimentální místnost simuluje pětinný segment učebny. Učebny jsou obvykle určeny pro 30 osob. Do stávající experimentální učebny by bylo možné umístit až 6 osob s vyhláškou (410/2005 Sb., změněna na 343/2009 Sb. a 465/2016 Sb.) (Český normalizační institut, 2009) požadovanou minimální podlahovou plochou pro žáka. Jedná se tedy o pětinný segment učebny.

Cílem bylo vytvořit podmínky shodné se zadanými okrajovými podmínkami simulačního CFD modelu, což vyžaduje:

- 1) regulaci povrchových teplot v komoře laboratoře a teplot v exteriéru laboratoře – uvnitř komory a v exteriéru
- 2) ovládání povrchových teplot zón TMČ v čase a řízení jeho náběhu na požadovaný stav.

9.2.1. Přípravná fáze

V komoře byly umístěny lavice, prázdná židle s TMČ do správných pozic a postaveny stojany s kabelovými čidly teplot vzduchu viz (9.5 Obr.)

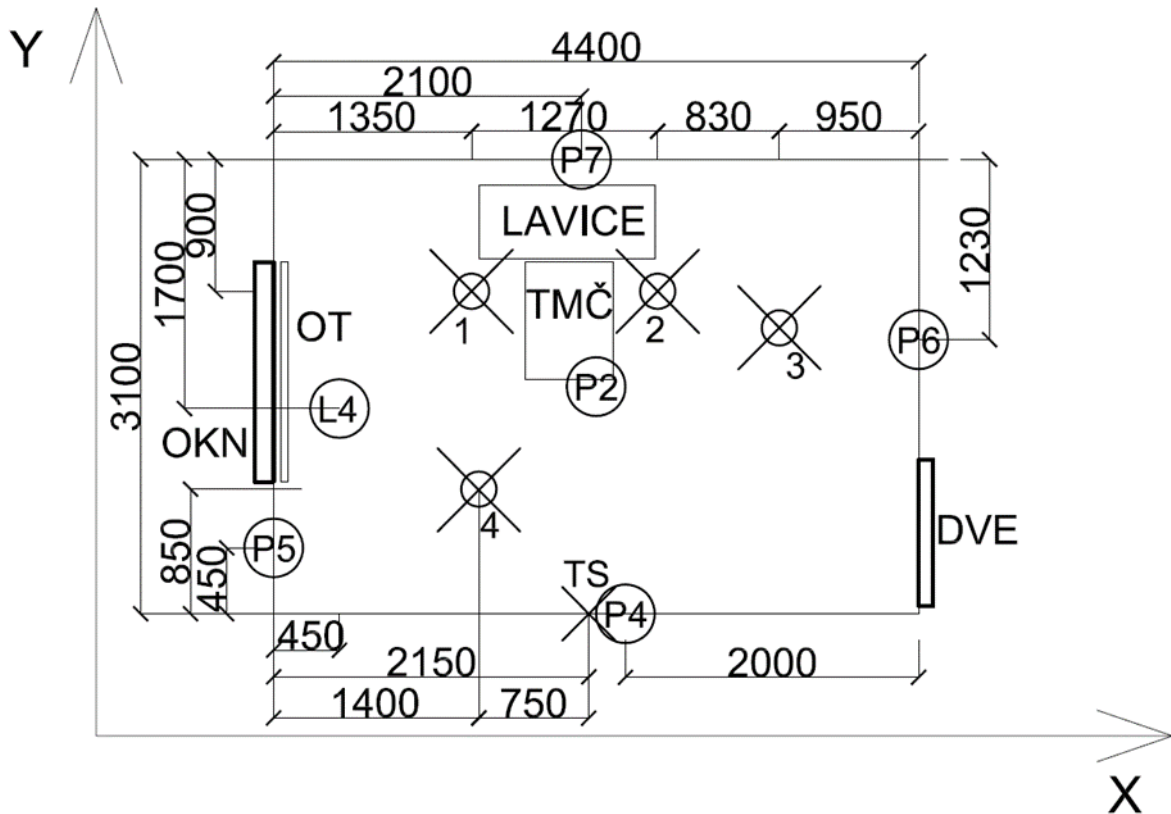
Užívaná část příslušného exteriérového prostoru komory byla vychlazena systémem klimatizace a poté byly zaznamenávány měřené povrchové teploty, teploty vzduchu a teploty v exteriéru v interiérovém prostoru prostřednictvím Datatakeru (sběrače dat) na laboratorním počítači ovládacího stanoviště umístěného před vstupem do komory.

9.3. Experimenty s otevřenými otvory

Teploty povrchů byly měřeny následujícími čidly komory. Označení pozic měření povrchových teplot bylo následující: (viz schéma).

- povrch stěny s oknem P5
- povrch stěny se dveřmi P6
- povrch stěny k exteriéru P7

- povrch stěny k sousední komoře P4
- povrch stropu P2
- povrch podlahy u okna L4



9.5 Obr. schéma experimentálního měření: stojany s čidly 1 - 4, TS – termostat, OT – otopné těleso, OKN – okno, DVE – dveře (autor)

Během měření byly rozměry okna 1,5 x 1,5 m

Rozměry dveří 0,97 x 1,97 m

Objem místnosti: $3,1 \cdot 4,4 \cdot 2,85 = 38,874 \text{ m}^3$

9.3.1. Experiment A (s vyklopeným oknem)

Předpříprava okna:

Okno je v poloze mikroventilace, do exteriérového prostoru byla umístěna lišta s provázkem, aby bylo možné okno po dosažení stanovené teploty zavřít z exteriéru bez zásahu do podmínek interiéru. Lanko je přivázáno ke klice okna, která se nachází v interiéru. K vyklopení dojde z exteriéru mechanicky tlakem na horní část zasklení, k zaklopení zpět dojde tahem za lanko pomocí lišty.

Úhel vyklopení okna $7,5^\circ$

Rozložení čidel během experimentu A je uvedeno v následující tabulce (9-1 Tab.).

9-1 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu A (autor)

Č. stojanu (umístění v místnosti)	Označení výšky umístění v experimentální místnosti	Výška nad podlahou (m)
1	1	2
2	2	1,5
3	3	1
4	4	0,5

Stojan 1: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním Tg TMČ, ambientní čidlo teploty č. 1 vzduchu TMČ, na spodním rameni čidlo rychlosti proudění vzduchu TMČ.

Stojan 2: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním kulový teploměr Tg laboratorní, ambientní čidlo teploty vzduchu č. 2 TMČ

Stojan 3: 2 ramena ve výškách 0,5 m a 2 m. Na obou ramenech čidla teploty vzduchu, na horním rameni čidlo RPV.

Stojan 4: 3 ramena o výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m – na každém rameni čidla teplot vzduchu.

Nastavení TMČ: produkci tepla výdechem člověka simulují horní neoblečenou polovinou těla TMČ s nastavením zón na 25 °C, spodní polovina těla je oblečena a je nastavena na teplotu 37 °C, která simuluje produkci tepla povrchem těla osoby.

Exteriérové podmínky: – 13,93 °C.

Experiment začne v okamžiku ustálení komory a TMČ: otopné těleso umístěno pod oknem, na termostatu 21 °C, ve vedlejší komoře je 15 °C a ve vedleším exteriérovém prostoru je 15 °C. Pro třídy je rozhodující limitní hodnota Tg, takže experiment končí v okamžiku, kdy nastane na obou kulových teploměrech Tg teplota pod 20 °C. Teploměry jsou umístěny u TMČ a na stojanu č. 2 ve výšce 1 m. Experiment je ukončen, jakmile na obou Tg bude hodnota těsně pod 20 °C.

9.3.2. Experiment B (s částečně otevřeným oknem 30°)

Předpříprava okna:

Okno je v poloze mikroventilace, do exteriérového prostoru byla umístěna lišta s provázkem, aby bylo možné okno po dosažení stanovené teploty zavřít z exteriéru bez zásahu do podmínek interiéru. Lanko je přivázáno ke klíče okna, která se nachází v interiéru. Lanko je nataženo o délce odpovídající úhlu otevření okna 30°. Okno je proti pohybu a zavření během experimentu zajištěno vkládacím prvkem. K otevření dojde z exteriéru mechanicky tlakem na zasklení, kdy je okno do požadované polohy otočeno na nataženém lanku. K zavření okna zpět dojde tahem za lanko pomocí lišty za současného odstranění vkládacího prvku.

Úhel otevření okna 30°

Rozložení čidel během experimentu B je uvedeno v následující tabulce (9-2 Tab.).

9-2 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu B (autor)

Č. stojanu (umístění v místnosti)	Označení výšky umístění v experimentální místnosti	Výška nad podlahou (m)
1	1	2
2	2	1,5
3	3	1
4	4	0,5

Stojan 1: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním Tg TMC, ambientní čidlo teploty č. 1 vzduchu TMC, na spodním rameni čidlo rychlosti proudění vzduchu TMC.

Stojan 2: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním kulový teploměr Tg laboratorní, ambientní čidlo teploty vzduchu č. 2 TMC.

Stojan 3: 2 ramena ve výškách 0,5 m a 2 m. Na obou ramenech čidla teploty vzduchu, na horním rameni čidlo RPV.

Stojan 4: 3 ramena o výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m – na každém rameni čidla teploty vzduchu.

Nastavení TMC: produkci tepla výdechem člověka simulují horní neoblečenou polovinou těla TMC s nastavením zón na 25 °C, spodní polovina těla je oblečena a je nastavena na teplotu 37 °C, která simuluje produkci tepla povrchem těla osoby.

Exteriérové podmínky: (-10,62) °C.

Experiment začne po ustálení komory a zón TMC na požadovanou teplotu: otopné těleso pod oknem, na termostatu 21 °C, ve vedlejší komoře je 15 °C a ve vedlejším exteriérovém prostoru je 15 °C. Pro třídy je rozhodující hodnota Tg, takže experiment trvá tak dlouho, dokud nenastane na obou kulových teploměrech Tg teplota pod 20 °C. Mám Tg u TMC a Tg na stojanu č. 2 ve výšce 1 m. Experiment končí, jakmile bude na obou Tg hodnota těsně pod 20 °C.

9.3.3. Experiment C (s otevřeným oknem 90°)

Předpříprava okna:

Okno je v poloze mikroventilace, do exteriérového prostoru byla umístěna lišta s lankem, aby bylo možné okno po dosažení stanovené teploty zavřít z exteriéru bez zásahu do podmínek interiéru. Lanko je přivázáno ke klíče okna, která se nachází v interiéru. Lanko je nataženo o délce odpovídající úhlu otevření okna 90°. Okno je proti pohybu a zavření během experimentu zajištěno vkládacím prvkem. K otevření dojde z exteriéru mechanicky tlakem na zasklení, kdy je okno do požadované polohy otočeno na nataženém provázku. K zavření okna zpět dojde tahem za lanko pomocí lišty za současného odstranění vkládacího prvku.

Úhel otevření okna 90°

Rozložení čidel během experimentu C je uvedeno v následující tabulce (9-3 Tab.):

9-3 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu C (autor)

Č. stojanu (umístění v místnosti)	Označení výšky umístění v experimentální místnosti	Výška nad podlahou (m)
1	1	2
2	2	1,5
3	3	1
4	4	0,5

Stojan 1: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním Tg TMC, ambientní čidlo teploty vzduchu č. 1 TMC, na spodním rameni čidlo rychlosti proudění vzduchu TMC.

Stojan 2: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním kulový teploměr Tg laboratorní, ambientní čidlo teploty vzduchu č. 2 TMC

Stojan 3: 2 ramena ve výškách 0,5 m a 2 m. Na obou ramenech čidla teploty vzduchu, na horním rameni čidlo RPV.

Stojan 4: 3 ramena o výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m – na každém rameni čidla teplot vzduchu.

Nastavení TMČ: produkci tepla výdechem člověka simulují horní neoblečenou polovinou těla TMČ s nastavením zón na 25 °C, spodní polovina těla je oblečena a je nastavena na teplotu 37 °C, která simuluje produkci tepla povrchem těla osoby.

Exteriérové podmínky: – 2,45 °C.

Experiment začne v okamžiku ustálení komory a TMČ: otopné těleso umístěno pod oknem, na termostatu 21 °C, ve vedlejší komoře je 15 °C a ve vedlejším exteriérovém prostoru je 15 °C. Pro třídy je rozhodující limitní hodnota T_g , takže experiment končí v okamžiku, kdy nastane na obou kulových teploměrech T_g teplota pod 20 °C. Teploměry jsou umístěny u TMČ a na stojanu č. 2 ve výšce 1 m. Experiment je ukončen, jakmile na obou T_g bude hodnota těsně pod 20 °C.

9.3.4. Experiment D (s otevřenými dveřmi do interiéru (vstupního prostoru - předsínky) a částečně otevřeným oknem 30° do exteriéru)

V komoře byly umístěny lavice, prázdná židle s TMČ do správných pozic a postaveny stojany s kabelovými čidly teplot vzduchu viz (9.6 Obr.)

Předpříprava okna:

Okno je v poloze mikroventilace, do exteriérového prostoru byla umístěna lišta s lankem, aby bylo možné okno po dosažení stanovené teploty zavřít z exteriéru bez zásahu do podmínek interiéru. Lanko je přivázáno ke klice okna, která se nachází v interiéru. Lanko je nataženo o délce odpovídající úhlu otevření okna 30°. Okno je proti pohybu a zavření během experimentu zajištěno vkládacím prvkem. K otevření dojde z exteriéru mechanicky tlakem na zasklení, kdy je okno do požadované polohy otočeno na nataženém provázku. K zavření okna zpět dojde tahem za lanko pomocí lišty za současného odstranění vkládacího prvku.

Úhel otevření okna 30°

Rozložení čidel během experimentu D je uvedeno v následující tabulce (9-4 Tab.).

9-4 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu D (autor)

Č. stojanu (umístění v místnosti)	Označení výšky umístění v experimentální místnosti	Výška nad podlahou (m)
1	1	2
2	2	1,5
3	3	1
4	4	0,5

Stojan 1: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním T_g TMČ, ambientní čidlo teploty vzduchu č. 1 TMČ, na spodním rameni čidlo rychlosti proudění vzduchu TMČ.

Stojan 2: 3 ramena ve výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m. – na každém rameni teploty vzduchu, na rameni prostředním kulový teploměr T_g laboratorní, ambientní čidlo teploty vzduchu č. 2 TMČ

Stojan 3: 2 ramena ve výškách 0,5 m a 2 m. Na obou ramenech čidla teploty vzduchu, na horním rameni čidlo RPV.

Stojan 4: 3 ramena o výškách 0,5 m, 1 m a 1,5 m – na každém rameni čidla teplot vzduchu.

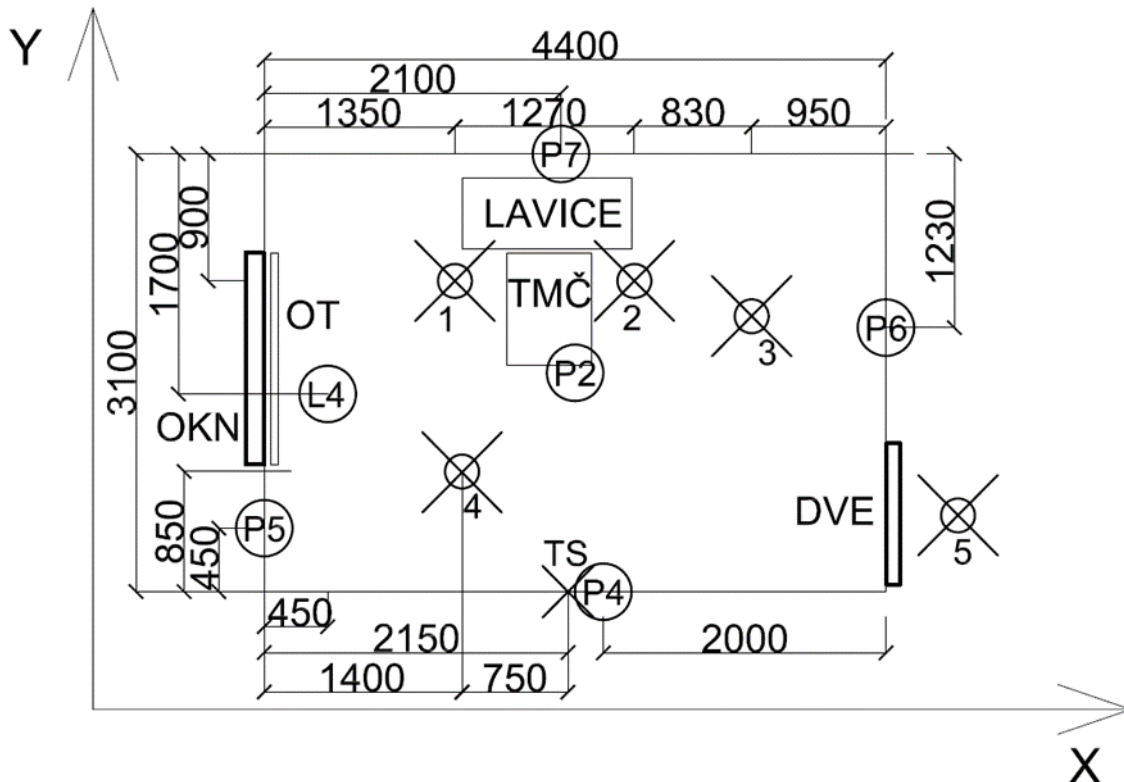
Nastavení TMČ: část produkce tepla od člověka simulují vydechovaným vzduchem člověkem tak, že horní polovina těla má zóny nastaveny na 25 °C, spodní polovina těla je oblečena a je nastavena na 37 °C, kde simulují produkci tepla povrchem těla od osoby.

Exteriérové podmínky: 0,98 °C.

Předpříprava vstupního prostoru (předsíňky):

Proběhla instalace čidel teploty vzduchu do výšek 0,5 m a 1,5 m do vstupního prostoru (předsíňky). Levá část exteriérového prostoru vychlazená na 10 °C, otevřením dveří a prouděním vzduchu dojde k dosažení startovní teploty experimentu (15 °C) v předsíňce. (L2 = 12,01 °C, L4 = 16,15 °C.)

Po otevření dveří do pravé komory na 30° vstoupím do meziprostoru, kde otevřu okno na 30°, jako tomu bylo v případě experimentu B. Experiment D trval do podkročení limitní hodnoty na $T_g = 20$ °C TMČ a na T_g laboratoře.



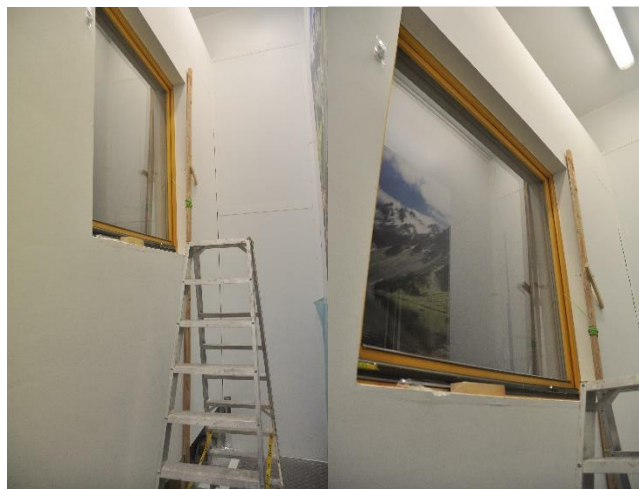
9.6 Obr. schéma měření pro experiment D - stojany s čidly 1 - 4, TS – termostat, OT – otopné těleso, OKN – okno, DVE – dveře, stanoviště 5 – stanoviště čidel ve vstupním prostoru (předsíňce) – (autor)

9.4. Dokumentace experimentálních měření

Pro ilustraci přikládám fotografie (9.7 Obr. a 9.8 Obr.) z konfigurací jednotlivých experimentů. Jedná se o rozložení čidel a umístění TMČ, otevření okna a dveří do požadované polohy z exteriérového prostoru bez narušení podmínek interiérového prostoru a pohled z exteriérového prostoru na okno s otevíracím mechanismem lišty a lanka. Průběhy teplot kulových teploměrů a vybraných teplot vzduchu jsou uvedeny v příloze č. 5 na str. 136 a v příloze č. 6 na str. 138.



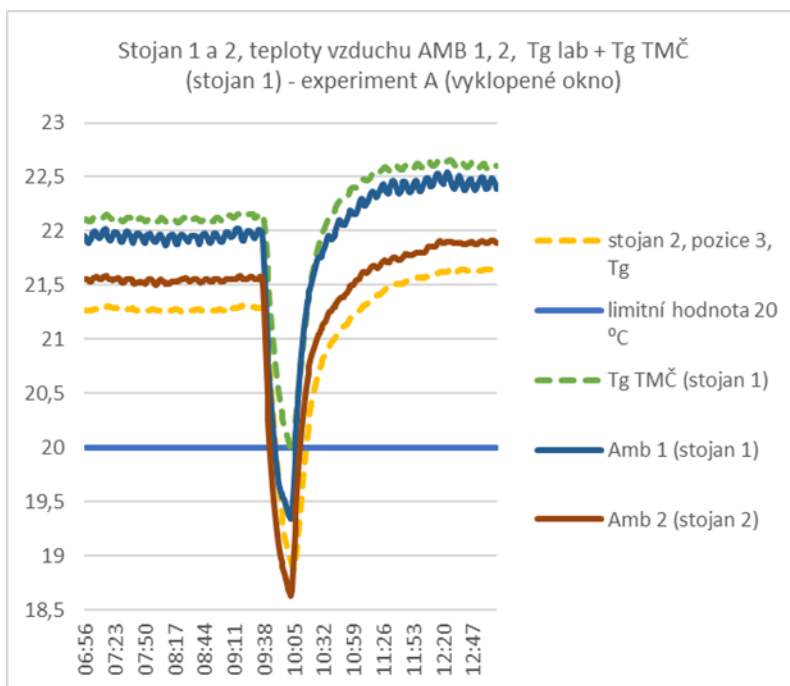
9.7 Obr. Fotodokumentace z konfigurace jednotlivých experimentálních měření – TMČ s ambientními čidly, okno a dveře otevřené na 30° (autor)



9.8 Obr. Fotodokumentace z konfigurace jednotlivých experimentálních měření – pohled z exteriérového prostoru na okno opatřené lištou s lankem (autor)

9.5. Vyhodnocení experimentů

Všechny experimenty byly ukončeny v okamžiku podkročení limitní hodnoty 20 °C na obou kulových teploměrech, které byly instalovány na stojanech ve standardní výšce, konkrétně Tg (TMČ) byl umístěn na stojanu 1 a na stojanu 2 byl umístěn Tg (lab) podle schématu na 9.6 Obr.. V následující tabulce (9-5 Tab.) jsou zaznamenány časy jednotlivých případů a uvedena doba trvání, za kterou bylo dosaženo mezní teploty, při níž byl experiment ukončen. Časy jsou uvedeny pro oba kulové teploměry a graficky je zvýrazněn rozhodující čas pro ukončení každého případu. Pro případ experimentu A (vyklopeného okna) se časy podkročení mezních teplot na obou teploměrech liší o více než 10 minut. Vysvětlení je nutno hledat v rozdílné vzdálenosti od zdroje exteriérového vzduchu přiváděného k TMČ. Pro případy experimentu B (okno otevřeno na 30°) a experimentu C (celé okno otevřeno na 90°) se časy trvání liší pouze o 1 minutu. Pro případ experimentu D došlo k dosažení mezní hodnoty na obou teploměrech ve stejný čas, kdy nepatrně vyšší hodnota byla naměřena na laboratorním kulovém teploměru na stojanu 2. Průběhy teplot kulového teploměru a vybraných teplot vzduchu jsou uvedeny v přílohách č. 5 a 6, které začínají na stranách 136 a 138. Pro ilustraci uvádím graf z experimentálního měření, konkrétně průběhy teplot kulového teploměru a vybraných teplot vzduchu (Amb) na stojanech 1 a 2 pro experiment A. Průběh uvedených hodnot byl naměřen za přítomnosti otopného tělesa za nastavené hodnoty na termostatu 22 °C.



9.9 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu a kulového teploměru pro experiment A (autor)

9-5 Tab. Doba dosažení mezní teploty v jednotlivých případech (autor)

Experiment A - okno vyklopené					
čas	Tg (lab) v °C, stojan 2	čas	Tg (TMČ) v °C, stojan 1	doba počátku a ukončení experimentu	doba dosažení mezní teploty (min)
9:49	19,93	10:02	19,98	9:24 - 10:02	36

Experiment B - okno částečně otevřené 30°					
čas	Tg (lab) v °C, stojan 2	čas	Tg (TMČ) v °C, stojan 1	doba počátku a ukončení experimentu	doba dosažení mezní teploty (min)
20:07	19,52	20:06	19,59	20:00 - 20:07	8

Experiment C - zcela okno otevřené 90°					
čas	Tg (lab) v °C, stojan 2	čas	Tg (TMČ) v °C, stojan 1	doba počátku a ukončení experimentu	doba dosažení mezní teploty (min)
9:22	19,53	9:21	19,44	9:17 - 9:22	6

Experiment D - okno částečně 30° + otevřené dveře					
čas	Tg (lab) v °C, stojan 2	čas	Tg (TMČ) v °C, stojan 1	doba počátku a ukončení experimentu	doba dosažení mezní teploty (min)
14:50	19,97	14:50	19,87	14:43 - 14:50	8

9.5.1. Určení ekvivalentní plochy průřezu

V experimentu byla měřena pole teplot a jim odpovídající rychlosti proudění vzduchu v prostoru. Na základě rozložení teplot byly určeny hodnoty hustot vzduchu. Byly určeny rozhodující průtoky vzduchu

za časovou jednotku (9-6 Tab.). K výpočtu byla použita ekvivalentní plocha průřezu, která zohledňovala uspořádání experimentu, tj. úhel vyklopení okna, úhel otevření okna, případně otevřené dveře. Velikost ekvivalentní plochy průřezu v daném případě v sobě zahrnuje vliv velikosti okna, jeho geometrie, míru otevření, popř. úhel vyklopení, a projevuje se v něm rozložení teplot. K výpočtu plochy bylo použito výtokového součinitele průřezu (C_d), který je bezrozměrný a bere v úvahu tlakové ztráty třením a místními odpory otvoru. Výtokový součinitel byl analogicky odvozen na základě teoretických hodnot uvedených v literatuře podle (P. Heiselberg, 1999), (A. Iqbal, 2012), (H. Wang, 2015) a z hodnot změřených během experimentů zaměřených na simulaci výpočtů u podobných typů oken. Poslední experiment D je jiného typu, proudění je ovlivněno nejen oknem, ale také otevřenými dveřmi, kdy odpovídající hodnoty plochy průřezu byly určeny i s vlivem dveří.

9-6 Tab. Naměřené hodnoty teplot vzduchu v exteriéru a interiéru během experimentů a příslušné hustoty (autor)

označení experimentu	označení teplot	naměřené hodnoty teplot (konec intervalu) (°C)	označení hustot	hustoty pro naměřené teploty (kg/m ³)
A	T2	-13,93 (-12,95)	ρ_2	1,3628683
	T1	21,5	ρ_1	1,19937
B	T2	-10,62 (-8,06)	ρ_2	1,3452922
	T1	22,01	ρ_1	1,1989518
C	T2	-2,45 (-1,11)	ρ_2	1,3071945
	T1	21,91	ρ_1	1,1990338
D	T2	0,98 (3,10)	ρ_2	1,2907648
	T1	21,91	ρ_1	1,1990338

Kapacita exteriérového prostoru a jeho tepelná zařízení nedovolovala udržet jeho konstantní teplotu za extrémních teplotních podmínek okolních prostor. Pro doložení tohoto stavu jsou uvedeny hodnoty teploty v exteriéru na konci jednotlivých experimentů v závorce. Z uvedených hodnot je patrné, že rozptyl nedosáhl ani 2 °C, jen v případě D větší gradient vedl na nepatrně vyšší rozdíl.

Průtočná množství vzduchu v experimentech byla stanovena na základě rovnice kontinuity, kdy se množství proudícího vzduchu do interiéru musí shodovat s množstvím proudícího vzduchu do exteriéru. Pro výpočty byla zanedbána disipační energie a byly zanedbány ztráty třením v obou směrech proudění.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho u(x) = konst.$$

Rovnice 9.1 Bernoulliho rovnice

ρ - hustota vzduchu [kg/m³]

v - rychlost proudění vzduchu [m/s]

p - tlak vzduchu [Pa]

u - potenciál vnějšího konzervativního pole, které představuje unášivé setrvačné síly a gravitační síly [J/kg]

$$V = S * v = S_1 v_1 + S_2 v_2 + \dots + S_n v_n$$

Rovnice 9.2 Rovnice kontinuity

V - objemový průtok vzduchu [m³/s]

S - plocha průřezu [m²]

v - rychlost proudění vzduchu [m/s]

$$V = \iint_{\Omega} v \, dS$$

Rovnice 9.3 Dvojný integrál pro výpočet průtoku

V - objemový průtok vzduchu [m³/s]

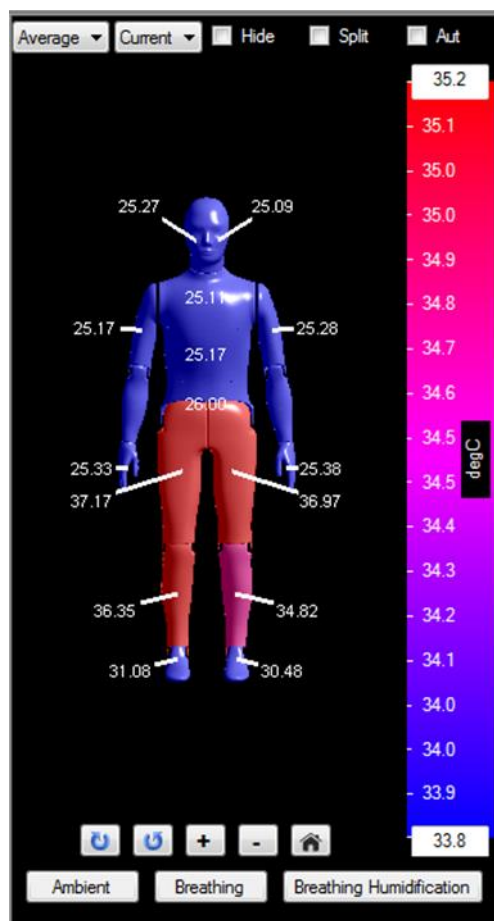
v - rychlost proudění vzduchu [m/s]

Ω - ekvivalentní plocha průřezu [m²]

9.5.2. Experiment A – vyklopené okno – učebna mírně větrána za přítomnosti osob

Experiment A představoval učebnu, kde byly přítomny osoby a zároveň se mírně větralo. Experiment A skončil dosažením limitní teploty kulového teploměru o hodnotě T_g (TMČ) = 19,98 °C. Experiment A trval 36 minut. Ekvivalentní plocha průřezu odpovídající vyklopenému oknu byla určena jako 2,03 m². Pod daným ekvivalentním profilem proteklo za čas experimentu A 43,25 m³ vzduchu. K dosažení požadované výměny 2 (1/h), (tj. 77,75 m³/h) by bylo nutno okno otevřít 1,8 krát během jedné hodiny. Celková doba otevření okna by byla v jedné pracovní hodině delší než tato hodina, a to 65 minut. Z experimentu vyplývá, že vyklopené okno nepostačuje k dosažení dvojnásobné výměny vzduchu v prostoru v jedné pracovní hodině. Souhrn jednotlivých experimentů a požadované doby větrání je uveden v kapitole 9.5.6 v následující tabulce 9-7 Tab. na straně 93.

Konkrétní rozdíly teplot (9.10 Obr.) na konci experimentu A mezi levou a pravou částí zón TMČ byly 0,2 °C pro zóny stehna, pro lýtka to bylo 1,53 °C a pro zóny nártů 0,6 °C. Rozdíl mezi povrchovými teplotami levého stehna a levého lýtka byl 2,15 °C.

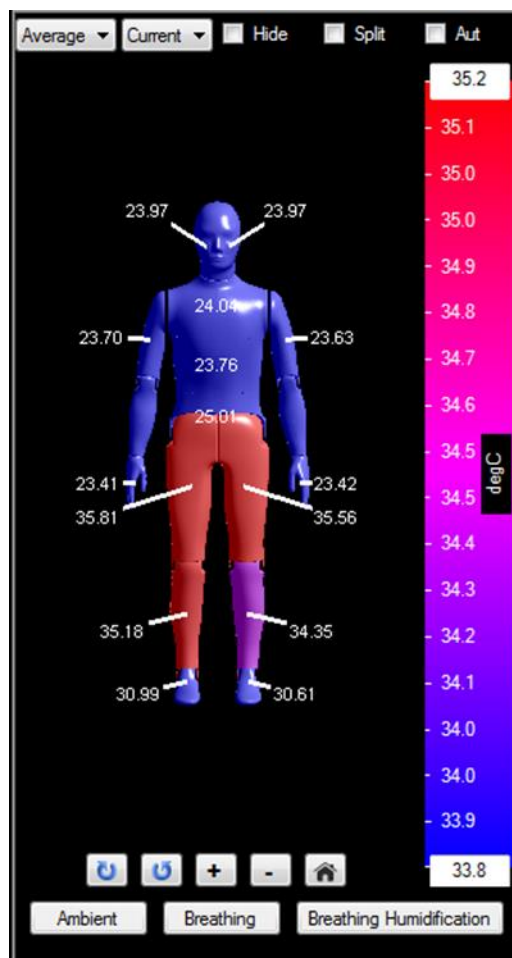


9.10 Obr. Zóny TMČ po ukončení experimentu A vyklopeného okna na 7,5° (autor)

9.5.3. Experiment B – částečně otevřené okno na 30° – učebna středně větrána za přítomnosti osob

Experiment B znázorňoval učebnu, kde byly přítomny osoby a zároveň se větralo středně otevřeným oknem. Experiment B skončil dosažením teploty kulového teploměru o mezní hodnotě 20 °C na obou kulových teploměrech, konkrétně dosažením $T_g(\text{lab}) = 19,52$ °C. Experiment B trval 8 minut. Ekvivalentní plocha průřezu odpovídající oknu otevřenému na 30° byla určena jako 0,845 m². Daným ekvivalentním profilem protéklo za dobu trvání experimentu B 41,04 m³ vzduchu. Pro dosažení požadované násobnosti výměny vzduchu o hodnotě 2 1/h, (tj. 77,75 m³/h) by bylo nutné takto otevřít okno 1,89 krát za hodinu. Celková doba otevření okna by byla 16 minut v jedné pracovní hodině. Souhrn jednotlivých experimentů a požadované doby větrání je uveden v kapitole 9.5.6 v následující tabulce 9-7 Tab. na straně 93.

Konkrétní rozdíly teplot (9.11 Obr.) na konci experimentu B mezi levou a pravou částí zón TMČ byly 0,25 °C pro zóny stehen, pro lýtka to bylo 0,83 °C a pro zóny nártů 0,38 °C. Rozdíl mezi povrchovými teplotami levého stehna a levého lýtka byl 1,21 °C.

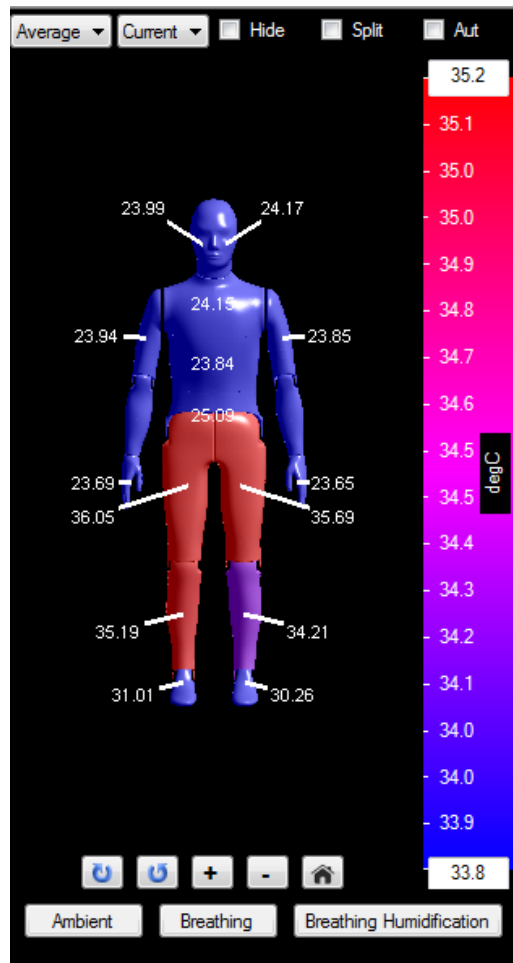


9.11 Obr. Zóny TMČ po ukončení experimentu B otevřeného okna na 30° (autor)

9.5.4. Experiment C – okno otevřené na 90° - učebna plně větrána za přítomnosti osob

Experiment C představoval učebnu, kde byly přítomny osoby a zároveň se plně větralo otevřeným oknem. Experiment C dosažením mezní teploty kulového teploměru o limitní hodnotě teploty 20 °C na obou kulových teploměrech, konkrétně dosažením $T_g(\text{lab}) = 19,53$ °C. Experiment C trval 6 minut. Ekvivalentní plocha průřezu odpovídající plně otevřenému oknu byla určena jako 0,830 m². Daným ekvivalentním profilem proteklo za čas experimentu C 40,824 m³ vzduchu. Pro dosažení požadované násobnosti výměny vzduchu o hodnotě 2 1/h, (tj. 77,75 m³/h) by bylo nutné takto otevřít okno 1,9 krát za hodinu. Celková doba otevření okna by byla 12 minut v jedné pracovní hodině. Souhrn jednotlivých experimentů a požadované doby větrání je uveden v kapitole 9.5.6 v následující tabulce 9-7 Tab. na straně 93.

Konkrétní rozdíly teplot (9.12 Obr.) na konci experimentu C mezi levou a pravou částí zón TMČ byly 0,36 °C pro zóny stehna, pro lýtka to bylo 0,98 °C a pro zóny nártů 0,75 °C. Rozdíl mezi povrchovými teplotami levého stehna a levého lýtka byl 1,48 °C.

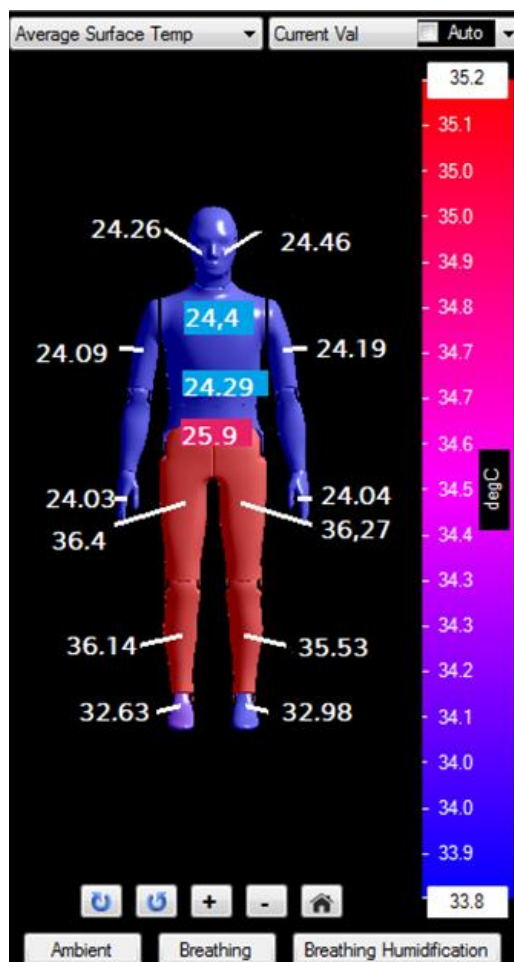


9.12 Obr. Zóny TMČ po ukončení experimentu C otevřeného okna na 90° (autor)

9.5.5. Experiment D – učebna částečně větrána do exteriéru a do interiéru (chodby)

Experiment D představoval učebnu, kde byly přítomny osoby a zároveň se částečně větralo otevřeným oknem na 30° a dveřmi na 30°. Experiment D skončil dosažením mezní hodnoty teploty kulového teploměru 20 °C na obou kulových teploměrech, konkrétně dosažením $T_g(\text{lab}) = 19,97$ °C. Experiment C trval 8 minut. Ekvivalentní plocha smíšeného případu byla určena jako 0,824 m². Uvedeným ekvivalentním profilem protékalo za čas experimentu D 47,808 m³ vzduchu. Pro dosažení požadované násobnosti výměny vzduchu o hodnotě, (tj. 77,75 m³/h) by bylo nutné takto otevřít okno současně se dveřmi 1,63 krát za hodinu. Celková doba otevření okna a dveří by byla 14 minut v jedné pracovní hodině. Souhrn jednotlivých experimentů a požadované doby větrání je uveden v kapitole 9.5.6 v následující tabulce 9-7 Tab. na straně 93.

Konkrétní rozdíly teplot (9.13 Obr.) na konci experimentu D mezi levou a pravou částí zón TMČ byly 0,13 °C pro zóny stehen, pro lýtka to bylo 0,61 °C a pro zóny nártů 0,35 °C. Rozdíl mezi povrchovými teplotami levého stehna a levého lýtka byl 0,74 °C.



9.13 Obr. Zóny TMC po ukončení experimentu D otevřeného okna na 30° a dveří na 30° (autor)

9.5.6. Dílčí závěry experimentů

V následující tabulce (9-7 Tab.) je uveden souhrn výsledků experimentů: doba trvání, množství vzduchu za délku trvání experimentu, jejich vztah k požadované násobnosti výměny vzduchu o hodnotě 2 (1/h) a z toho vyplývající požadovaná doba větrání v jedné pracovní hodině. Z výsledků vyplývá, že v experimentu A by byl požadovaný čas větrání vyklopeným oknem v jedné pracovní hodině delší než tato hodina., což odporuje realitě a větrání v takto uspořádaném případě je nedostatečné. Podle výsledku experimentu B by byl požadovaný čas větrání otevřeným oknem na 30° v jedné pracovní hodině 16 minut. Podle výsledku experimentu C by byl požadovaný čas větrání otevřeným oknem na 90° v jedné pracovní hodině 12 minut. Podle výsledku experimentu D by byl požadovaný čas větrání otevřeným oknem na 30° a dveřmi na 30° v jedné pracovní hodině 14 minut.

9-7 Tab. Souhrn experimentů a požadované doby větrání (autor)

Označení experimentu	Doba trvání experimentu (min)	Množství vzduchu za dobu trvání experimentu (m ³)	Vztah k požadované násobnosti výměny vzduchu n = 2 (1/h) (-)	Požadovaná doba větrání v jedné pracovní hodině (min)
A	36	43,25	1,80	Nesplněno - větší než 60; (65)
B	8	41,04	1,89	16
C	6	40,82	1,9	12
D	8	47,81	1,63	14

Větrat po danou dobu lze, ale pro osobu umístěnou v blízkosti větracího otvoru budou na lidském těle vždy různě tepelně zatížené zóny. V tomto konkrétním experimentálním případě jsou zóny levé strany TMČ výrazněji zatíženy nízkou teplotou než zóny pravé strany a z hlediska tepelného komfortu může být vnímáno jako nepříjemné.

9.6. Porovnání výsledků experimentu s výsledky simulace

Ze softwaru ANSYS Fluent v části postprocesoru byly vygenerovány průtoky vzduchu pro jednotlivé případy (pomocí nástroje Surface Integrals). Během experimentu byly sledovány trendy rychlostí proudění vzduchu, aby bylo možno porovnat velikosti a směr rychlostních vektorů. U experimentu toto bylo řešeno pomocí tenkých vláken, která udávala směr proudění. Porovnání bylo provedeno pro polohu umístěných teploměrů v experimentu a rozhodující pro stanovení průtoků. Porovnávány byly velikosti rychlostí a trendy směrů (9-8 Tab.).

9-8 Tab. Porovnání experimentálních výsledků a výsledků simulace (autor)

Označení experimentu	Rychlost proudění vzduchu naměřená v experimentu (m/s)	Rychlost proudění vzduchu ze simulace (m/s)	Rozdíl v %
A	0,071	0,084	19,0
B	0,372	0,444	19,45
C	0,420	0,488	16,23
D	-	-	-

Shoda ve všech třech porovnatelných případech vyšla příznivě. Větší rychlosti proudění vzduchu ve všech třech případech odpovídají možnostem simulačního modelu turbulence. Použitý simulační model turbulence měl linearizovaný průběh mezi laminární podvrstvou a turbulentním prouděním v blízkosti stěny (vliv nelineárního reálného průběhu byl zanedbán vzhledem k tomu, že proudění u stěny prakticky neovlivňuje transport vzduchu v oblasti kontrolovaných subjektů).

9.6.1. Diskuze výsledků

Přesnost modelu je podle očekávání nejlepší pro experiment C s plně otevřeným oknem a menší pro okno pootevřené a vyklopené, které jsou srovnatelné. Příklad A s vyklopeným oknem o malém úhlu vyklopení vytváří složitější případ proudění v komoře, jemuž odpovídá i obraz trajektorií. Blízká poloha TMČ u okna ještě obraz proudění komplikuje.

Výhodou modelu je, že jej lze podle potřeb dále vyladovat a upravovat. Je možno přidávat další prvky a také modelovat produkci škodlivin (ověření distribuce škodlivin představuje samostatnou úlohu – rozptyl hustot např. vodní páry a CO₂ je téměř půl řádu).

Ne úplně dokonalou shodu lze zdůvodnit také tím, že v případě experimentů byl přenos řízen podle teplot a právě ty počáteční nebyly během doby trvání experimentu konstantní (plánována byla exteriérová teplota -12 °C, ale časem vystoupala na hodnotu 0 °C v exteriérovém prostoru z důvodu nízké kapacity chladicího zařízení exteriéru).

Obtížné je také sladit a interpretovat stejné nastavení parametrů v laboratoři a v simulačním experimentu. Zvláště nastavování povrchových teplot interiéru, povrchových teplot TMČ a řízení vnitřního prostředí podle možností modelu je komplikované, neboť se jedná o autonomně řízené systémy bez možnosti přímého propojení.

Množství větracího vzduchu a násobnost výměny vzduchu pro experimentální místnost

Graf na 9.14 Obr. znázorňuje hodnoty průtoků vzduchu z tabulky 9-9 Tab. na 1 osobu podle exteriérového znečištění (300; 380; 400; 410 a 420 ppm) a vnitřní limitní koncentrace (1000; 1300 a 1500 ppm). Tato tabulka je již uvedena na začátku práce v kapitole 2.2.2, pod označením 2-1 Tab. na straně 25. Dále je tabulka v této kapitole rozšířena o hodnoty množství větracího vzduchu pro 6 osob.

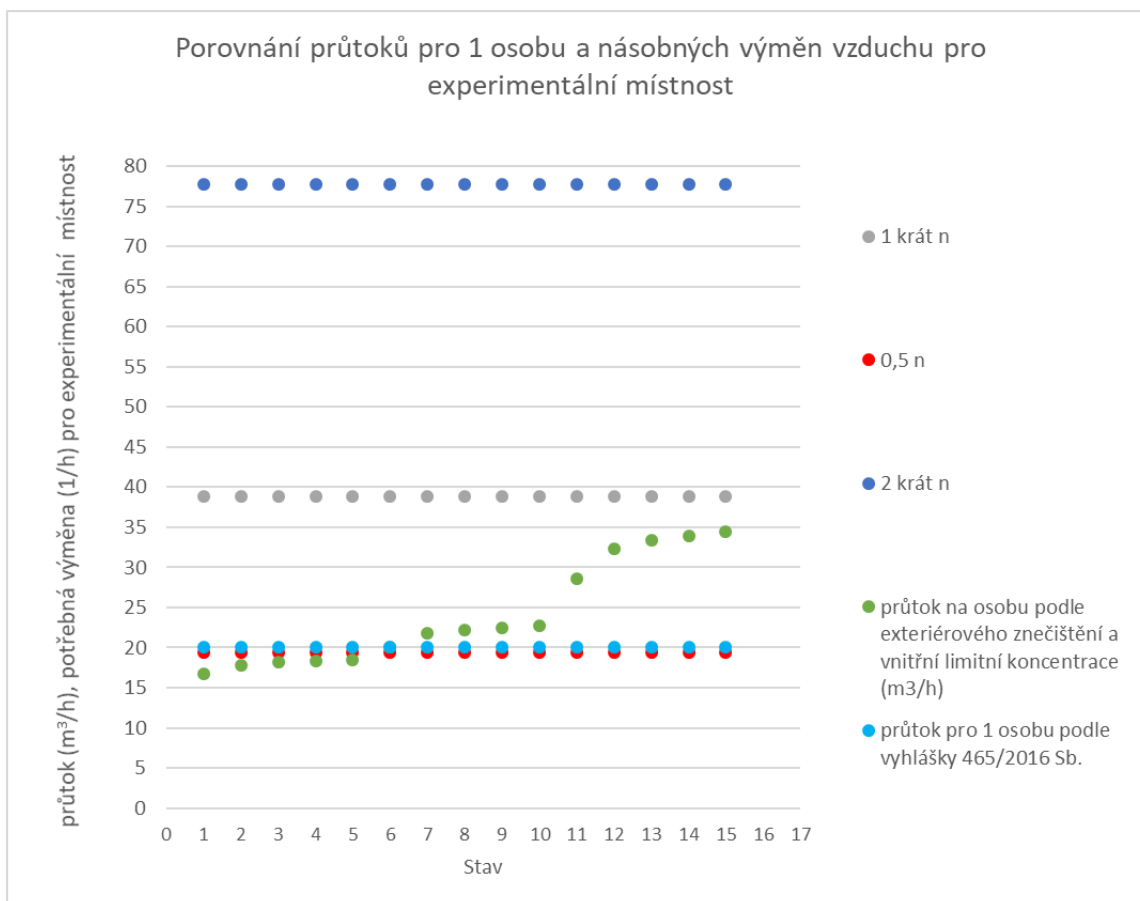
9-9 Tab. Změny množství větracího vzduchu na osobu podle změn koncentrací CO₂ (autor)

Číslo stavu	koncentrace v exteriéru (%)	přijatelná koncentrace v interiéru (%)	V - množství větracího vzduchu na osobu (m ³ /h)	V – množství větracího vzduchu pro 6 osob (m ³ /h)
1	0,03	0,15	16,67	100,02
2	0,038	0,15	17,85	107,1
3	0,04	0,15	18,18	109,08
4	0,041	0,15	18,35	110,1
5	0,042	0,15	18,52	111,12
6	0,03	0,13	20,00	120
7	0,038	0,13	21,74	130,44
8	0,04	0,13	22,2	133,2
9	0,041	0,13	22,47	134,82
10	0,042	0,13	22,73	136,38
11	0,03	0,1	28,57	171,42
12	0,038	0,1	32,26	193,56
13	0,04	0,1	33,33	199,98
14	0,041	0,1	33,89	203,34
15	0,042	0,1	34,48	206,88

Graf na 9.14 Obr. Stav 1 až 5 popisuje množství větracího vzduchu na 1 osobu a vnitřní koncentraci 1500 ppm, pro venkovní koncentrace 300 ppm, 380 ppm, 400 ppm, 410 ppm a 420 ppm. Stavy 6 až 10 jsou vypočteny pro vnitřní koncentraci 1300 ppm a pro venkovní koncentrace 300 ppm, 380 ppm, 400 ppm, 410 ppm a 420 ppm. Stavy 11 až 15 jsou vypočteny pro vnitřní koncentraci 1000 ppm a pro venkovní koncentrace 300 ppm, 380 ppm, 400 ppm, 410 ppm a 420 ppm. Tato množství větracího vzduchu jsou dána do souvislosti s násobnostmi výměn vzduchu pro experimentální místnost a požadovanými průtoky vzduchu podle vyhlášky 465/2016 Sb. (Český normalizační institut, 2009), která jsou uvedena v následující tabulce 9-10 Tab.

9-10 Tab. Násobnost výměny vzduchu pro experimentální místnost a požadovaný průtok vzduchu (autor)

Předepsaná násobnost výměny vzduchu n (1/h)	Vyčíslená násobnost pro experimentální místnost (m ³ /h)	Průtok na osobu podle Vyhl. 465/2016 Sb. (m ³ /h)	Průtok na 6 osob podle Vyhl. 465/2016 Sb. (m ³ /h)
0,5	19,437	20	120
1	38,874	20	120
2	77,748	20	120

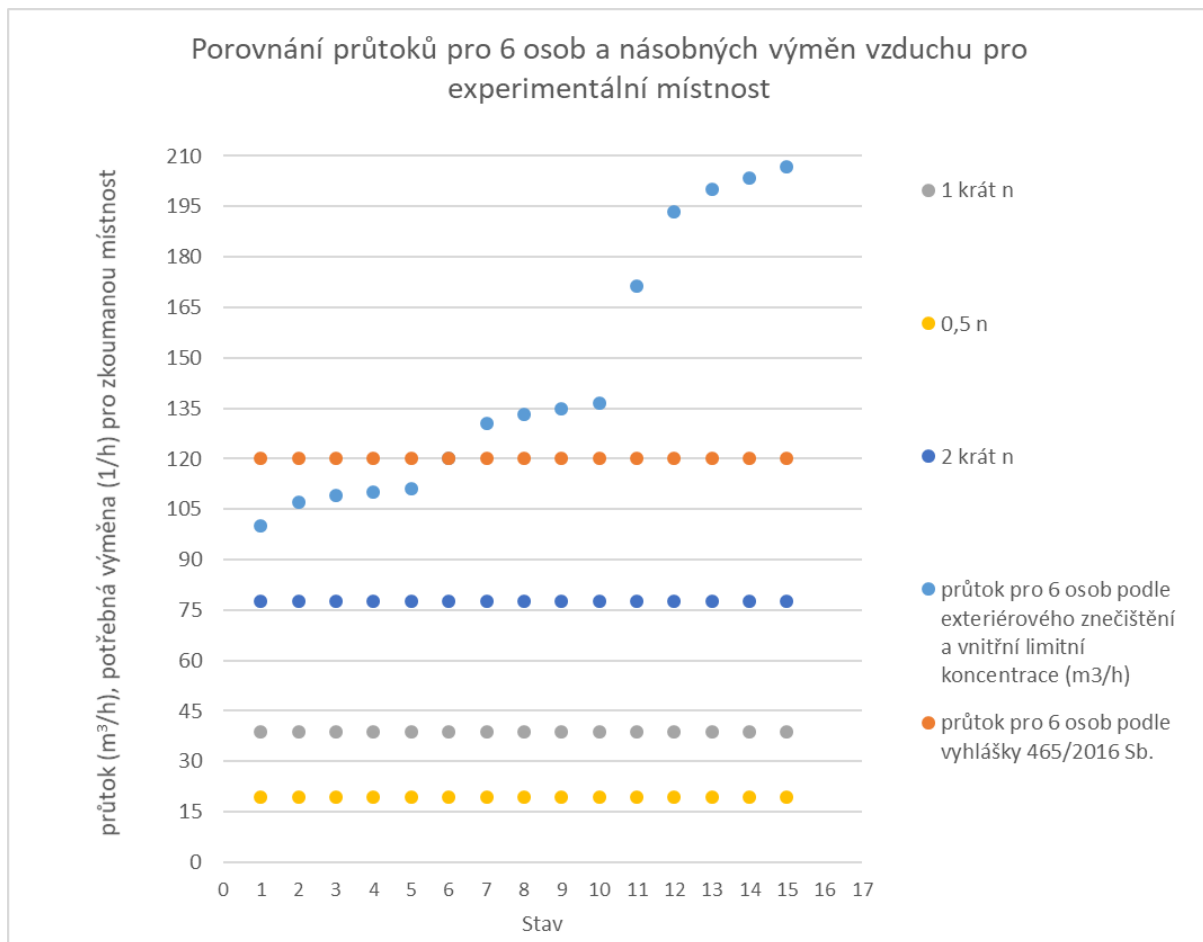


9.14 Obr. Výpočtové množství větracího vzduchu vztaženého na 1 osobu a násobnost výměny vzduchu pro experimentální místnost (autor)

Graf na 9.15 Obr. zobrazuje závislost hodnoty průtoku vzduchu na 6 osob z tabulky 9-9 Tab. podle exteriérového znečištění (300 – 420 ppm) vztažený na vnitřní limitní koncentrace (1000; 1300 a 1500 ppm). Průtoky byly vypočteny jako šesti násobky průtoků z předcházejícího grafu. Absolutní výměny vzduchu jsou porovnány s násobnostmi výměn vzduchu pro experimentální místnost a s požadovanými průtoky vzduchu podle vyhlášky 465/2016 Sb., která jsou uvedena v tabulce 9-10 Tab.

Do experimentální místnosti by bylo možné umístit teoreticky (dle normových parametrů výukových prostor) až 6 osob. Jedná se o pětinový segment učebny, kdy tradičně je učebna určena pro 30 osob. Pro účely experimentu a modelu byla použita 1 osoba (1 dispoziční simulační model člověka). Pro 1 osobu je množství větracího vzduchu nižší než 1 násobná výměna vzduchu a některé hodnoty (pro vnitřní koncentraci 1500 ppm) jsou na hranici 0,5 výměny vzduchu. Většina hodnot se pohybuje mezi 0,5 násobnou a jednonásobnou výměnou vzduchu (pro vnitřní koncentrace 1100 ppm a 1300 ppm). Požadovaná hodnota průtoku vzduchu na osobu je dána z vyhlášky 465/2016 Sb. (Český normalizační institut, 2009) jako 20 m³/h a je téměř totožná s hodnotou 0,5 násobné výměny vzduchu pro experimentální místnost. Pro 6 osob je množství větracího vzduchu vyšší než dvojnásobná násobnost výměny vzduchu pro zkoumanou experimentální místnost po všechny zkoumané koncentrace. Pro stavy 1 až 5 jsou průtoky podle vyhlášky vyšší než podle vypočtených koncentrací (pro vnitřní koncentraci o hodnotě 1500 ppm a všechny hodnoty vnitřní koncentrace.) Hodnota pro průtok pro 6 osob podle vyhlášky se shoduje s hodnotou průtoku pro koncentrace 300 ppm a 1300 ppm. Pro stavy 7 až 15 jsou průtoky podle vyhlášky nižší než podle vypočtených koncentrací (pro vnitřní koncentrace o hodnotách 1000 ppm a 1300 ppm a všechny zkoumané hodnoty vnitřní koncentrace.)

Násobnost výměny je také vztažena ke standardnímu složení vzduchu, takže by násobnost výměny měla být vyšší, když jsou dnes měřené koncentrace oxidu uhličitého vyšší, než tomu bylo v minulosti.



9.15 Obr. Výpočtové množství větracího vzduchu přiváděného za 1 hodinu pro 6 osob a násobnost výměny vzduchu pro experimentální místnost (autor)

9.6.2. Diskuze

Při interpretaci výsledků je třeba vzít v úvahu rozdíly mezi simulačním modelem a realitou v laboratoři. Venkovní podmínky jsou omezeny daným objemem laboratorního exteriéru, který je ve skutečnosti také vlastně interiérem a rychlostmi proudění vzduchu. V čase je rozdílné chování TMČ a lidského simulátoru a tepelné toky od nich se rozdílně mění i v čase. Rovněž teploty stěn jsou jiné v průběhu času než teploty stropu a podlahy, ač v simulaci se předpokládá, že jsou totožné po celou dobu trvání experimentu. Dalším rozdílem je, že oproti skutečnosti není simulován a tedy ani hodnocen vliv větru.

Pozitivní je, že je model ověřen naměřeným teplotním polem, tj. verifikací v laboratoři navíc pro umístění osoby v blízkosti okna.

Rychlosti změn základních veličin v případě probíhajících experimentů a v případě numerických simulací se nepodařilo úplně sladit. Parametry zadávání okrajových podmínek simulace jsou výpočtově v simulaci dodržovány, zatímco realita probíhajících experimentů v konkrétně technicky provedené klimatické dvojkomoře je jiná. Kapacita zařízení a objektivní podmínky udržování parametrů vnějšího prostředí neumožňovaly obojí úplně sladit.

Z porovnání rychlostních polí prostředí v oblasti sledovaného objektu (lidský simulátor, TMČ) získaných experimentálně a simulacemi lze objektivně konstatovat, že shoda je natolik dobrá, aby opravňovala v pokračování ve vývoji simulačního modelu pro učebnu s různými větracími prvky a se standardním obsazením (nebo neobsazením) sledovanými objekty z hlediska jejich tepelné pohody a koncentrace znečišťujících látek.

10. Závěr

Na závěr uvádím shrnutí výsledků dizertační práce. Na začátku práce v druhé kapitole je uveden přehled stávajícího stavu systémů větrání školních budov.

Přehled stávajícího stavu systémů větrání školních budov

- **Shrnutí současných problémů vnitřního prostředí školních budov ve vztahu k použitému systému větrání**

Na základě výzkumu, šetření, průzkumů a uvedených případových studií doložených příklady školních budov v Evropě, v USA a v naší republice lze konstatovat, že

Optimální podmínky pro větrání problematických existujících školních budov lze zajistit v zásadě dvěma základními způsoby:

a) Technickými úpravami: optimální je oddělení větracího systému od systému chladicího a vytápěcího, použití radiačního vytápění místo teplovzdušného vytápění, instalovat otevíratelná okna a zajistit vnitřní teplotu nastavitelnou uživateli v každé místnosti.

b) Pokud technické úpravy nejsou z jakéhokoli důvodu možné, je nutno zajistit plán větrání, (a školení v oblasti větrání) okny pomocí kontrolovatelných administrativních opatření.

Pokud škola nemá strojní větrání, měly by třídy být větrány provětráváním, pokud je to možné např. jednou za 45 minut a na začátku a na konci školního dne. Učitel rozhoduje o tom, kdo vyvětrá třídu po každé hodině a jak bude třída větrána. Na prvním stupni základní školy bude provádět větrání učitel, na druhém stupni může větrání zajistit skupina žáků.

Jedním z dostupných možných řešení kvality vnitřního ovzduší je podávat informaci uživatelům o koncentraci CO₂. Jsou známy displeje CO₂, které zároveň spolu s koncentrací škodliviny ukazují, kdy je nutné vyvětrat. Když koncentrace překročí uvedenou mez, tak se zobrazí červeně upozornění. Problémem však je určení umístění měření koncentrace CO₂. Mělo by identifikovat stav odváděného vzduchu, nikoliv lokální koncentrace, které jsou (kromě ideálně uměle větraného prostoru s funkčním rovnotlakým systémem) vždy v různých místech ve sledovaném prostoru variabilní a rozdílné.

Dalším bodem v cílech práce byla identifikace stavu vnitřního prostředí učeben měřením.

Identifikace stavu vnitřního prostředí učeben měřením

- **Identifikace skutečné koncentrace CO₂ v prostoru učebny s řízenou výměnou vzduchu centrální klimatizací a učebny s přívodem větracího vzduchu klasickými okny**

Na základě provedených měření v různých učebnách s rozličnými systémy větrání a venkovními podmínkami byly stanoveny následující problémy:

Problémy s kvalitou vnitřního prostředí a komfortem ve větších místnostech:

- Problém zajistit komfort pro všechny, když máme různé okrajové podmínky – místo u okna, místo u dveří, místo uprostřed řady - Stížnosti ovlivněné tím, kde uživatel seděl – polohově závislý komfort
- Problém s umístěním terasovitým – různé výškové profily a tím pádem měnící se teplota – vliv geometrie na komfort
- Rozdílné stavy prostředí pro systémy s vzduchotechnikou a bez ní

Problémy s větráním

- Problém s proměnností počtu přítomných osob – velice kolísá potřeba větracího průtoku během dne (počet míst k sezení neznamena automaticky násobně přepočtený průtok vzduchu) – učebna C215 po rekonstrukci
- Řešeno buď agilně studenty či přednášejícím – otevření oken – v našem podnebí vhodné pouze pro letní a přechodová období, v zimě je nežádoucí tepelná ztráta a tepelná nepohoda pro osoby u oken, nebo je otevírání oken zakázáno z důvodu bezpečnosti – učebny As135, A231 a učebna C215 před rekonstrukcí
- Řešeno regulačním systémem VZT, který má přeprogramovány denní režimy výuky nebo speciální režimy efektivní obsazenosti či neobsazenosti, nereaguje na skokové nárůsty přítomnosti – učebna C215 po rekonstrukci

Problémy s kvalitou výpovědi měření o stavu prostředí v posluchárně

- Měření popisuje situaci v jednom bodě, což je pro geometrii třídy a popisy situace pouze ilustrativní (velký objem třídy, neřešena uživatelská - pobytová zóna)
- Obecně při skutečném měření je limitován počet čidel a počet míst, kde měření může probíhat pro všechny sledované veličiny – vždy se musí odhadem určit, kde se bude měřit
- Tento odhad umístění se provádí bez konkrétních podkladů
- Dalším problémem je pak i umístění čidel koncentrace CO₂ pro regulaci vzduchotechniky a nuceného větrání – tradičně na odvodu vzduchu z učebny, opět poloha, která nevypovídá o skutečném stavu koncentrace škodliviny a stavu prostředí v místě pobytu osob (v uživatelské zóně), jedná se spíše o průměrnou hodnotu koncentrace
- nastávají různé situace pro místnosti bez funkčního systému vzduchotechniky a s tímto systémem

Třetím bodem v cílech práce byly systémové možnosti řešení větrání školních budov a následující podbody.

Systémové možnosti řešení větrání školních budov (přívod vzduchu) do učeben, které nemají centrální systém větrání (klimatizace)

Dílčí úlohy:

- **Popsat proudění vzduchu v prostoru učebny – možnosti využití přirozeného větrání, v učebně s konvekčním zdrojem tepla**
- **Jak je možné řešit problém přirozeným větráním, je – li v místnosti zdroj tepla**
- **Popis pohybu vzduchu v místnosti**
- **Stanovení množství čerstvého vzduchu, který je nutné přivést, aby se udržela přijatelná koncentrace škodlivin (koncentrace CO₂)**

Systémové možnosti řešení větrání školních budov (přívod vzduchu) do učeben, které nemají centrální systém větrání (klimatizace) jsou podrobně uvedeny v sedmé kapitole této práce. Možnosti jsou rozděleny na investičně i provozně méně náročné a na ty, u kterých náklady velmi závisí na typu a rozsahu instalace. Možnosti zahrnují následující přívodní a odvodní prvky a jejich možné kombinace: okna, přívodní profily, odtahové ventilátory, větrací a rekuperační jednotky.

Proudění vzduchu v prostoru učebny a možnosti přirozeného větrání byly popsány poli rychlostí proudění vzduchu a poli teplot ze simulačního softwaru. Popis pohybu vzduchu v místnosti podle modelu byl ověřen laboratorním měřením. Byla stanovena množství větracího vzduchu, která je nutné přivést za základních rozličných venkovních koncentrací a rozličných přijatelných vnitřních

koncentrací, aby se udržela přijatelná koncentrace škodlivin. Pro koncentraci 420 ppm v exteriéru byly určeny hodnoty množství větracího vzduchu podle přijatelné koncentrace (PK) v interiéru jako 18,52 m³/h na osobu pro PK 1500 ppm, jako 22,73 m³/h na osobu pro PK 1300 ppm a jako 34,48 m³/h na osobu pro koncentraci 1000 ppm. Tato množství vzduchu byla dána do souvislosti s rozličnými násobnými výměnami vzduchu. Pro zkoumanou místnost a přítomnost jedné osoby se hodnoty větracích průtoků pohybovaly pod jednonásobnou výměnou vzduchu, zatímco pro zkoumanou místnost a přítomnost šesti osob se hodnoty větracích průtoků pohybovaly nad dvounásobnou výměnou. Z důvodu zvyšující se koncentrace oxidu uhličitého ve venkovním vzduchu a jeho nesouladem se standardním složením vzduchu byly vysloveny závěry, že by množství větracího vzduchu a případně velikost výměny vzduchu mohly být v budoucnu navýšeny.

Hlavním cílem práce bylo zlepšení a nástrojové zjednodušení měření a vyhodnocení skutečné kvality vnitřního ovzduší a tepelného komfortu v určitém typu stávajících školních budov využitím pokročilých simulačních technik využívajících moderních výpočetních technologií. Východiskem byla vlastní zpracovaná analýza stávajících problémů větrání ve školních budovách, která identifikuje podstatné parametry, které je ovlivňují. Podle současné legislativy sumarizuje požadavky na způsob výpočtu parametrů větrání při minimalizaci energetické náročnosti technického systému budov.

Pro vybraný případ často se vyskytujícího způsobu větrání typického školního prostoru byl vytvořen a ověřen numerický simulační model turbulentního proudění vzduchu v učebně zařízené nábytkem a obsazené osobami. Model využívá všechny přednosti moderního způsobu generování geometrie, popisu povrchů instalovaných materiálů a teplotního popisu jednotlivých položek v uspořádání prostoru. Důležitým rysem modelu je aktivní tepelná přítomnost člověka na bázi lidského simulátoru.

Pro ověření validity výsledků matematického výpočetního programu ANSYS v případě přirozeného větrání učeben, byl experiment založený na využití klimatické komory a tepelného modelu člověka a typických prvků učebny – lavice, okno se třemi způsoby větrání (mikroventilace, vyklopení okna a otevírání křídla) a dveře. Experimenty probíhaly v klimatické komoře reálných rozměrů místnosti, která je obklopena vnějším prostorem k řízení komplexní vzduchotechnické situace. Model byl ověřen porovnáním s řízeným experimentálním měřením v klimatické komoře skutečné velikosti učebny, ve které byl nainstalován tepelný model člověka s ovladatelnými povrchovými teplotami.

Výsledky experimentu a porovnání s obdobně vytvořenými matematickými simulacemi modelu učebny ukázaly, že je model využitelný pro simulace přirozeného větrání skutečných učeben, pro stanovení průtoku vzduchu a rozložení teplot při různých konfiguracích konkrétních větracích prvků v učebnách.

Jako další přirozené využitím modelu se jeví možnost výběru optimální polohy umístění čidel pro sledování stavu vnitřního prostředí ve zkoumané místnosti. Další logickou návazností je řízení prvků přirozeného větrání v čase.

Model umožňuje identifikaci míst s kritickými parametry pro monitoring vnitřního prostředí, a proto představuje možnost aplikovat ovládací prvek vnitřního prostředí do škol.

Uspořádání simulačního modelu dovoluje přiřadit k simulovaným osobám i zdroje bodového znečištění škodlivinami a sledovat pak vývoj koncentrace znečišťujících látek v učebně. Tyto možnosti vyšší aplikace programu ANSYS umožňují, ale znamenají výrazně komplikovanější a hardwarově náročnější zařízení.

Výsledkem práce je první krok k metodice řízení větrání pro učebny bez vzduchotechniky. Vytvořený model dokáže popsat pole proudění v místnosti pro přirozené větrání. Primárním cílem tohoto modelu je určení pozice k umístění měřicích systémů a celkové ověření vhodnosti uspořádání učebního prostoru vzhledem k požadavkům na kvalitu vnitřního prostředí. Model umožňuje posouzení daného prostoru na přirozené větrání, kdy umožňuje stanovit pravděpodobnou optimální polohu pro monitorování stavu vnitřního prostředí.

Dlouhodobý záměr využití modelu je pro konkrétní konfiguraci určit, jak dlouho by se mělo daným typem větrání větrat během hodiny při konkrétních teplotních podmínkách interiéru, resp. stanovit optimální doby větrání pro dané období (letní, zimní, přechodové období). Model může zmírnit finanční náročnost a může zrychlovat potenciálně drahé experimentální ověřování větrání, kdy by se muselo zkoušet experimentálně pro každou požadovanou místnost, jak přesně větrat za rozličných venkovních podmínek.

Bylo ověřeno, že lze použít model turbulence $k - \epsilon$, který má linearizovanou závislost turbulentní viskozity u stěny. Toto je zásadní, protože model celé učebny s mnoha prvky větrání a proměnným obsazením by se složitějšími verzemi proudění bylo obtížně vypočitatelné na výkonném počítači, a pro výpočet lokálních extrémů by bylo nutné použití superpočítače.

10.1. Aplikace do praxe

Vytvořený model může ověřovat sporné praktické úlohy větrání prostorů srovnatelných parametrů, kdy jednoduché početní řešení nepostačuje k správnému vyhodnocení. Nejvýznamnější praktickou aplikací je určení nejvhodnějšího místa pro identifikaci stavu vnitřního prostředí měřicí jednotkou – u přirozeného větrání proud vzduchu opouštějící větraný prostor.

Model je možno dále rozvinout do poloautomatického provozu. Na uvedené řešení je možné navázat automatizací procesu a rozvinout model do plně automatizovaného provozu. Řídicí modelový systém navazuje na jednoduchý měřicí systém, který identifikuje základní hodnoty parametrů stavu vnitřního prostředí a jejich změny (teploty, koncentrace CO_2 a relativní vlhkost). Měřicí systém je propojen s automatickým ovládním otevírání oken a určí dobu, po kterou se větrá, a zda instalovaný systém přirozeného větrání umožní takovou výměnu vzduchu v reálném čase, která splňuje hygienické hodnoty.

Modelová simulace určuje, zda přirozené větrání umožní takovou výměnu vzduchu v reálném čase, která splňuje hygienické hodnoty.

10.2. Další pokračování prací na modelu větrání učebny

Vývoj modelu k použití pro monitorovací a ovládací prvek vnitřního prostředí do škol, který bych v budoucnu chtěla dále rozvíjet. V oblasti individuální regulace jsou ještě velké možnosti, jak přispět k vyšší spokojenosti uživatelů školních budov, a ovlivnit potřebu energie na vytápění, větrání a klimatizaci ve školních budovách.

Současný stav modelu umožňuje provést výpočet pro 1 konkrétní ustálený stav. Model pracuje se zjednodušením - bez účinku větru, jehož účinek může mít v konkrétních případech až zásadní vliv na proudění vzduchu (jeho směr i velikost). Model je možné v budoucnosti dále rozšiřovat o dosud neuvažované vlivy, např. lze použít simulací pro různé předpokladatelné ustálené stavy a z jejich kombinací v závislosti na zvoleném časovém kroku odvozovat dynamické chování systému při konkrétní zvolené rychlosti a také odvozovat změny parametrů vypočtené pro tyto ustálené stavy.

11. Seznam publikací, softwaru a technologií autora

Kohoutková, A. - Kabele, K.: Indoor Environmental Quality in Naturally Ventilated Office Building. In *Clima 2013 - 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC - "Energy Efficient, Smart and Healthy Buildings"*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013, p. 3713-3722. ISBN 978-80-260-4001-9.

Kohoutková, A. - Kabele, K.: Kvalita vnitřního prostředí na Stavební fakultě ČVUT v Praze. In *Vykurovanie 2013 Energetické, environmentálne a ekonomické aspekty pri prevádzke vykurovacích systémov*. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia ZSVTS, 2013, s. 329-332. ISBN 9788089216536.

Kohoutková, A. - Kabele, K.: Kvalita vnitřního prostředí v posluchárně vysoké školy. *PLYNÁR - VODÁR - KÚRENÁR + KLIMATIZÁCIA*. 2013, roč. 11, č. 3, s. 22-23. ISSN 1335-9614.

KOHOUTKOVÁ, A. a K. KABELE. Analýza kvality vnitřního ovzduší v budově vysoké školy, determinování indikátoru kvality vnitřního ovzduší. In: *Zborník prednášok z 25. vedeckej konferencie Vnútorná klíma budov 2014*. Vnútorná klíma budov 2014, Štrbské Pleso, 2014-12-02/2014-12-03. NITRA: SSTP – Slovenská spoločnosť pro techniku prostředí, 2014. s. 21-26. ISBN 978-80-89216-67-3.

Kohoutková, A. K.: Úspory energie na provoz systémů TZB a aerodynamika exteriéru. In *Juniorstav 16. odborná konference doktorského studia*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014, s. 96. ISBN 978-80-214-4851-3.

KOHOUTKOVÁ, A. and K. KABELE. Analysis of Indoor Air Quality in a Naturally Ventilated University Building, Determination of an Indoor Air Quality Indicator. In: DZELZITIS, E., ed. *Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 "Advanced HVAC and Natural Gas Technologies"*. Advanced HVAC and Natural Gas Technologies, Riga, 2015-05-06/2015-05-09. Riga: Riga Technical University, 2015, pp. 83-88. ISBN 978-9934-10-685-9.

KOHOUTKOVÁ, A. and K. KABELE. Indoor Air Quality Investigation in a Naturally Ventilated University Building, Air Change Measurement and Calculation Case Study. In: *Proceedings of the International Conference of Future Buildings and Districts*. International Conference of Future Buildings and Districts - Sustainability from Nano to Urban Scale, Lausanne, 2015-09-09/2015-09-11. Lausanne: DI, EPFL, 2015, pp. 369-374. ISBN 978-2-9701052-2-0.

KOHOUTKOVÁ, A. and K. KABELE. Case Study of Ventilation Strategy in a Room with Gas Appliances. In: HEISELBERG, P. K., ed. *CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress: volume 5*. CLIMA 2016 - 12th REHVA World Congress, Aalborg, 2016-05-22/2016-05-25. Aalborg: Aalborg University, 2016, ISBN 87-91606-30-6. Available from: http://vbn.aau.dk/files/233719380/paper_447.pdf

Tencar, J.; Mančík, Š.; Růžička, J.; Vonka, M.; Hájek, P.; Flanderka, O.; Kohoutková, A.; Nehasilová, M. et al. *SBToolCZ - Školské budovy*; Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2017. ISBN 978-80-01-05912-8.

KABELE, Karel a Alžběta KOHOUTKOVÁ. *Analýza příčin vlhkostních problémů a vzniku plísní v bytě: Zpráva o nezávislém měření a odborném posouzení příčin vlhkostních problémů a vzniku plísní v bytě č. 6, Palackého náměstí čp. 951, Dobřichovice*. Buštěhrad, 2017.

KABELE Karel a kolektiv. - *Subjektivní hodnocení tepelného komfortu při různých způsobech vytápění*, 2017

Adamovský, D.; Kohoutková A. - *Analýza šíření částic barvy v prostředí haly*. Buštěhrad, 2017

Dederová Kohoutková, A.; Kabele, K. Effective Ventilation Strategy for Indoor Air Polluted by Gas Appliances Operation WASTE FORUM. 2018, 2018(1), 35-47. ISSN 1804-0195.

Kny, M.; Dederová Kohoutková, A.; Hejl, J.; Pošta, J. Influence of the Geometric Arrangement of the Active Ceiling Soffit on Its Overall Cooling Performance In: Proceedings of the 9th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning. Tokyo: Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2018. ISBN 978-4-88967-138-4.

Dederová Kohoutková, A.; Horváthová, J.; Kny, M.; Nehasil, O. Case Study of Occupants Perception of Indoor Thermal Conditions under Different Heating Systems In: 2018 Building Performance Analysis Conference and SimBuild. Atlanta: ASHRAE, 2018. pp. 205-212.

Horváthová, J.; Dederová Kohoutková, A.; Kny, M.; Nehasil, O. Pokročilé riadenie vykurovacích a chladiacích plôch podľa meradiel tepelnej pohody TZB HAUSTECHNIK SK. 2018, XXVI.(4), 52-55. ISSN 1210-356X.

Kny, M.; Nehasil, O.; Horváthová, J.; Dederová Kohoutková, A. Simulační ověření funkce virtuální teploty pro prostorové termostaty In: Simulace budov a techniky prostředí 2018. Praha: IBPSA-CZ, 2018. p. 125-129. ISBN 978-80-907423-0-7.

Nehasil, O.; Horváthová, J.; Dederová Kohoutková, A.; Kny, M. Virtual Air Temperature Function for Room Thermostats In: Central Europe towards Sustainable Building (CESB19). Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series. ISSN 1755-1307.

Dederová Kohoutková, A.; Kny, M.; Hejl, J.; Pošta, J. Multikriteriální analýza pohledů při uvažování vnitřního prostředí budovy Časopis Stavebnictví. 2019, XIII (08/19), 34-39. ISSN 1802-2030.

Dederová Kohoutková, A.; Horváthová, J.; Kny, M.; Nehasil, O. The Effect of the Heating System on the Occupant's Thermal Comfort and Optimum Room Air Temperature, In: CLIMA 2019 Congress. Les Ulis Cedex A: EDP Sciences, 2019. E3S Web of Conferences. vol. 111 - 2019. ISSN 2267-1242.

Dederová Kohoutková, A.; Kny, M.; Pošta, J.; Hejl, J. - 3D stropní pohled s kombinovanou funkcí, Czech Republic. Utility Model CZ 33125. 2019-08-20.

Dederová Kohoutková, A.; Kny, M.; Pošta, J.; Hejl, J. - 3D stropní pohled s kombinovanou funkcí, Czech Republic. Utility Model CZ 33124. 2019-08-20.

Dederová Kohoutková, A.; Kny, M.; Pošta, J.; Hejl, J. - 3D stropní pohled s kombinovanou funkcí, Czech Republic. Utility Model CZ 33123. 2019-08-20.

Horváthová, J.; Kny, M.; Nehasil, O.; Dederová Kohoutková, A. - Regulátor pro řízení tepelné pohody ve vnitřním prostředí, Czech Republic. Utility Model CZ 33158. 2019-08-27.

Kny, M.; Nehasil, O.; Horváthová, J.; Dederová Kohoutková, A. - Nový způsob řízení vytápění – regulace dle měřítek tepelné pohody, TZB info. 2019, ISSN 1801-4399.

Dederová Kohoutková, A.; Kny, M.; Hejl, J., Pošta, J. - Souhrnná výzkumná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za roky 2017 – 2019 projektu č. TJ01000457, 3D aktivní pohled pro zlepšení vnitřního prostředí

Horváthová, J.; Dederová Kohoutková, A.; Kny, M.; Nehasil, O. - Souhrnná výzkumná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za roky 2017 – 2019 projektu č. TJ1000195, Pokročilé řízení otopných a chladicích ploch podle měřítek tepelné pohody

12. Použitá literatura a zdroje

A. Iqbal, A. Afshari, P.V.Neilsen and P. Heiselberg. 2012. *THE DISCHARGE COEFFICIENT OF A CENTRE - PIVOT ROOF WINDOW*. Copenhagen : 33rd Air Infiltration and Ventilation Centre Conference " Optimising Ventilative Cooling and Airtightness for [Nearly] Zero-Energy Buildings, IAQ and Comfort", 2012.

AEE – Institute of Sustainable Technologies: Anna Maria Fulterer, Armin Knotzer, David Venus. 2017. Renew School. *Sustainable school buildings in Europe with prefabricated timber elements, Examples and Experiences*. [Online] 02 2017. http://www.renew-school.eu/wp-content/uploads/2017/05/RS_Broschure_En.pdf. str. 52.

Ansys 16, 2. 3 Help. Design Points . *sharcnet.ca*. [Online] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb2_help/wb2h_designpoints.html.

Ansys Fluent Help. 2009. Planning Your CFD Analysis. [Online] 09. 01 2009. https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_gs/x1-290004.2.html.

Ansys Fluent Inc. CutCell Meshes. *Ansys Fluent Help*. [Online] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/poly_pfwb/pwb_wb_sec_gen_cutcell.html.

Ansys Fluent. 2006. Overview of Physical Models in FLUENT. [Online] 2006. [Citace: 01. 10 2015.] <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node381.htm>.

Ansys Inc. 2010. Ansys Customer Training Material, Lecture 6, Turbulence Modelling. Introduction to Ansys Fluent, Release 13.0. [Online] 2010.

ASHRAE. 2016. Advanced Energy Design Guide for K-12 School Buildings. *Technical resources*. [Online] 2016. [Citace: 10. 04 2017.] <https://www.ashrae.org/technical-resources/aedgs/zero-energy-aedg-free-download>.

ASHRAE, Inc. 2008. *Advanced Energy Design Guide for K-12 School Buildings, Achieving 30 % Energy Savings Toward a Net Zero Energy Buildings*. Atlanta : American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Inc., 2008. ISBN 978-1-933742-21-2.

Atlanta: ANSI. 2007. ASHRAE Standard 62.1 - 2007. Ventilation for Acceptable Indoor Air quality. [Online] 2007. <http://www.mintie.com/assets/pdf/education/ASHRAE%2062.1-2007.pdf>.

Begeni, M. a Zmrhal, V. 2015. Dotazníkový průzkum stavu školských budov. *Větrání škol*. Praha : TZB-info, 2015. Sv. <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/12873-dotaznikovy-pruzkum-stavu-skolskych-budov>.

Begeni, Marek a Zmrhal, Vladimír . 2014. Větrání učebny základní školy. *Vytápění, větrání, instalace*. 4, 2014, ISSN 1210 - 1389.

Begeni, Marek a Zmrhal, Vladimír. 2015. Potřeba energie na větrání učeben. *Vytápění, větrání, instalace*. 5, 2015, ISSN: 1210 - 1389.

Béghein, C., Jiang, Y. a Chen , Q. 2005. Using Large Eddy Simulation to Study Particle Motions in a Room. místo neznámé : Indoor Air 15, 2005. Sv. 281-290.

Bischof, Wolfgang, Rolf BUSCHMANN, Thomas GABRIO, Steffen ENGELHART, Birger HEINZOW, Olf HERBARTH, Caroline HERR, Hermann KRUSE, Susanne LAU, Wolfgang LORENZ, Inge MANGELSDORF, Volker MERSCH-SUNDERMANN, Wolfgang MISCH, Henning RÜDEN, SALTHAMMER a Klaus SE. 2008. Guidelines for Indoor Air Hygiene in school buildings. *gesundheitsamt-bw.de*. [Online] 2008. [Citace: 08. 08 2014.] http://www.gesundheitsamt-bw.de/MLS/Documents/Guidelines_Air_Quality_Schools_2008.pdf.

- Bonnema Eric, Matthew Leach, Shanti Pless, and Paul Torcellini, 2013.** Development of the Advanced Energy Design Guide for K-12 Schools – 50% Energy Savings, Technical Report. *National Renewable Energy Laboratory*. [Online] 02 2013. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51437.pdf>.
- Brown, G. L. a Roshko, A. O. 1974.** On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.* 1974, Sv. 64, 775-816.
- Bulva, Jiří. 2014.** Germicidní lampy, Detekční a inspekční UV lampy. *Charakteristika UV-C záření*. [Online] UNIMED PRAHA, s. r. o., 2014. [Citace: 20. 5 2014.] <http://www.germicidni-lampy.cz/charakteristika-uv-zareni>.
- CFD online. 2010.** CFD Online. *RNG k-epsilon model*. 10. 10 2010.
- COMET. 2013.** Dataloggery, teploměry, vlhkoměry. *Bezdrátová komunikace s loggery přes GSM*. . [Online] 2013. [Citace: 08. 06 2014.] <http://www.cometsystem.cz/produkty/dataloggery/bezdratova-komunikace-s-loggery-pres-gsm/reg-XGSM-Logg>.
- Croitoru, Cristiana. 2011.** Airflow and heat transfer modeling for a human bod yby computational fluid dynamics. *Mathematical Modeling in Civil Engineering*. [Online] 01. 03 2011. [Citace: 01. 06 2019.] <http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=9d060607-6e27-4c4e-acee-10f8233b6197%40sessionmgr101>.
- Crump, D., a další. 2005.** Investigation of volatile organic compounds in the indoor air of a school over a one year period following refurbishment. Beijing, China : Proceedings of Indoor Air, 2005. pp.4-9.
- Český normalizační institut. 2012.** Vyhláška č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby se změnami: 20/2012 Sb. *Sbírka zákonů*. [Online] 2012. <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/vyhlaska-c-268-2009-sb-o-technicky-pozadavcich-na-stavby-se-zmenami-20/2012-sb..>
- **2009.** Vyhláška č. 343/2009 Sb. ze dne 25. 9. 2009, kterou se mění vyhláška č. 410/2000 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých. *Sbírka zákonů*. [Online] 2009. http://www.cka.cc/prilohy/vyhlaska_343.
- **2009.** Vyhláška č. 343/2009 Sb. ze dne 25. 9. 2009, kterou se mění vyhláška č. 410/2000 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých. *Sbírka zákonů*. [Online] 2009.
- **2013.** Vyhláška č. 615/2010 Sb. Kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb. Praha : autor neznámý, 2013.
- D'Ambrosio Alfano, Francesca R., Laura BELLIA, Atze BOERSTRA, Froukje VAN DIJKEN, Elvira IANNIELLO, Gino LOPARDO, MINICHELLO, Piercarlo ROMAGNONI a Manuel Carlos GAMEIRO DA SILVA. Indoor Environment and Energy Efficiency in Schools: Part 1 Principles. Tu. 2010.** *Indoor Environment and Energy Efficiency in Schools: Part 1 Principles, REHVA Guidebook*. Turecko : REHVA, 2010.
- Dederová Kohoutková, A. a Kabele, K. 2018.** Effective Ventilation Strategy for Indoor Air Polluted by Gas Appliances Operation. *Waste Forum*. 2018, Sv. 2018(1), 35-47.
- Dijken. 2005.** Boersta et al. *Rehva Workshops Clima 2005*. Lausanne : REHVA, 2005. Sv. <https://www.slideshare.net/kcscroom/creating-the-productive-workplace>.
- Dlouhý, T. a Kolovratník, M. 2008.** Průmyslová energetika. Praha : ČVUT Fakulta strojní, 2008.
- Doležilková, H. 2007.** Rezidenční mikroprostředí. *Disertační práce*. Praha : Katedra TZB Fakulty stavební ČVUT v Praze, 2007.
- Engen, Willem. 2005.** *Guide to a Successful Simulation using Fluent*. [Online] <http://willem.engen.nl/uni/fluent/documents/external/guide-suc-fluent-sim.html> 2005.

- Fan, Jianhua. 2010.** Computational Fluid Dynamics on Buildings. *Mesh method*. Lyngby : Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2010. Sv. Lecture slides, 5.
- Fluent Inc. 1998.** Fluent user's guide. Version 5.0. Lebanon, NH, USA : Fluent Inc. , 1998.
- Fluent User Services Center. 2006.** Introductory FLUENT Notes. *Solver Settings, Introductory Fluent Training* . [Online] 12 2006.
- Fluent, Ansys. 2000.** č. kapitoly: 13. 2. 5, Natural Convection and Buoyancy - Driven Flows. *sharcnet.ca*. [Online] 2000. [Citace: 15. 10 2015.]
<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node572.htm>.
- Földváry, V. a Petráš, D. 2014.** Comparison of carbon dioxide concentration and air change rates in two identical dwellings before and after renovation in Slovakia. *E-NOVA 2014: Internationaler Kongress. Nachhaltige Gebäude*. Graz : Leykam Buchverlagsgesellschaft, 2014. s. 251--255. ISBN 978-3-7011-0316-4.
- Gebremedhin, KG a Wu, BX. 2003.** Characterization of flow field in a ventilated space and simulation of heat exchange between cows and their environment. *Journal of Thermal Biology*. 2003, Sv. 28(4), 301–19.
- Geier Sonja, Marc van Praet, Pawel Wargocki, Christian Anker Hviid, Irena Kondratenko, Jeroen Poppe, Thomas Heim, Gerhard Kopeing, Frank Lattke. 2012.** School Vent Cool, The way towards your cool school. *A Guideline To High Performance School Renovations In Europe*. [Online] July 2012. [Cited: 06 06 2016.]
http://schoolventcool.eu/sites/default/files/Brochure%20SchoolVentCool_The%20Way%20Towards%20Your%20Cool%20School.pdf.
- H. Wang, Qingyan (Yan) Chen. 2015.** Modeling of the impact of different window types on single-sided natural ventilation. místo neznámé : 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, Energy Procedia 78, 2015. 1549 – 1555.
- Hayashi, Tatsuya, a další. 2002.** CFD analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation by a human occupant. 2002, Sv. Volume 37, Issue 3.
- Hazucha, Juraj, Bárta, Jan a Hirš, Jiří. 2014.** Nucené větrání s možností rekuperace v objektech pro vzdělávání. *OPZP*. [Online] 21. 5 2014. <http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/15/4679-08-2009-vetrani-5web.pdf>.
- Chawner, John. 2011.** There's More to CFD Convergence than Reading the Manual. *Pointwise*. [Online] 2011.
- Chenari, Behrang, Dias Carrilho, João a Gameiro da Silva, Manuel. 2016.** Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. June 2016, 2016, Sv. 59, 1426 -1447.
- Cheong , KWD, a další. 2003.** Thermal comfort study of an air-conditioned lecture theatre in the tropics. *Building and Environment*. Cheong KWD, Djunaedy E, Sekhar SC, Wong NH, Ullah MB., 2003, Sv. 38(1), 63–73.
- Ianniello, Elvira. 2011.** Ventilation systems and IAQ in school buildings. *REHVA Journal*. <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/ventilation-systems-and-iaq-in-school-buildings> : REHVA, 2011. 02.
- Jaakkola, J. J. K., Heinonen, O. P. a Seppänen , O. 1989.** Sick building syndrome, sensation of dryness and thermal comfort in relation to room temperature in an office building: need for individual control of air temperature. *Environment International*. 163-168, 1989, Sv. vol.1,
[https://doi.org/10.1016/0160-4120\(89\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0160-4120(89)90022-6).

- Jaakkola, J.J.K., Heinonen, O.P. a Seppänen, O. 1989.** Sick building syndrome, sensation of dryness and thermal comfort in relation to room temperature in an office building: need for individual control of air temperature. *Environment International*. 1989, Sv. vol.1, 163-168.
- Jahoda, M. 2016.** Hydromechanické procesy, Turbulence. *Pedagogika, Hydro, Turbulentní proudění*. [Online] 2016. [Citace: 06. 03 2016.] <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/turbulentni.proudeni.pdf>.
- JINDRÁK, Martin. 2014.** Do moderních škol patří i vzduchotechnika. *Energeticky soběstačné budovy: První český titul zaměřený na výstavbu a provoz budov s nízkou energetickou náročností*. JINDRÁK, Martin. Do moderních škol patří i vzduchotechnika. *Energeticky soběstačné budovy: První český titul zaměřený na výstavbu a provoz budov s nízkou energetickou náročností*. 2014, roč. 2014, č. 1, s. 29-31. Dostupné z: <http://www.esb-magazin.cz/> 2014, Sv. č. 1, s. 29-31.
- Jindrák, Martin. 2012.** Rekonstrukce základní školy Kostelní Lhota. *atrea.cz*. [Online] 2012. [Citace: 21. 05 2014.] <https://www.atrea.cz/cz/412.rekonstrukce-zakladni-skoly-kostelni-lhota>.
- JINDRÁK, Martin. 2014 - 2.** Příklady škol s různými systémy řízeného větrání. *Energeticky soběstačné budovy: První český titul zaměřený na výstavbu a provoz budov s nízkou energetickou náročností*. 2014 - 2, Sv. Dostupné z: <http://www.esb-magazin.cz>, s. 33-35.
- Jokl, Miloslav. 2000.** *Zdravé obytné a pracovní prostředí*. Praha : Academia, 2000. SBN 80-200-0928-0.
- Kabrhel, G. 1903.** *Větrání a vytápění škol*. Vídeň : Nákladem Josefa Šafáře, 1903.
- Kåre Herstad, Letnes Architects. 1998.** Sun, light, and air in the Grong School in Norway. Verdal : EU project MEDUCA, EU program THERMIE, 1998.
- Karthik, T. S. D. a Durst, Franz. 2011.** Turbulence Models and Their Applications, 10th Indo German Winter Academy 2011. *Course Hero*. [Online] 2011. [Citace: 03. 03 2016.] <https://www.coursehero.com/file/20957708/info-turbulence-models/>.
- Kats, Gregory. 2006.** Greening America's Schools, Costs and Benefits. *USGBC*. [Online] October 2006. <https://www.usgbc.org/drupal/legacy/usgbc/docs/Archive/General/Docs2908.pdf>.
- KHSMKvO . 2012.** Vnitřní prostředí škol a školských zařízení. *Krajská hygienická stanice Moravskoslezského kraje se sídlem v Ostravě*. [Online] 2012. [Citace: 08. 06 2014.] http://www.khsova.cz/01_tisk/clanky_skoly_vnitri_prostredi.php?datum=2012-04-18.
- KHSMKvO. 2012.** Vnitřní prostředí škol a školských zařízení. *Krajská hygienická stanice Moravskoslezského kraje se sídlem v Ostravě*. [Online] 2012. [Citace: 08. 06 2014.]
- Kleiven, Tommy. 2003.** Natural Ventilation In Buildings, Architectural concepts, consequences and possibilities. *Dissertation Thesis*. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- Kodeš, Jindřich. 2008.** Analýza spiroergometrických dat. *EFakulta elektrotechnická Katedra kybernetiky*. Praha : ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2008. Sv. <https://nit.felk.cvut.cz/~xnovakd1/Projects/Spiro/JindrichKores.pdf>.
- Kohoutková A., Kabele K. 2013.** Kvalita vnitřního prostředí v posluchárně vysoké školy. *PLYNÁR - VODÁR - KÚRENÁR + KLIMATIZÁCIA*. 22-23, 2013, Sv. 11, ISSN 1335-9614.
- Kohoutková, A. a Kabele, K. 2015.** Analysis of Indoor Air Quality in a Naturally Ventilated University Building, Determination of an Indoor Air Quality Indicator. Riga: Riga Technical University : Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 "Advanced HVAC and Natural Gas Technologies", 2015. ISBN 978-9934-10-685-9, strana: 83-88.
- , 2015.** Analysis of Indoor Air Quality in a Naturally Ventilated University Building, Determination of an Indoor Air Quality Indicator. Riga : Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 "Advanced HVAC and Natural Gas Technologies", 2015. ISBN 978-9934-10-685-9..

- **2016.** Case Study of Ventilation Strategy in a Room with Gas Appliances,. *CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress: volume 5.* 2016, Sv. volume 5, ISBN 87-91606-30-6.
- **2015-7.** Proceedings of the International Conference of Future Buildings and Districts. *Indoor Air Quality Investigation in a Naturally Ventilated University Building, Air Change Measurement and Calculation Case Study.* Lausanne : EPFL, 2015-7. pp. 369-374. ISBN 978-2-9701052-2-0..
- Kohoutková, Alžběta. 2014.** Závěrečná výzkumná zpráva projektu SGS. *Porovnání kvality vnitřního prostředí Fakulty stavební ČVUT v Praze před a po rekonstrukci na podzim r. 2012.* Praha : ČVUT v Praze, 2014.
- **2013.** Závěrečná výzkumná zpráva projektu SGS. *Porovnání kvality vnitřního prostředí Fakulty stavební ČVUT v Praze před a po rekonstrukci na podzim r. 2012.* místo neznámé : ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2013.
- Koiv, T.-A. 2007.** Indoor climate and ventilation in Tallinn school buildings. *Proc. Estonian Acad. Sci.Eng.* 13, 2007, Sv. 1, pp.17-25.
- Koiv, Teet-Andrus. 2014.** The indoor climate and energy consumption of renovated schools. *Recent Advances in Energy, Environment, Biology and Ecology.* 2014, 100-105.
- Komínek, P., Weyr, P. a Hirš, J. 2017.** The use of modern technologies in carbon dioxide monitoring . *SSP - Journal of Civil Engineering.* 2017, Sv. Volume 12, Issue 2.
- Kozubková, M. 2008.** *Modelování proudění tekutin.* Ostrava : VŠB TU Ostrava, 2008.
- Kvalita vnitřního prostředí v posluchárně vysoké školy. Kohoutková, A. . a Kabele, K. 2013.* 3, Košice : V.O.Č. SLOVAKIA, s.r.o. , 2013.
- Lan, Li, Wargocki , Pawel a Lian , Zhiwei. 2011.** Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. *Energy and Buildings.* 43, 2011, 6.
- Litschmann, T., Rožnovský, J. a Hebelka, J. 2011.** Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí. *Dynamika koncentrací oxidu uhličitého ve volné krajině Moravského krasu a jejich vztah k meteorologickým prvkům.* Skalní mlýn : Středová, H., Rožnovský, J., Litschmann, T., 2011. ISBN 978-80-86690-87-2.
- Loomans, M. G. L. C. . 1998-2.** The measurement and simulation of indoor air flow. *Technovation.* https://www.researchgate.net/publication/254807628_The_measurement_and_simulation_of_indoor_air_flow, 1998-2.
- Lowry, L. K. 2013.** Improving the IEQ in Public School Classrooms, Schools as Pediatric Environments. *Winter Conference.* Dallas : Conference Proceedings, 2013.
- Malalasekera H. K., Versteeg W. 2007.** *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, Second Edition.* Harlow : Pearson, Prentice Hall, 2007. ISBN: 978-0-13-127498-3.
- Mathauserová, Zuzana. 2013.** *Větrání škol: Sborník přednášek.* Praha : Společnost pro techniku prostředí, 2013.
- Metasys. 2013.** Provozní obrazovka programu Metasys pro vzduchotechnické systémy na Fakultě stavební, ČVUT v Praze. Praha : Metasys, 2013.
- Mezivládní panel pro změny klimatu (IPCC). 2001.** TAR Climate Change 2001: The Scientific Basis. *Chapter: The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide,*. [Online] 2001. [Citace: 06. 01 2016.] <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/the-carbon-cycle-and-atmospheric-carbon-dioxide/>.
- MÜLLER, Helmut F.O., Michael WILSON, Marco SALA, Helena COCH, Francis ALLARD a Olli SEPÄNEN. 2015-01.** .Projects: Primary School, Empoli, Italy. Ventilation Sections. [Online] 2015-01. http://www.new-learn.info/packages/euleb/en/p20/index_s5.html.

MÜLLER, Helmut F.O., Michael WILSON, Marco SALA, Helena COCH, Francis ALLARD a Olli SEPÄNNEN. 2006 - 2. EULEB: European High Quality Low Energy Buildings. *Tanga School Stack Ventilation System*. [Online] 2006 - 2. http://www.new-learn.info/packages/euleb/en/p10/index_s1.html.

— **2006 -3.** EULEB: European High Quality Low Energy Buildings. *Projects: Tanga School, User Acceptance Chart*. [Online] 2006 -3. http://www.new-learn.info/packages/euleb/en/p10/index_8.html.

— **2006-4.** EULEB: European High Quality Low Energy Buildings. *Projects: High School, St Clément de Rivière, France, Natural ventilation system*. [Online] 2006-4. http://www.new-learn.info/packages/euleb/en/p15/index_s2.html.

— **2006.** Patio Effect, *Projects: Attam Centre, Spain*. [Online] 2006. http://www.new-learn.info/packages/euleb/en/p25/index_s3.html.

MÜLLER, Helmut, a další. 2006. EULEB Homepage. *European High Quality Low Energy Buildings*. [Online] 2006. <http://www.new-learn.info/packages/euleb/en/home/index.html>.

Myšák, Karel. 2014. Decplast. *Decplast Doplnky a služby*. [Online] 20. 05 2014. <http://www.decplast.cz/doplanky-sluzby>.

MŽP. 2017. Metodický pokyn pro návrh větrání škol. Praha : Evropská Unie, Evropské strukturální a investiční fondy, Operační program Životní prostředí, Ministerstvo životního prostředí ČR, 2017.

Ning, Mao, a další. 2016. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO₂ distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet. *Applied Energy*. Volume 164, 2016, 906-915.

Novoselac, A. a Srebric, J. Comparison of Air Exchange Efficiency and Contaminant Removal Effectiveness as IAQ Indices. *The University of Texas at Austin*. [Online] [Citace: 25. 03 2016.] http://www.cae.utexas.edu/prof/novoselac/publications/novoselac_ashrae_transactions_2003.pdf.

Olmedo, I., Ruiz de Adana, M. a Nielsen, P. V. . 2012. Validation of a human exhalation flow simulation in a room with vertical ventilation. *Ventilation 2012*. 2012.

Orszag, Steven A. . 2018. Direct Numerical Simulation. [Online] 5. 7 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_numerical_simulation.

P. Heiselberg, H. Dam, L. C. Soerensen, P. V. Nielsen, K. Svidt., 1999. Characteristics of Air Flow Through Windows. *P. Heiselberg, H. Dam, L. C. Soerensen, P. V. Nielsen, K. Svidt.,* místo neznámé : Aalborg University, Indoor Environmental Engineering, 1999. Sv. Vol.. R9940, No. 103.

Piomelli, Ugo. 2001. Large-eddy and direct simulation of turbulent flows - Lecture Notes. *9e conférence annuelle de la Société canadienne de CFD*. [Online] 2001.

Posner, JD, Buchanan, CR a Dunn-Rankin, D. 2003. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room. *Energy and Building*. 35(5), 2003, 515–26.

Renew School Project. 2017. *Renew School*. [Online] 2017. [Citace: 02. 05 2017.] <http://www.renew-school.eu/en/about/>.

Rongguang Jia, Pavan Mutnuri, Sunil Sathe, Bassem Girgis, Kingshuk Haldar, Shriram Jagannathan. 2015. ANSYS Fluent HPC 16.0 Update Presentation. [Online] 2015. <https://www.fluidcodes.com/archives/products/1438501415-16.0%20ANSYS%20Fluent%20HPC%20Update%20-%20Presentation.pdf>.

Rouaud, O. a Havet, M. 2002. Computation of the airflow in a pilot scale clean room using $k-\epsilon$ turbulence models. *International Journal of Refrigeration*. 25(3), 2002, 351–61.

Salim, M., Cheah, S. C. a Ong, K. C. 2011. Comparison of RANS, URANS and LES in the Prediction of Airflow and Pollutant Dispersion. San Francisco : WCES, 2011. Sv. Proceedings of World Congress on Engineering and Computer Science, Vol II.

Shaughnessy R., Haverinen-Shaughnessy U., Moschandreas D. 2008. The relationship between ventilation rates in classrooms and the prevalence of students scoring satisfactory in math and reading. Copenhagen : autor neznámý, 2008. Sv. Proceedings of Indoor Air 2008, 17-22, stránky 17-22.

Software Ansys 16. 2. 3 Help. Working with Design Points in the Parameter Set or Parameters Tab. *sharcnet.ca*. [Online]

Srbek, F. 1898. *Ventilace a topení škol*. Praha : Knihotiskárna Politiky, 1898.

Srebric, J., a další. 2008. CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and air flow simulations around human occupants in indoor environments. *Building and Environment* 43. 2008, 294-303.

Stammat Communications. 2006. Parents Grade Schools' IAQ: Student Attendance and Concentration Said to Suffer. *Buildings: Smarter Facility Management*. [Online] 2006. [Citace: 25. 05 2014.] <http://www.buildings.com/article-details/articleid/3326/title/parents-grade-schools-iaq.aspx>.

Stamou, A. a Katsiris, I. 2006. Verification of CFD model for indoor airflow and heat transfer. *Building and Environment*. 2006, Sv. 41, 1171-1181.

Sutikno Wirogo, Samir Rida. 2004. Fluent Tips and Tricks, Fluent Training. [Online] 2004. <http://willem.engen.nl/uni/fluent/documents/external/2004-UGM-Tips-Tricks.pdf>.

SXC. 2010. Zdraví, Boj s bakteriemi, Mozek švába skrývá nové druhy antibiotik. *Týden.cz*. [Online] 07. 09 2010. [Citace: 07. 06 2016.] https://www.tyden.cz/rubriky/zdravi/zdravi/mozek-svaba-skrывa-nove-druhy-antibiotik_180639.html#.U5A38fl_uoM.

Šubrt, Roman. 2011. Mikroklima ve veřejných budovách jako důvod instalace rekuperace. [Online] 2011. [Citace: 06. 08 2014.] http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e1fa66875530f33e8a/ecs_co2_publikace.pdf.

Tencar, J., a další. 2017. *SbToolCZ - Školské budovy*. Praha : Czech Technical University Publishing House, 2017. ISBN 978-80-01-05912-8..

Thermetrics. 2014. Operator's Manual for Newton 36-Zone Thermal Manikin System Serial #501-73. Seattle : Advanced Thermal Measurement Technology, A subsidiary of Measurement Technology NW, 2014.

Tulach, Aleš , a další. 2015. Možnosti stanovování kritických koncentrací plynu v objektech. *Vytápění, větrání a instalace*. 4, 2015, ISSN 1210-1389.

Turiel, Isaac. 2006. *Indoor Air Quality and Human Health*. London and New York : Taylor and Francis, 2006. ISBN 0-419-13870-6 (hbk).

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov. 2012. Výkresy laboratoří. Praha : ČVUT v Praze, 2012.

US EPA. 2012. Indoor Air Quality Design Tools for Schools. *EPA*. [Online] United States Environmental Protection Agency, 2012. [Citace: 20. 05 2014.] <https://www.epa.gov/iaq-schools/indoor-air-quality-design-tools-schools>.

Vlček, Petr a Jirout, Tomáš . 2013. *Modelování turbulentního proudění*. [Online] 2013. [Citace: 08. 03 2019.] <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>.

Vojáček, Antonín. 2013. Automatizace hw: rady a poslední novinky z oboru. *Datalogery a monitorovací stanice jako doplněk průmyslových strojů a výrobních linek*. místo neznámé : <http://automatizace.hw.cz/datalogery-a-monitorovaci-stanice-jako-doplněk-prumyslovych-stroju-a-vyrobnich-linek>, 2013.

VOKNO s. r. o. 2014. Plastová okna - Kování a bezpečnost. [Online] 2014. [Citace: 20. 05 2014.] <http://www.vokno-plastova-okna.cz/plastova-okna-kovani-a-bezpecnost/>.

- Wang, Miao, Lin, Caho-Hsin a Chen, Qingyan. 2012.** Advanced Turbulence Models for Predicting Particle Transport in Enclosed Environments. *Building and Environment*. 47, 2012, 40-49.
- Wikipedia: the free encyclopedia. 2001.** Data logger. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [Online] Wikimedia Foundation, 2001. [Citace: 08. 06 2014.] http://en.wikipedia.org/wiki/Data_logger.
- Wilcox, D. C. 2016.** k-omega turbulence model. *Standard (Wilcox) k-omega turbulence model*. 2016. Sv. https://en.wikipedia.org/wiki/K%E2%80%93omega_turbulence_model.
- Wilcox, D. C. 2006.** *Turbulence Modelling for CFD 3rd edition*. San Diego, str. 436 : DCW Industries, 2006. ISBN 978-1-928729-08-2.
- Wilcox, DC. 1988.** Reassessment of the scale determining equation for advanced turbulence models. *AIAA Journal*. 26(11), 1988, 1299–311.
- Yeager, Fred. 2014.** Indoor Air Quality, A Guide for Educators. *Facilities, Facility Design*. [Online] California Department of Education: Learning Support, 20. 05 2014. <http://www.cde.ca.gov/ls/fa/sf/iaq.asp#Recommended>.
- Zácha, Pavel. 2018.** Turbulentní proudění. *Ústav energetika Fakulty strojní ČVUT Fluent přednášky*. [Online] 01. 03 2018. [Citace: 01. 03 2016.] <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/FLUENT-prednaska-3-Zacha-LS-2014.pdf>.
- Zeiler, Wim, de Waard, Mark a Boxem, Gert. 2013.** *THE FIRST DUTCH PASSIVE HOUSE AND PLUS ENERGY SCHOOLS: SOME DUTCH IAQ EXPERIENCES IN SCHOOLS*. Eindhoven : Air Infiltration and Ventilation Centre, 2013.
- Zelenský, Petr, Barták, Martin a Hensen, Jan L. M. 2013.** Faktory ovlivňující CFD simulaci konvekčního proudu nad zdrojem tepla ve vnitřním prostředí. *Vytápění, větrání, instalace*. 5, 2013, Sv. ročník 22, ISSN 1210 - 1389.
- Země je CO2. 2019.** Země je CO2 Hlavní stránka. *CO2 - earth*. [Online] 05. 10 2019. <https://cs.co2.earth/>.
- Zhang, W a Chen, Q. 2000.** Large eddy simulation of indoor airflow with a filtered dynamic sub-grid scale model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Zhang W, Chen Q., 2000, Sv. 43(17), 3219–31.
- Zimmermann, Claudia a Groll, Rodion. 2014.** Modelling Turbulent Heat Transfer in a Natural Convection Flow. místo neznámé : *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2014. Sv. <http://www.scirp.org/journal/jamp>, 2. 662-670.
- Zmrhal, Vladimír. 2016.** Větrání a klimatizace / Větrání s rekuperací / Historie, současnost a budoucnost požadavků na větrání škol. *TZB-info.cz*. [Online] 21. 11 2016. [Citace: 02. 03 2018.] <http://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/14981-historie-soucasnost-a-budoucnost-pozadavku-na-vetrani-skol>.
- . 2017.** Větrání škol v souvislostech. Praha : Společnost pro techniku prostředí, 2017. ISBN 978-80-02-02718-8.

13. Použité symboly a zkratky

Zkratka - popis

CO₂ oxid uhličitý

CFD Computational Fluid Dynamics (počítačová simulace dynamického proudění tekutin)

DES - Detached Eddy Simulation (oddělená metoda velkých vírů)

DNS – Direct Numerical Simulation (přímá numerická simulace)

° C stupeň Celsia

Cd – výtokový součinitel

ϵ (epsilon) - rychlost disipace turbulentní kinetické energie

HVAC – systémy TZB, které řeší vytápění, větrání a klimatizaci (Heating, Ventilation, Air Conditioning)

IAQ – indoor air quality – kvalita vnitřního ovzduší

IEQ – indoor environmental quality – kvalita vnitřního prostředí

k – turbulentní kinetická energie

K – stupeň Kelvina

LES – metoda velkých vírů

N - S rovnice = Navierovy – Stokesovy rovnice

nZEB – nearly Zero Energy Buildings (budovy s téměř nulovou spotřebou energie)

RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes equations

RH – relativní vlhkost

RNG - renormalization group (renormalizační grupy)

RPV – rychlost proudění vzduchu

SF₆ – fluorid sírový

Ta – teplota vzduchu

Tg – teplota kulového teploměru

TMČ - tepelný model člověka (termální manikin)

TVOC – suma organických těkavých sloučenin

TZB - technická zařízení budov

VAV (Variable Air Volume) - systém klimatizace s proměnným objemem

VOC (volatile organic compounds) – organické těkavé sloučeniny

VP – vnitřní prostředí

ω (omega) - specifická disipace kinetické energie k, alternativně frekvence turbulence

ZZE – zákon zachování energie

ZZT – zpětné získávání tepla

14. Seznam obrázků

1.1 Obr. Faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí ve školách (IEQ) podle (D'Ambrosio Alfano, 2010).....	15
1.2 Obr. Studijní produktivita žáků základních škol v matematice a čtení v závislosti na množství venkovního vzduchu na osobu (l/s) podle (Shaughnessy R., 2008).....	16
1.3 Obr. Týdenní střední koncentrace formaldehydu v interiéru (exteriér, školky, základní školy, lidská obydlí) a exteriéru ve Francii podle studie (Crump, a další, 2005).....	16
1.4 Obr. Přínos vylepšené IAQ na zdraví osob v budovách (venkovní vzduch, osobní větrání, vlhkost a škodliviny) podle studie (Kats, 2006).....	17
1.5 Obr. Ilustrační foto plísně ukryté za nábytkem v budově školy v USA (Lowry, 2013).....	18
1.6 Obr. Faktory znečištění venkovního ovzduší (US EPA, 2012).....	19
1.7 Obr. Schéma znečištění vnitřního ovzduší vzduchotechnickým potrubím (zdroje a cesta vniknutí do vnitřního prostředí) (Lowry, 2013).....	20
2.1 Obr. Závislost dávky čerstvého vzduchu na množství oxidu uhličitého v interiéru - podle dizertační práce (Doležilková, 2007).....	25
2.2 Obr. Porovnání průběhu koncentrací CO ₂ v závislosti na použitém systému větrání v učebně základní školy (Begeni, a další, 2014).....	26
2.3 Obr. Vytápění učeben parními tělesy s přívodem větracího vzduchu – podle (Srbek, 1898).....	27
2.4 Obr. Vytápění a větrání v Židovské škole v Jáchymově ulici - (Mathauserová, 2013).....	28
2.5 Obr. Koncepční typy větrání pro školy – schémata – podle (Geier Sonja, 2012).....	28
2.6 Obr. Kumulativní koncentrace CO ₂ v třídách střední školy (Estonsko) - (Koiv, 2014).....	32
2.7 Obr. Kumulativní koncentrace CO ₂ v třídách základní školy (Estonsko) - (Koiv, 2014).....	32
2.8 Obr. Průměrná, maximální a minimální koncentrace CO ₂ v 11 základních školách v Nizozemí (Dijken, 2005).....	33
2.9 Obr. Porovnání koncentrací CO ₂ ve 3 sledovaných školách - Nizozemí - (Zeiler, a další, 2013) ..	34
2.10 Obr. Normalizovaná koncentrace CO ₂ vybraných škol v Nizozemí - (Zeiler, a další, 2013).....	34
2.11 Obr. Schéma vnitřní části solárního komínu s prouděním vzduchu v budově B školy Tanga, Švédsko - (MÜLLER, 2006 - 2).....	35
2.12 Obr. Pohled na budovu školy Tanga se solárními komíny - (MÜLLER, 2006 -3).....	35
2.13 Obr. Příklad řešení větrání třídy střední školy ve Francii pomocí architektonických úprav (MÜLLER, 2006-4).....	36
2.14 Obr. Větrání objektu zvláštní školy v Seville – řez (MÜLLER, 2006).....	36
2.15 Obr. Schéma řešení větrání pro letní a zimní podmínky základní školy v Empoli – (MÜLLER, 2015-01).....	37
2.16 Obr. Větrání třídy vysoké školy Rhein- Sieg (MÜLLER, 2015-01).....	37
2.17 Podhled na přívodní (v popředí) a odvodní větrnou věž základní školy Media v Grongu, Norsko - (Kleiven, 2003).....	38
2.18 Obr. Motorizovaná skleněná dvířka v okenním otvoru (zakroužkovaná část) umožňují proudění vzduchu ze tříd do odvodního prostoru (uprostřed). Ventilátor je umístěn vysoko v odváděcí věži (vpravo) - (Kleiven, 2003).....	39
2.19 Obr. Panel filtrů (celkem šest, tři kazety vlevo jsou na tomto obrázku odstraněny) na konci zabudovaného přívodního kanálu (vpravo), tlumiče hluku v distribuční komoře (uprostřed) a odsávací ventilátor v odváděcí věži (vlevo) - (Kleiven, 2003).....	39
2.20 Obr. Schéma větrání nového křídla základní školy v Grongu, Norsko, (Kåre Herstad, Letnes Architects, 1998).....	40
2.21 Obr. pohled na větrací komory základní školy ze zadní strany a schéma větrání školní budovy v Grongu, Norsko s umístěním ventilátorů, klapky a přívodních a odvodních otvorů - (Chenari, a další, 2016).....	40
2.22 Obr. Vliv možnosti ovládat teplotu na produktivitu (Kats, 2006).....	41
2.23 Obr. Mapa klimatických zón USA podle (ASHRAE, 2016).....	42
2.24 Obr. Průměrné hodnoty koncentrace CO ₂ v učebnách v průběhu jedné vyučovací hodiny ve venkovním prostředí (Šubrt, 2011).....	45
2.25 Obr. Škola v Kostelní Lhotě v letech 1876, po přestavbě v 2. polovině 20. století a po rekonstrukci v r. 2013 (Jindrák, 2012).....	45

2.26 Obr. Koncentrace CO ₂ v průběhu dne bez vzduchotechniky – modrá křivka bez, a se VZT – červená křivka (Jindrák, 2012)	46
2.27 Obr. Příklad moderní budovy školy a učebna s nuceným větráním – přívodem vzduchu - (Begeni, a další, 2014)	47
2.28 Obr. Nucené větrání – odvod vzduchu a větrací jednotka v učebně – detail řešení přívodních a odvodních prvků na fasádě - (Begeni, a další, 2014)	47
2.29 Obr. Monitor hodnotící IAQ (fotografie autora)	49
6.1 Obr. Pohled na ústřednu a čidla prostředí z měření v posluchárně As135 (autor)	54
6.2 Obr. Zimní měření koncentrace CO ₂ - (As135) s vyznačenými hranicemi 700 ppm a 1000 ppm - přirozené větrání, zavřená okna (autor)	54
6.3 Obr. Letní měření koncentrace CO ₂ - (As135) s vyznačenými hranicemi 700 ppm a 1000 ppm - přirozené větrání, zavřená okna (autor)	55
6.4 Obr. fotografie z měření kvality vnitřního ovzduší a teplot v učebně vysoké školy (autor)	55
6.5 Obr. teploty a koncentrace CO ₂ během měření v A231 (autor)	56
6.6 Obr. Fotografie z měření v posluchárně C215 před a po rekonstrukci – umístění měřicího stojanu (autor)	56
6.7 Obr. Přívod vzduchu anemostaty v posluchárně C215 (autor)	57
6.8 Obr. Regulační schéma vzduchotechniky pro posluchárny vysoké školy v programu Metasys (Metasys, 2013)	58
6.9 Obr. měření kvality vnitřního ovzduší (koncentrace CO ₂) pro letní období v posluchárně vysoké školy po rekonstrukci (Kohoutková, 2013)	58
6.10 Obr. měření tepelného komfortu a kvality vnitřního ovzduší pro zimní období v posluchárně vysoké školy po rekonstrukci (Kohoutková, 2014)	59
6.11 Obr. Měřicí stojan v posluchárně vysoké školy (Kohoutková A., 2013)	60
6.12 Obr. Naměřené koncentrace CO ₂ v posluchárně C215 s vyznačenými hranicemi 700 ppm a 1000 ppm při zimním měření (autor)	61
6.13 Naměřené koncentrace CO ₂ v posluchárně C215 s vyznačenými hranicemi 700 ppm a 1000 ppm při letním měření (autor)	61
8.1 Obr. Rozdělení kontinua do bloků (autor)	69
8.2 Obr. Použitý mesh v modelu (autor)	72
8.3 Obr. Některé vyhodnocovací řezy X a Y zobrazené společně – pohledy z boků (autor)	73
8.4 Obr. Některé vyhodnocovací řezy X a Y zobrazené společně – pohled zeshora (autor)	73
8.5 Obr. Vyplněné kontury rychlosti proudění v [m/s] zobrazené na rovině X (autor)	74
8.6 Obr. Vyplněné kontury rychlosti proudění v [m/s] zobrazené na rovině X a na doméně lidského simulátoru pro vyklopené okno ve 2 rovinách (autor)	74
8.7 Obr. Rozložení velikosti teplot v [K] v řezu při působení lidského simulátoru v chladné učebně (autor)	74
8.8 Obr. Ověření rozložení teplot v [K] při působení lidského simulátoru v chladné místnosti, zobrazení vyplněných kontur teploty (autor)	75
8.9 Obr. Prostorový model uspořádání dvou komor, znázornění vektorového pole rychlostí v [m/s] v okolí okna v komoře s experimentem (autor)	75
8.10 Obr. Rozložení teplot v okolních prostorech na počátku experimentu v [K], zobrazení ve 2 kolmých rovinách (autor)	75
8.11 Obr. Vyplněné kontury rychlostí proudění v [m/s] uvnitř a vně komory (autor)	76
8.12 Obr. Rozložení velikostí rychlosti proudění v [m/s] ve svislé rovině Y =2,2 (autor)	76
8.13 Obr. Vektory rychlosti proudění v [m/s] zobrazené na rovině (řezu) X a v doméně lidského simulátoru (autor)	76
8.14 Obr. Detail rozložení vektorů rychlosti proudění v [m/s] v rovině (řezu) Y (autor)	77
9.1 Obr. schéma laboratoře – půdorys – interiérový a exteriérový prostor (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, 2012)- úprava autor	78
9.2 Obr. schéma laboratoře – řez – interiérový a exteriérový prostor ((Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, 2012), úprava autor	79
9.3 Obr. Jednotlivé zóny TMČ - (Thermetrics, 2014)	80
9.4 Obr. Vybraná ambientní čidla TMČ (zleva kulový teploměr laboratorní, čidlo RPV a teplotní čidlo s kulovým teploměrem TMČ (fotografie autora)	80

9.5 Obr. schéma experimentálního měření: stojany s čidly 1 - 4, TS – termostat, OT – otopné těleso, OKN – okno, DVE – dveře (autor).....	81
9.6 Obr. schéma měření pro experiment D - stojany s čidly 1 - 4, TS – termostat, OT – otopné těleso, OKN – okno, DVE – dveře, stanoviště 5 – stanoviště čidel ve vstupním prostoru (předsíňce) – (autor).....	85
9.7 Obr. Fotodokumentace z konfigurace jednotlivých experimentálních měření – TMC s ambientními čidly, okno a dveře otevřené na 30° (autor).....	86
9.8 Obr. Fotodokumentace z konfigurace jednotlivých experimentálních měření – pohled z exteriérového prostoru na okno opatřené lištou s lankem (autor).....	86
9.9 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu a kulového teploměru pro experiment A (autor)	87
9.10 Obr. Zóny TMC po ukončení experimentu A vyklopeného okna na 7,5° (autor).....	90
9.11 Obr. Zóny TMC po ukončení experimentu B otevřeného okna na 30° (autor).....	91
9.12 Obr. Zóny TMC po ukončení experimentu C otevřeného okna na 90° (autor).....	92
9.13 Obr. Zóny TMC po ukončení experimentu D otevřeného okna na 30° a dveří na 30° (autor)	93
9.14 Obr. Výpočtové množství větracího vzduchu vztaženého na 1 osobu a násobnost výměny vzduchu pro experimentální místnost (autor).....	96
9.15 Obr. Výpočtové množství větracího vzduchu přiváděného za 1 hodinu pro 6 osob a násobnost výměny vzduchu pro experimentální místnost (autor).....	97
16.1 Obr. Koncentrace CO ₂ a vliv na člověka (Jokl, 2000).....	121
16.2 Obr. Možnosti poloh okna při větrání – otevřené okno, sklopené okno, mikroventilace (VOKNO s. r. o., 2014)	122
16.3 Obr. č. 4: Větrací mřížky v okně (Myšák, 2014)	122
16.4 Obr. č. 5: Větrací štěrby v okně (Myšák, 2014)	122
17.1 Obr. teplota kulového teploměru v C215 – letní podmínky (autor)	124
17.2 Obr. RPV v C215 – letní podmínky (autor).....	124
17.3 Obr. RH v C215 – letní podmínky (autor), (Kohoutková, 2013).....	124
17.4 Obr. teplota kulového teploměru v C215 – zimní podmínky (autor).....	124
17.5 Obr. RPV v C215 – zimní podmínky (autor).....	125
17.6 Obr. RH v C215 – zimní podmínky (autor).....	125
17.7 Obr. Letní měření teploty kulového teploměru – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor).....	125
17.8 Obr. Letní měření teploty – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor).....	126
17.9 Obr. RPV v letním období - (As135) – přirozené větrání, zavřená okna a dveře, (autor).....	126
17.10 Obr. Zimní měření teploty kul. teploměru – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor).....	126
17.11 Obr. Zimní měření teploty vzduchu – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor)	127
17.12 Obr. RPV v zimním období - (As135) – zavřená okna a dveře, (autor)	127
17.13 Obr. RH v zimním období - (As135) – zavřená okna a dveře, (autor)	128
17.14 Koncentrace CO ₂ při přítomnosti 20 osob v A231, provětrávání oknem a dveřmi (autor).....	128
17.15 Koncentrace CO ₂ a TVOC při přítomnosti 20 osob v A231, provětrávání oknem a dveřmi (autor).....	129
17.16 Teploty vzduchu a relativní vlhkost v A231, provětrávání oknem a dveřmi (autor).....	129
17.17 Obr. Naměřené teploty a vlhkosti v posluchárně vysoké školy C215 – zima - (Kohoutková A., 2013).....	130
17.18 Obr. Teplota kulového teploměru v posluchárně vysoké školy C215 – zima – (autor).....	130
17.19 Teplota vzduchu v posluchárně vysoké školy C215 – zima - (autor).....	130
17.20 Obr. Naměřené RPV v posluchárně vysoké školy C215 – zima - (autor).....	131
17.21 Obr. Teplota kulového teploměru v posluchárně vysoké školy C215 – léto – (autor).....	131
17.22 Obr. teplota vzduchu v posluchárně vysoké školy C215 – léto - (autor).....	131
17.23 Obr. Naměřené RPV v posluchárně vysoké školy C215 – léto - (autor).....	132
17.24 Obr. Naměřené RH v posluchárně vysoké školy C215 – léto - (autor).....	132
19.1 Obr. Experimentální měření koncentrací SF ₆ a CO ₂ v budově vysoké školy při zavřených oknech (Kohoutková, a další, 2015-7)	135
20.1 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment A (autor).....	136
20.2 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment B (autor).....	136
20.3 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment C (autor)	137
20.4 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment D (autor)	137

21.1 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment A (autor)	138
21.2 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment B (autor)	138
21.3 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment C (autor)	139
21.4 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment D (autor)	139

15. Seznam tabulek

2-1 Tab. Změny množství větracího vzduchu na osobu podle změn koncentrací CO ₂ (autor).....	25
2-2 Tab. Návrhové místnosti prototypu školní budovy (ASHRAE, 2016).....	43
2-3 Tab. Opatření k úspoře energií v budově školy Alder Creek (ASHRAE, 2016).....	43
6-1 Tab. Shrnutí analýzy VP školních budov ve vztahu k použitému systému větrání (autor)	62
8-1 Tab. Materiálové parametry modelu (materiálové charakteristiky U) – (autor).....	70
8-2 Tab. Přehled prvků modelu a jejich variabilita (autor).....	71
8-3 Tabulka povrchových teplot (autor).....	71
9-1 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu A (autor).....	82
9-2 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu B (autor).....	82
9-3 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu C (autor)	83
9-4 Tab. Umístění čidel na stojanu a ve výšce nad podlahou při experimentu D (autor)	84
9-5 Tab. Doba dosažení mezní teploty v jednotlivých případech (autor).....	87
9-6 Tab. Naměřené hodnoty teplot vzduchu v exteriéru a interiéru během experimentů a příslušné hustoty (autor).....	88
9-7 Tab. Souhrn experimentů a požadované doby větrání (autor)	93
9-8 Tab. Porovnání experimentálních výsledků a výsledků simulace (autor)	94
9-9 Tab. Změny množství větracího vzduchu na osobu podle změn koncentrací CO ₂ (autor).....	95
9-10 Tab. Násobnost výměny vzduchu pro experimentální místnost a požadovaný průtok vzduchu (autor)	95
16-1 Tab. Výsledná teplota pro bytové místnosti (Český normalizační institut, 2013).....	119
16-2 Tab. Rychlost proudění vzduchu v bytových místnostech (Český normalizační institut, 2013)	119
16-3 Tab. Relativní vlhkost vzduchu v bytových místnostech (Český normalizační institut, 2013)	119
16-4 Tab. Teploty a množství odváděného vzduchu pro hygienická zařízení u bytových místností (Český normalizační institut, 2013)	120
16-5 Tab. Hodinové limity pro plynné škodliviny, prach a VOC	120
16-6 Tab. Výsledné teploty, rychlosti proudění a relativní vlhkosti vzduchu pro školní místnosti (Český normalizační institut, 2009).....	121
16-7 Tab. Současné návrhové kritéria pro systémy TZB ve školách podle ASHRAE: (Atlanta: ANSI, 2007).....	123

16. Příloha č. 1 - Legislativní podmínky

Tato (příloha) obsahuje požadavky kladené na vnitřní prostředí školních budov z hlediska legislativy.

K dosažení optimálního vnitřního prostředí a tepelné pohody uživatelů byly doporučeny vhodné intervaly hodnot parametrů vnitřního prostředí. Podle zákona č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví musí být splněny mikroklimatické podmínky na základních, středních, předškolních a školských zařízeních. Dále jsou provozovatelé povinni zajistit vnitřní prostředí pobytových místností v těchto stavbách tak, aby odpovídalo hygienickým limitům chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů upravených prováděcími právními předpisy. Vyhláška č. 15/2010 Sb. vymezuje RH na 30 – 65 %, rychlost proudění vzduchu 0,13 – 0,25 m/s a výslednou teplotu pro chladné období roku: $t_g = 22,0 (+/-) 2,0$ °C a pro teplé období 24 (+/-) 1,5. Dalším požadavkem je požadavek na koncentraci CO₂, který udává vyhláška č. 20/2012 Sb., kdy maximální přípustná koncentrace CO₂ je 1500 ppm.

16.1. Tabulky z Vyhlášky č. 15/2010 Sb.

16-1 Tab. Výsledná teplota pro pobytové místnosti (Český normalizační institut, 2013)

Typ pobytové místnosti ¹⁾	Výsledná teplota t_g (°C) období roku	
	teplé	chladné
Ubytovací zařízení	24,0±2,0	22,0±2,0
Zasedací místnost staveb pro shromažďování většího počtu osob	24,5±1,5	22,0±2,0
Haly kulturních a sportovních zařízení	24,5±1,5	22,0±2,0
Učebny ²⁾	24,5±1,5	22,0±2,0
Ústavy sociální péče	24,0±2,0	22,0±2,0
Zdravotnická zařízení ³⁾	24,0±2,0	22,0±2,0
Výstaviště	24,5±2,5	22,0±3,0
Stavby pro obchod	23,0±2,0	19,0±3,0

16-2 Tab. Rychlost proudění vzduchu v pobytových místnostech (Český normalizační institut, 2013)

teplé období roku	0,16 – 0,25 m·s ⁻¹
chladné období roku	0,13 – 0,20 m·s ⁻¹

V tab. 20- 1 jsou uvedeny teploty kulového teploměru pro učebny, které nejsou zařízením pro výchovu a vzdělávání. Tabulka 20 - 3 a 20 - 4 pro rychlosti proudění platí pouze, nejsou – li jiné požadavky ve zdravotnických zařízeních.

16-3 Tab. Relativní vlhkost vzduchu v pobytových místnostech (Český normalizační institut, 2013)

teplé období roku	nejvýše 65 %
chladné období roku	nejméně 30 %

16-4 Tab. Teploty a množství odváděného vzduchu pro hygienická zařízení u obytných místností (Český normalizační institut, 2013)

	Teplota vzduchu t_i (°C)	Množství odváděného vzduchu za hodinu
Umývárny	22	30 m ³ na 1 umyvadlo
Sprchy	25	35 - 110 m ³ na 1 sprchu
WC	18	50 m ³ na 1 mísu 25 m ³ na 1 pisoár

16.2. Tabulky z metodického pokynu k Vyhlášce č. 15/2010 Sb.

Pro následující látky je stanoven tzv. přípustný hodinový limit. Pro případ směnového provozu či pevně stanovené pracovní doby, je možné koncentrace látek uvádět podle Světové zdravotnické organizace v 8 – hodinových nebo směnných limitech.

16-5 Tab. Hodinové limity pro plynné škodliviny, prach a VOC

Ukazatelé	Hodinový limit v $\mu\text{g}/\text{m}^3$
oxid dusičitý (NO ₂)	100
frakce prachu PM ₁₀	150
frakce prachu PM _{2,5}	80
oxid uhelnatý (CO)	5 000
ozón (O ₃)	100
amoniak (NH ₃)	200
benzen (C ₆ H ₆)	7
toluen (C ₇ H ₇)	300
suma xylenů (C ₈ H ₁₀),	200
styren (C ₈ H ₈),	40
etylbenzen (C ₈ H ₁₀),	200
formaldehyd (HCHO)	60
trichloretylen (C ₂ HCl ₃)	150
tetrachloreten (C ₂ Cl ₄)	150

16.3. Vyhláška č. 20/2012 Sb.

Max. přípustná koncentrace CO₂: 1500 ppm (Český normalizační institut, 2012)

16.4. ASHRAE 62.1 - 2007

Kvality vnitřního prostředí se také týká norma ASHRAE 62.1 – 2007, která mimo jiné hovoří o větrání pro přijatelnou kvalitu vnitřního prostředí. V příloze C této normy je uvedeno, kdy bude značná většina uživatelů, kteří vejdou do daného prostoru, spokojena z hlediska koncentrace CO₂ a oděrů. Tento stav nastane, pokud bude ustálený stav koncentrace CO₂ v interiéru, která nebude více než o 700 ppm vyšší než venkovní koncentrace CO₂. To znamená, že při venkovní koncentraci kolem 400 ppm, je přijatelná vnitřní koncentrace 1 100 ppm. (Atlanta: ANSI, 2007)

Ačkoliv tato norma v ČR nemá žádnou právní podporu, vzhledem k uvedení situace pro školní budovy v USA tuto normu uvádím.



16.1 Obr. Koncentrace CO₂ a vliv na člověka (Jokl, 2000)

16.5. Vyhláška č. 343/2009 Sb. – Větrání ve školních prostorech

Vyhláška č. 343/2009 Sb., (změněna na 465/2016 Sb.) hovoří velmi obecně o pravidlech větrání ve školách.

Prostory pro výchovu a vzdělávání a určené k pobytu osob musí být přímo větratelné. Pokud klesne teplota vzduchu v učebnách ve třech po sobě následujících dnech pod 18 °C, ne však méně než 16 °C, nebo při poklesu teploty vzduchu v jednom dni pod 16 °C, musí být provoz zastaven. Pokud nastanou venkovní extrémní podmínky, kdy maximální venkovní teplota vzduchu je vyšší než 30 °C, nebo kdy je výsledná teplota kulového teploměru $t_{g \max}$ vyšší než 31 °C, musí být přerušen provoz.

16-6 Tab. Výsledné teploty, rychlosti proudění a relativní vlhkosti vzduchu pro školní místnosti (Český normalizační institut, 2009)

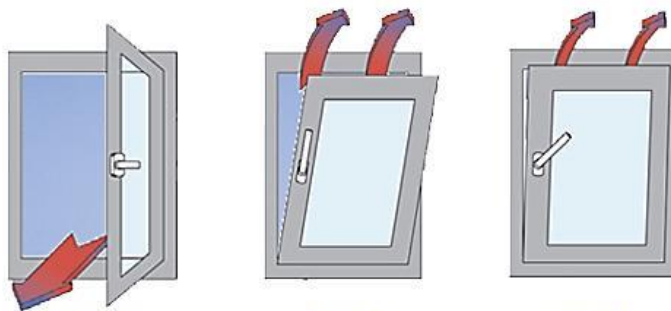
Typ prostoru	Výsledná teplota			Rychlost proudění v_a [m.s ⁻¹]	Relativní vlhkost rh [%]
	$t_{g \min}$ [°C]	$t_{g \text{ opt}}$ [°C]	$t_{g \max}$ [°C]		
Učebny, pracovny, místnosti určené k dlouhodobému pobytu	20	22 ± 2	28	0,1-0,2	30-65
Tělocvičny	18	20 ± 2	28	0,1-0,2	30-65
Šatny	20	22 ± 2	28	0,1-0,2	30-65
Sprchy	24	-	-	-	-
Záchody	18	-	-	0,1-0,2	30-65
Chodby	18	-	-	0,1-0,2	30-65

Pozn. K tabulce 20 - 6: 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 teplotu použít teplotu t_a naměřenou suchým teploměrem.

Přirozené větrání musí být v případě těsných oken zajištěno systémy mikro-ventilace nebo větracími štěrbinami. 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. Je stanoven požadavek na množství větraného vzduchu na žáka 20 - 30 m³/h v těchto prostorách.

Na následujících obrázcích jsou uvedeny příklady možností větrání ve školních prostorech podle Vyhlášky č. 343/2009 Sb. Ve své podstatě jde o možnost zvýšení infiltrace okny pro uživatele či provozovatele budovy.

16.5.1. Mikroventilace



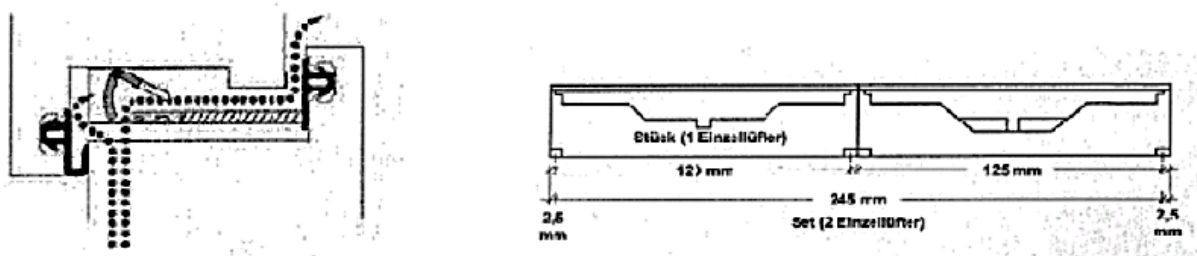
16.2 Obr. Možnosti poloh okna při větrání – otevřené okno, sklopené okno, mikroventilace (VOKNO s. r. o., 2014)

16.5.2. Větrací mřížky



16.3 Obr. č. 4: Větrací mřížky v okně (Myšák, 2014)

16.5.3. Větrací štěrby



16.4 Obr. č. 5: Větrací štěrby v okně (Myšák, 2014)

16.6. Evropská norma ČSN EN 15251

Norma ČSN EN 15251 Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky obsahuje návrhová kritéria pro systémy větrání ve 3 kategoriích:

Kategorie I – Vysoká úroveň očekávání, doporučeno pro prostory obývané velmi citlivými osobami (školky, nemocnice apod.);

Kategorie II – Normální úroveň očekávání. Použití pro nově budované objekty, obnovy a rekonstrukce starších objektů;

Kategorie III – Přijatelná a průměrná úroveň očekávání. Použití pro stávající objekty.

Norma dále uvádí příklady doporučených průtoků větracího vzduchu pro nebytové prostory pro standardní obsazenost a tři kategorie znečištění budovou.

16.7. Americká norma ASHRAE 62.1 - 2007. Ventilation for Acceptable Indoor Air quality

16-7 Tab. Současná návrhová kritéria pro systémy TZB ve školách podle ASHRAE: (Atlanta: ANSI, 2007)

Kategorie	Teplota [°C]		Relativní Vlhkost [%]	Poznámky
	Zima	Léto		
Třidy, laboratoře, knihovny, posluchárny, kanceláře	20 - 21	25 - 26	40 - 60	-
Tělocvičny	20 - 21	25 - 26	40 - 60	Pro tělocvičny s dřevěnou podlahou je doporučena RH = 35- 50%
Toalety	20 - 21	-	bez úpravy	Obvykle neklimatizováno
Skříňky, převlékárny	20 - 21	-	bez úpravy	Obvykle neklimatizováno
Chodby	20	26 - 27	bez úpravy	Občas neklimatizováno
Sklady	18 - 20	-	bez úpravy	Obvykle neklimatizováno
Místnosti technického zázemí	16 - 20	-	bez úpravy	Obvykle neklimatizováno

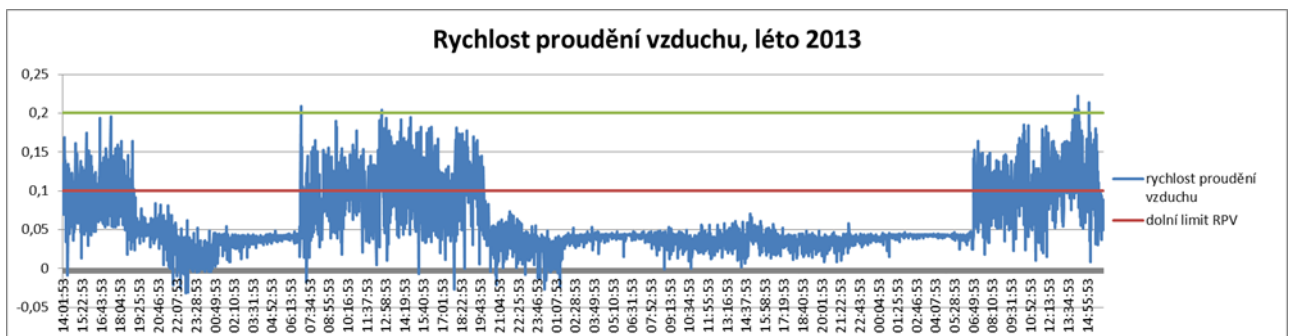
17. Příloha č. 2 - Grafy z terénních měření vnitřního prostředí učeben

17.1. Měření v učebně C215 s VZT

17.1.1. Měření se systémem VZT – letní podmínky



17.1 Obr. teplota kulového teploměru v C215 – letní podmínky (autor)

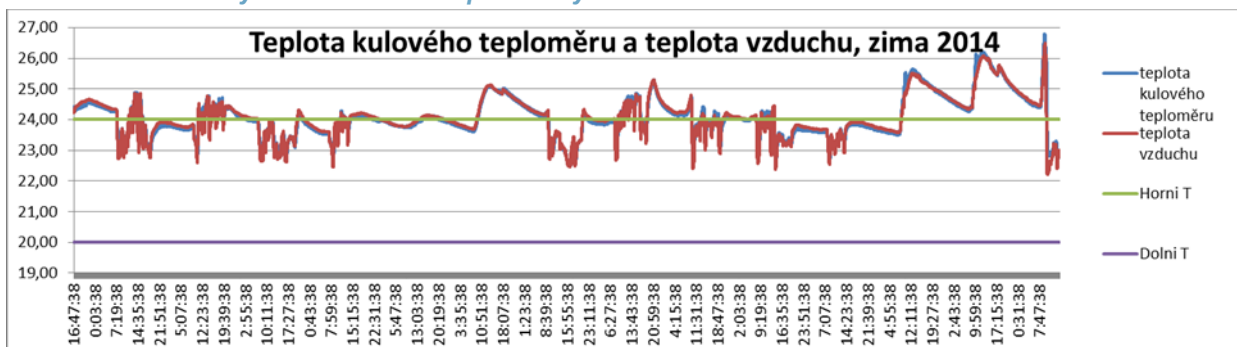


17.2 Obr. RPV v C215 – letní podmínky (autor)

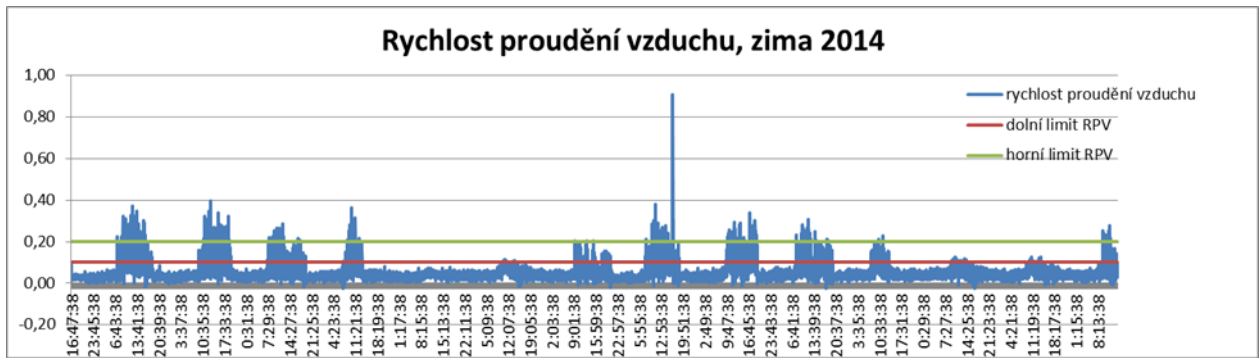


17.3 Obr. RH v C215 – letní podmínky (autor), (Kohoutková, 2013)

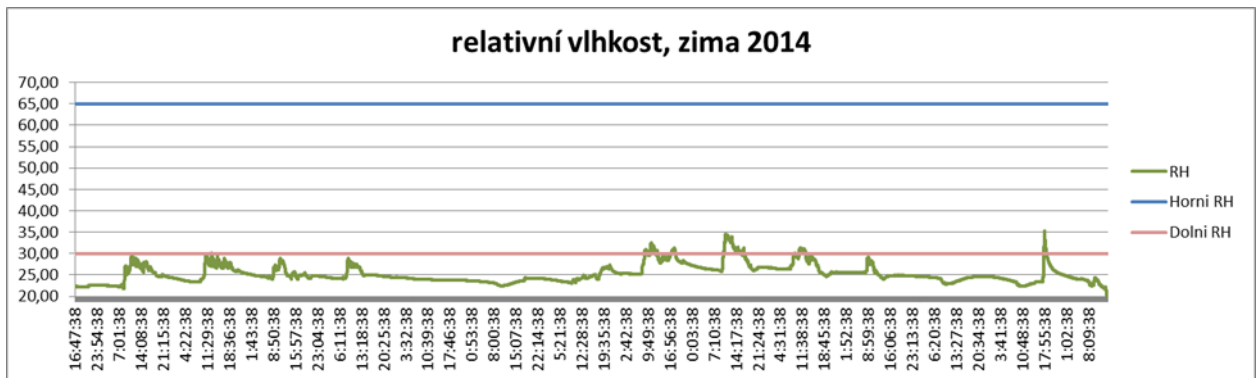
17.1.2. Měření se systémem VZT – zimní podmínky



17.4 Obr. teplota kulového teploměru v C215 – zimní podmínky (autor)



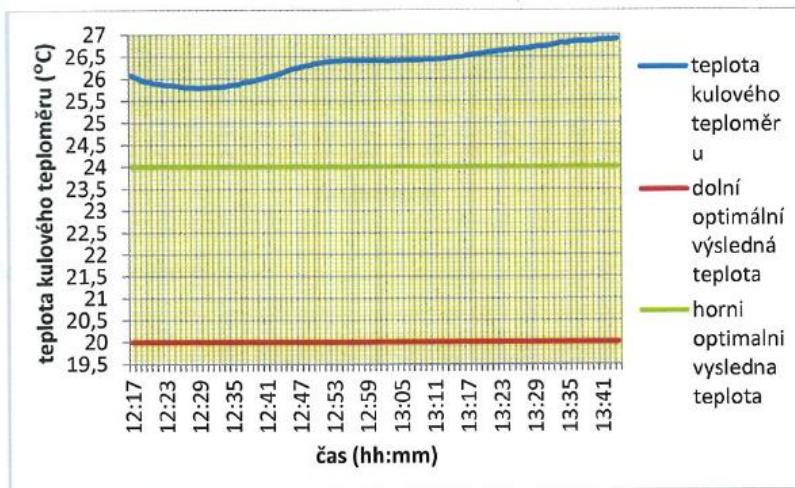
17.5 Obr. RPV v C215 – zimní podmínky (autor)



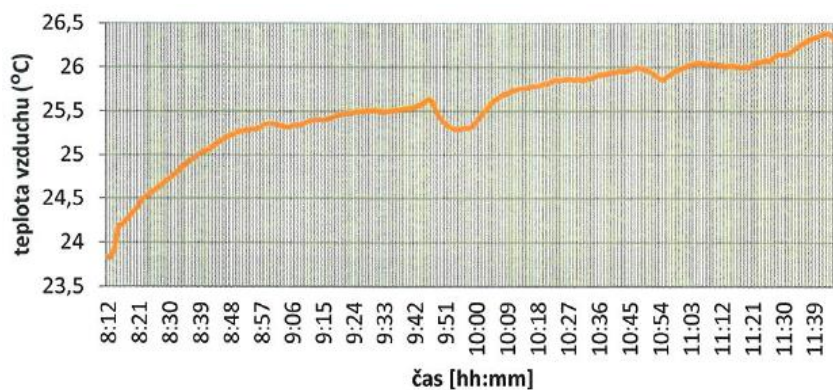
17.6 Obr. RH v C215 – zimní podmínky (autor)

17.2. Měření v učebně As135

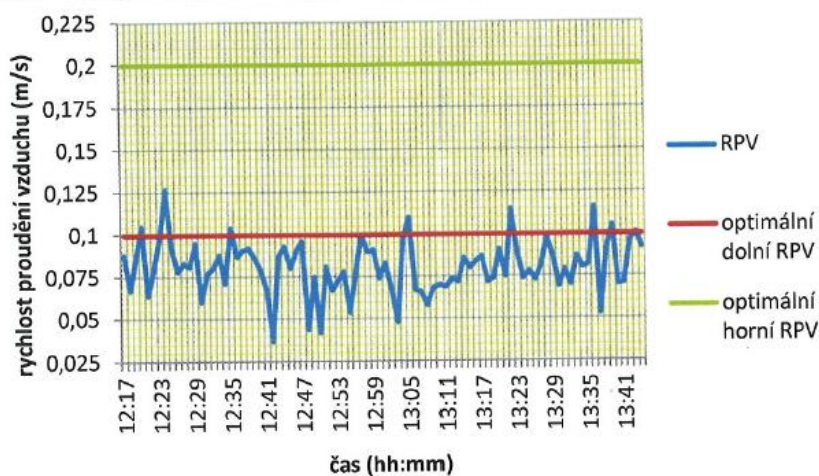
17.2.1. Letní podmínky As135



17.7 Obr. Letní měření teploty kulového teploměru – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor)

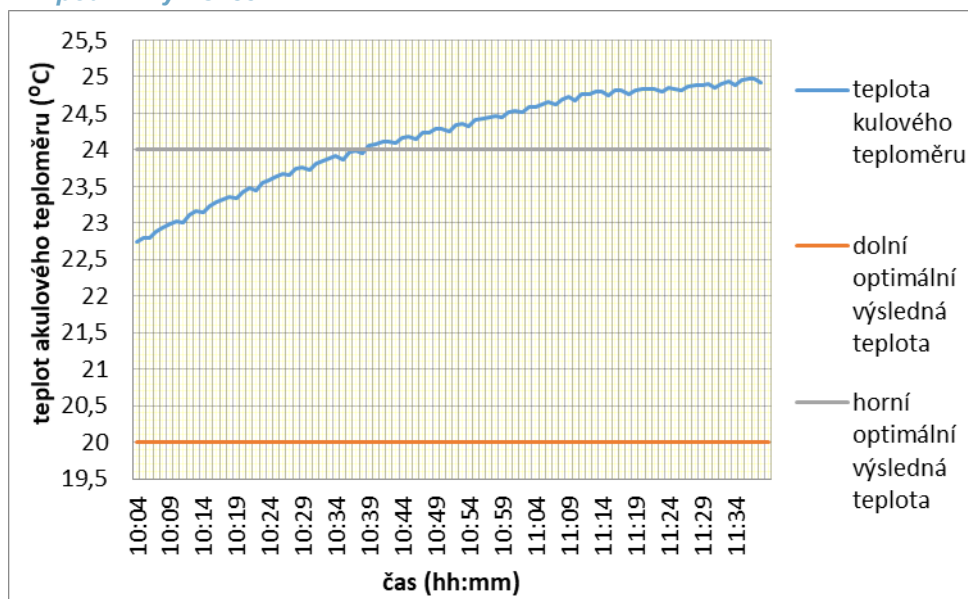


17.8 Obr. Letní měření teploty – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor)

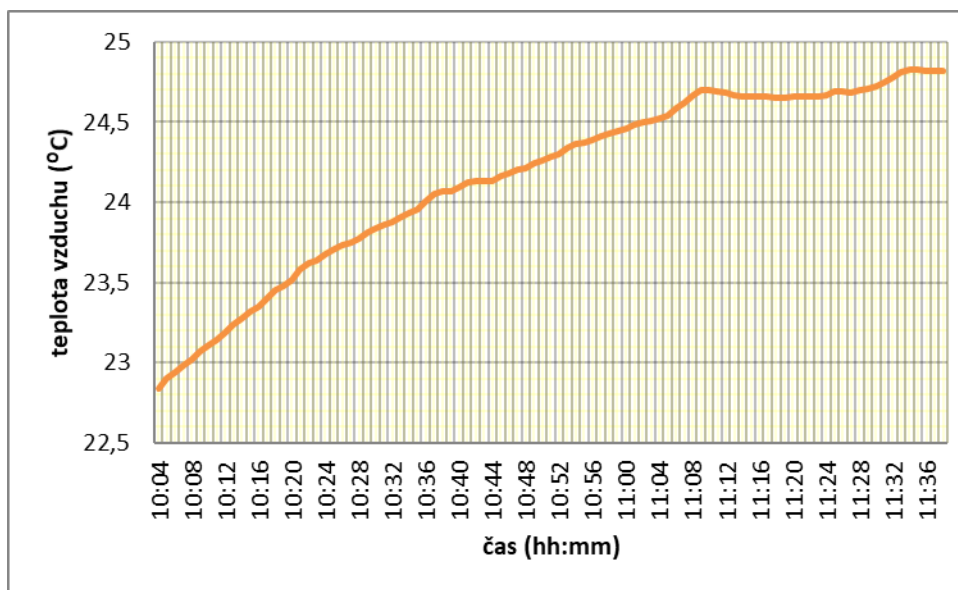


17.9 Obr. RPV v letním období - (As135) – přirozené větrání, zavřená okna a dveře, (autor)

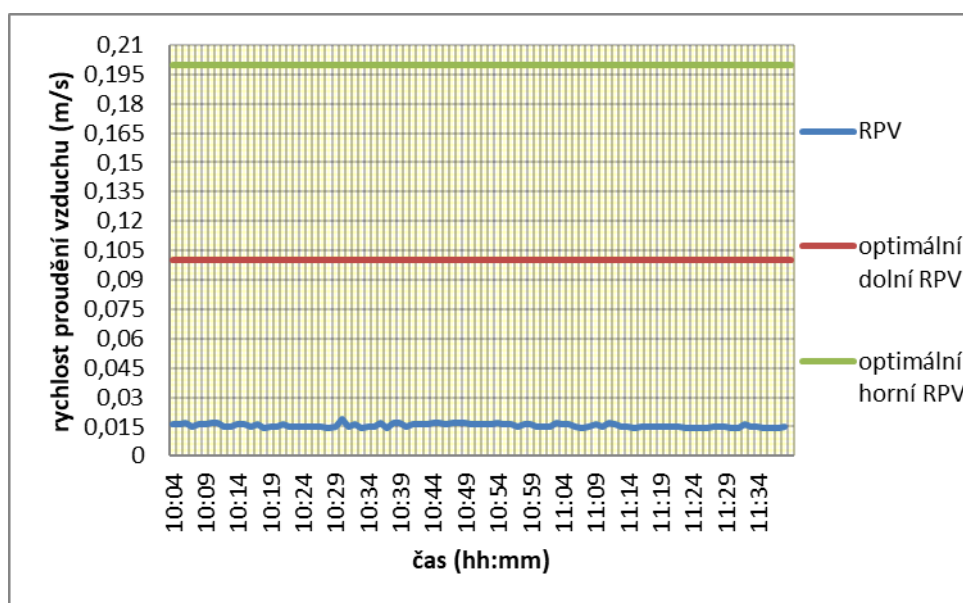
17.2.2. Zimní podmínky As135



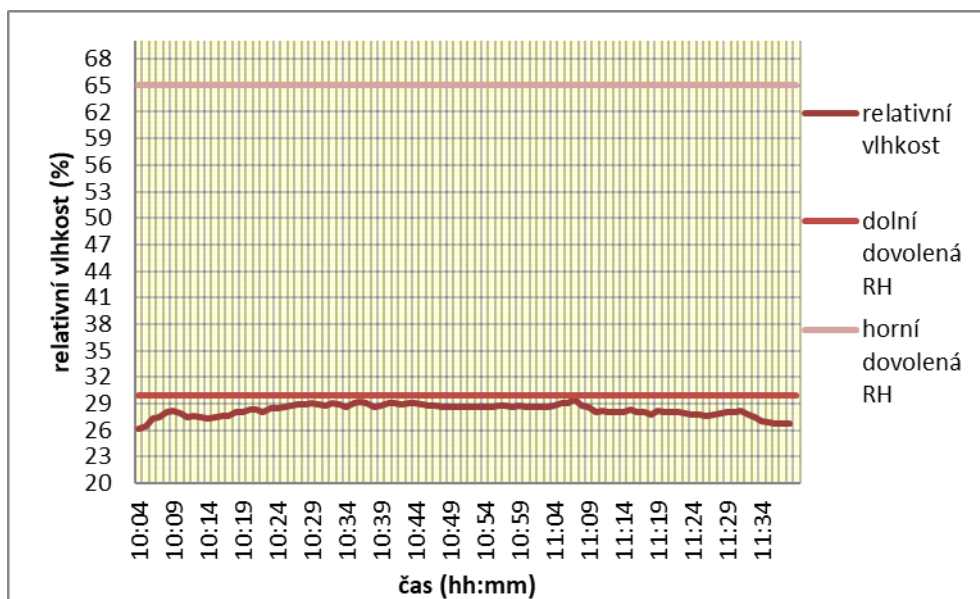
17.10 Obr. Zimní měření teploty kul. teploměru – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor)



17.11 Obr. Zimní měření teploty vzduchu – As135 – přirozené větrání, zavřená okna, (autor)

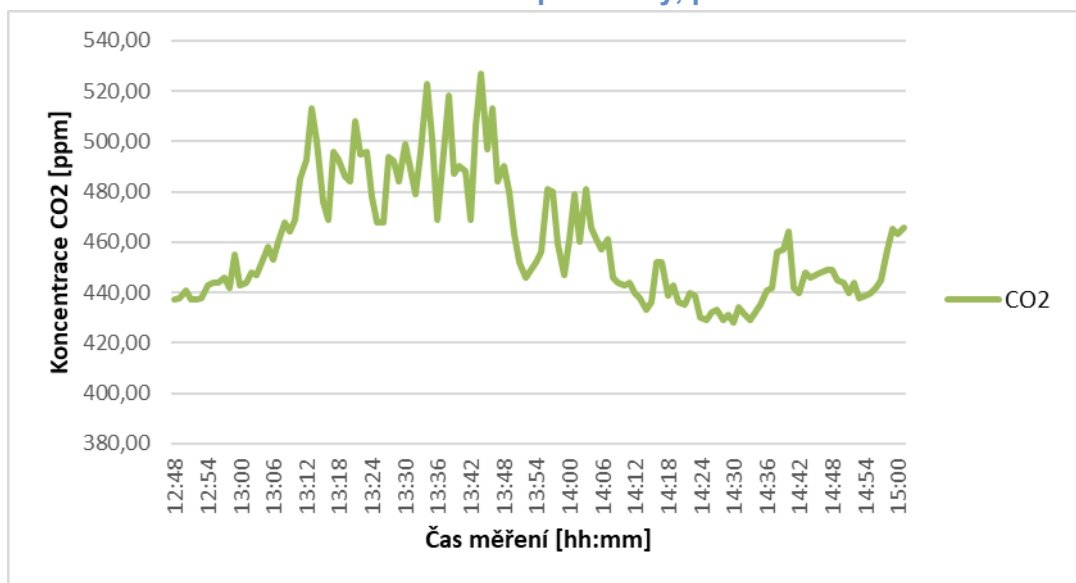


17.12 Obr. RPV v zimním období - (As135) – zavřená okna a dveře, (autor)

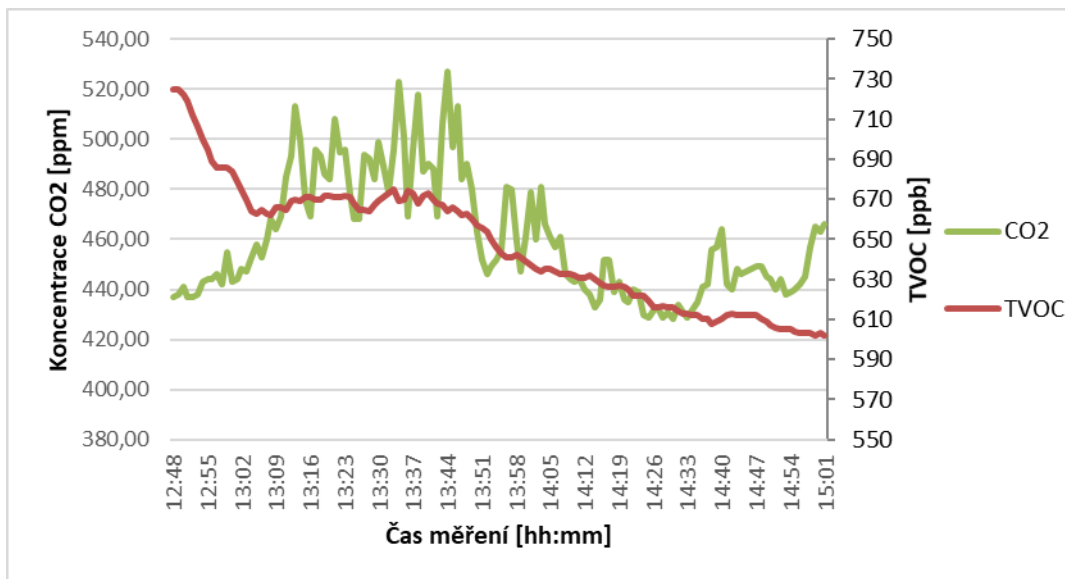


17.13 Obr. RH v zimním období - (As135) – zavřená okna a dveře, (autor)

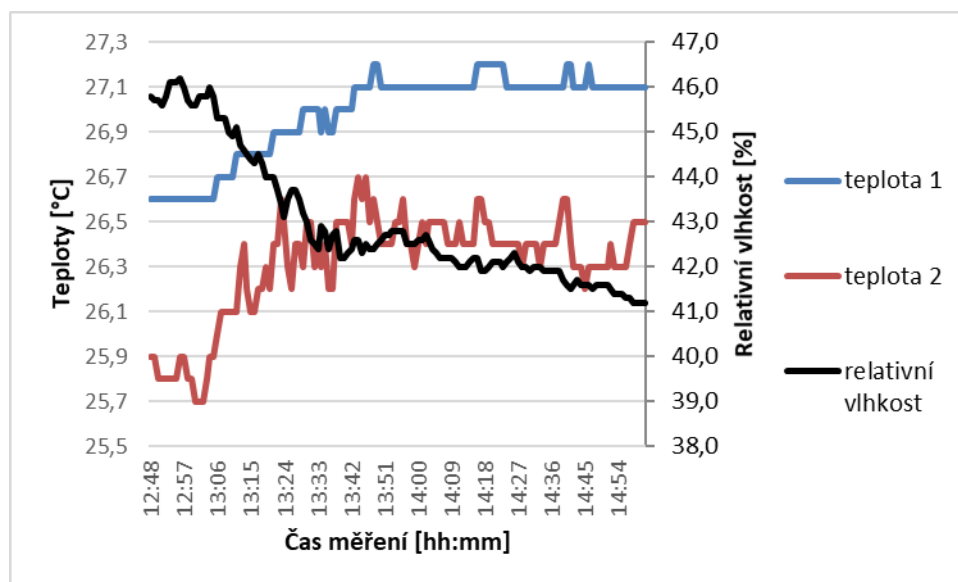
17.3. Měření v učebně A231 – letní podmínky, provětrávání



17.14 Koncentrace CO₂ při přítomnosti 20 osob v A231, provětrávání oknem a dveřmi (autor)



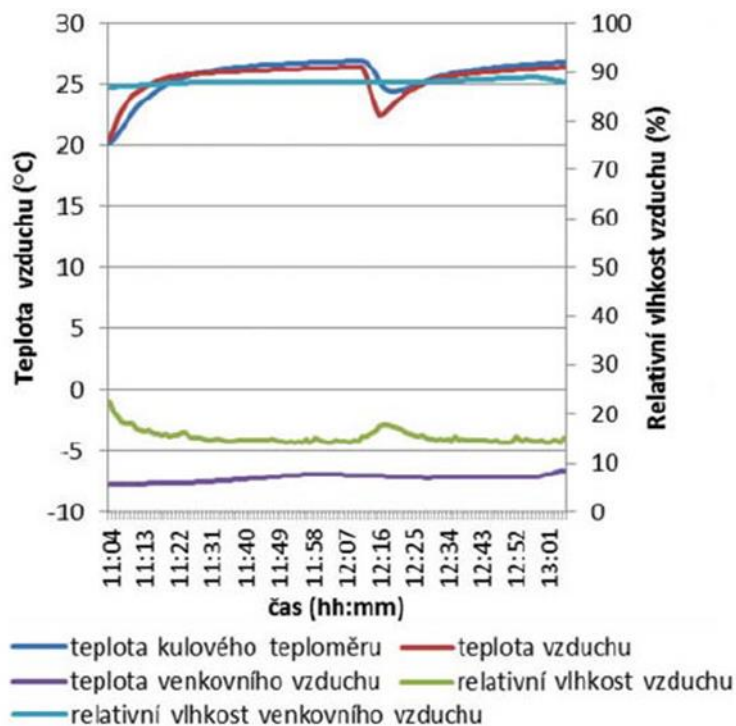
17.15 Koncentrace CO₂ a TVOC při přítomnosti 20 osob v A231, provětrávání oknem a dveřmi (autor)



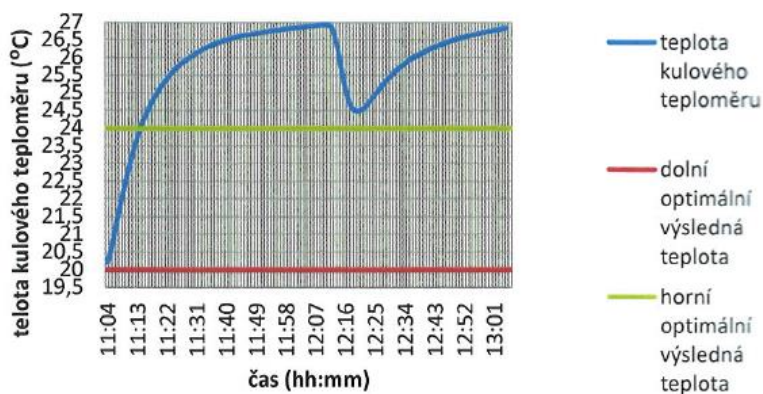
17.16 Teploty vzduchu a relativní vlhkost v A231, provětrávání oknem a dveřmi (autor)

17.4. Měření v učebně C215 bez vzduchotechniky

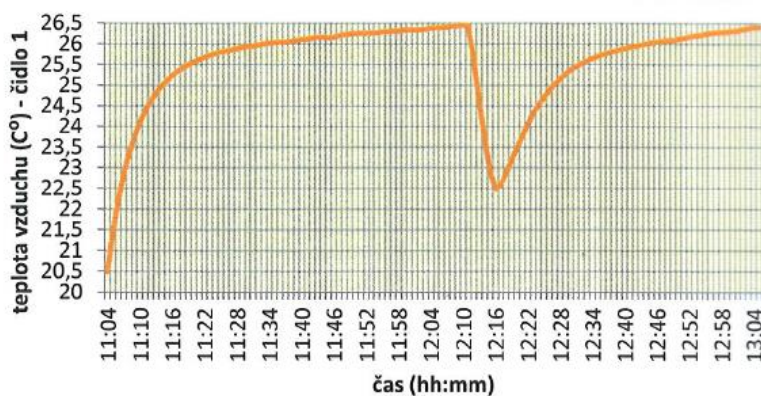
17.4.1. Zimní měření C215 bez VZT



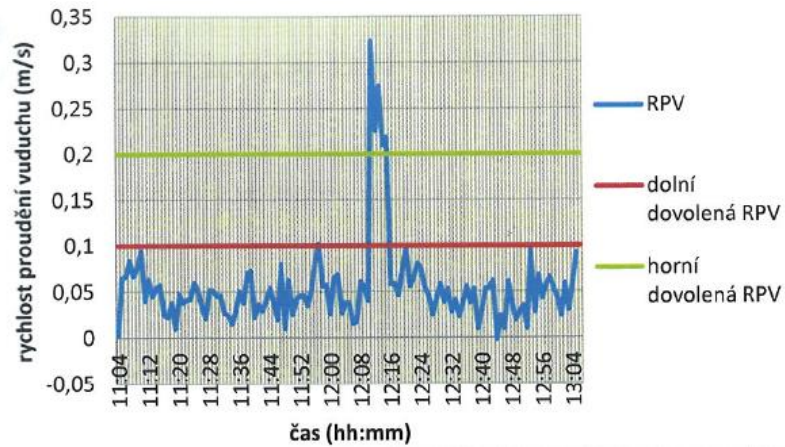
17.17 Obr. Naměřené teploty a vlhkosti v posluchárně vysoké školy C215 – zima - (Kohoutková A., 2013)



17.18 Obr. Teplota kulového teploměru v posluchárně vysoké školy C215 – zima – (autor)

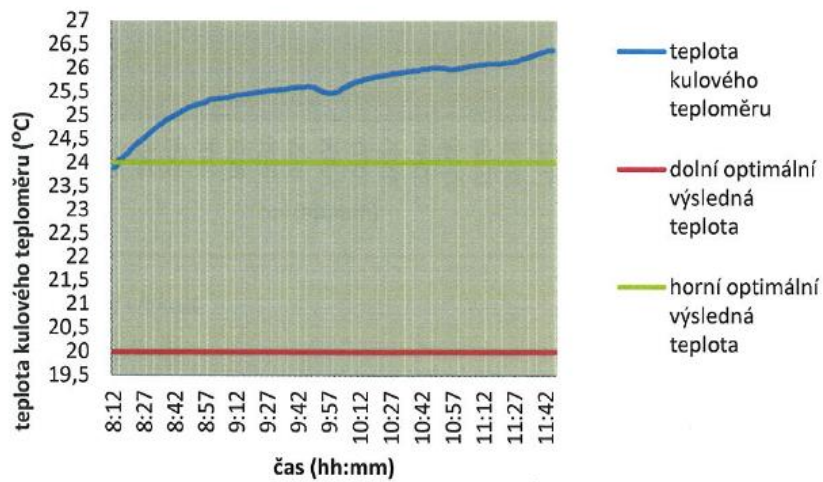


17.19 Teplota vzduchu v posluchárně vysoké školy C215 – zima - (autor)

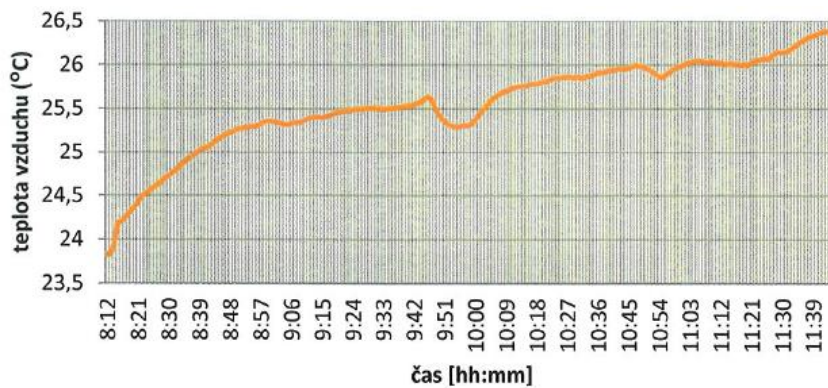


17.20 Obr. Naměřené RPV v posluchárně vysoké školy C215 – zima - (autor)

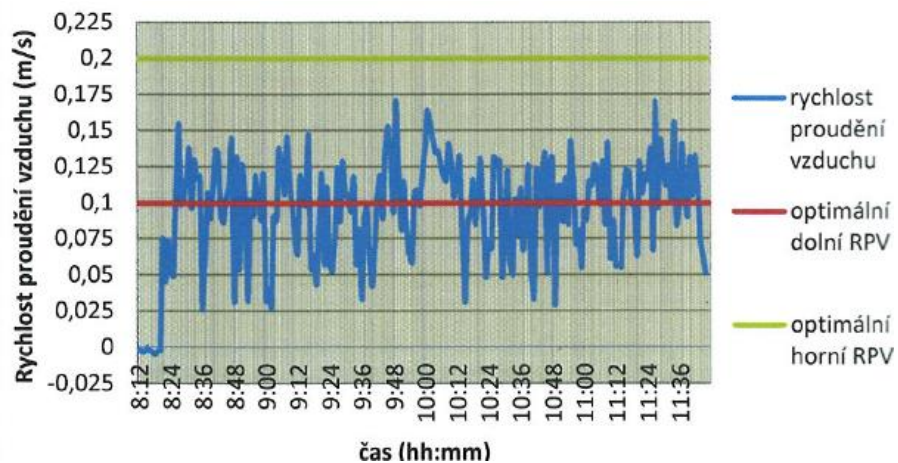
17.4.2. Letní měření C215 bez VZT



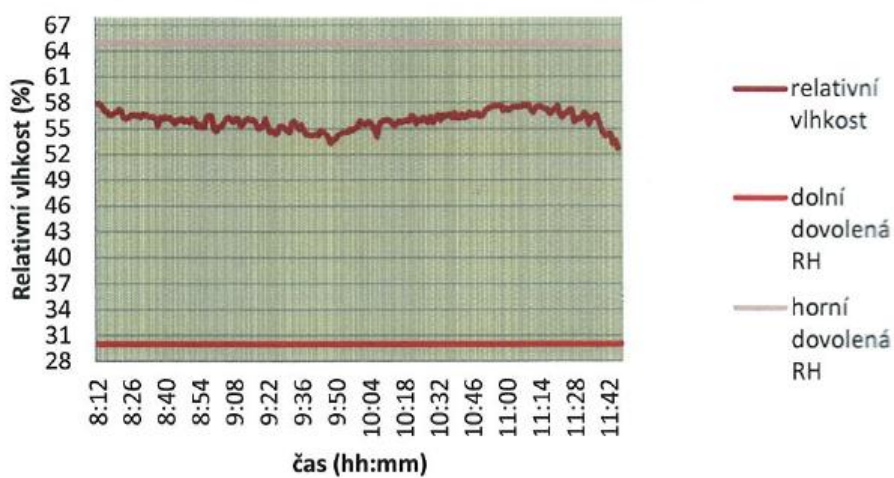
17.21 Obr. Teplota kulového teploměru v posluchárně vysoké školy C215 – léto – (autor)



17.22 Obr. teplota vzduchu v posluchárně vysoké školy C215 – léto - (autor)



17.23 Obr. Naměřené RPV v posluchárně vysoké školy C215 – léto - (autor)



17.24 Obr. Naměřené RH v posluchárně vysoké školy C215 – léto - (autor)

18. Příloha č. 3 - Rovnice popisující proudění

18.1. Rovnice kontinuity (continuity equation)

Rovnice kontinuity vyjadřující zákon zachování hmoty má tvar:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Rovnice 18.1 Rovnice kontinuity

kde ρ – je hustota, t – je čas, v – je rychlost proudění, ∇ - je divergence

18.2. Rovnice zachování hybnosti – Cauchyho rovnice (momentum equation)

Rovnice zachování hybnosti, neboli Cauchyho rovnice, má tvar:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g}$$

Rovnice 18.2 Rovnice zachování hybnosti

kde ρ – je hustota, t – je čas, v – rychlost proudění, ∇ - je divergence, p – je tlak, g – je tíhové zrychlení, $\bar{\tau}$ – je tenzor napětí

zdroj: (Malalasekera H. K., 2007)

18.3. Zákon zachování energie

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\rho k_{eff} \nabla T - h + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}))$$

Rovnice 18.3 Zákon zachování energie

Zdroj: (Malalasekera H. K., 2007)

18.4. Transportní rovnice modelu RNG $k - \epsilon$

Transportní rovnice modelu RNG $k - \epsilon$, kde se turbuletní viskozita počítá stejně jako u standardního modelu $k - \epsilon$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \\ \text{re } C_{2\epsilon}^* &= C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \\ \eta &= S k / \epsilon \text{ and } S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} \end{aligned}$$

Rovnice 18.4 Transportní rovnice modelu RNG $k - \epsilon$

Zdroj: (CFD online, 2010)

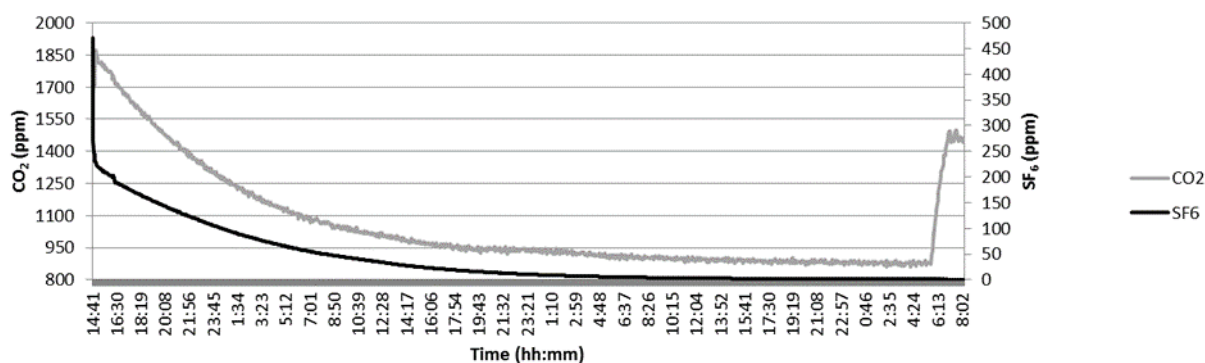
$$\begin{aligned}C_{\mu} &= 0.0845 (0.09) \\ \sigma_k &= 0.7194 (1.0) \\ \sigma_{\epsilon} &= 0.7194 (1.30) \\ C_{\epsilon 1} &= 1.42 (1.44) \\ C_{\epsilon 2} &= 1.68 (1.92) \\ \eta_0 &= 4.38 \\ \beta &= 0.012 \text{ (derived from experiment)}\end{aligned}$$

Rovnice 18.5 Konstanty pro model RNG $k - \epsilon$ odvozené statistickou metodou, v závorkách jsou uvedeny hodnoty, které se používají pro standardní model $k - \epsilon$

Zdroj: (CFD online, 2010)

19. Příloha č. 4 - Analýza stopovacího plynu pro účely laboratorních experimentů

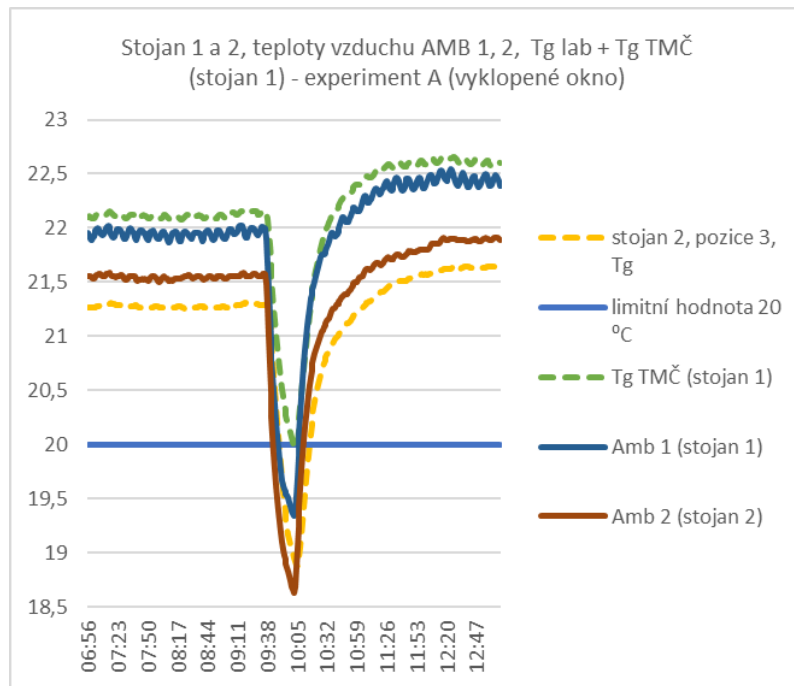
Při přípravě experimentu byla zvažena možnost použít stopovací plyn. Z důvodu nutné občasné přítomnosti osob při provádění experimentu (otevření okna apod.) by při použití CO_2 jako stopovacího plynu docházelo k nežádoucímu ovlivnění hodnot této koncentrace CO_2 . Jako další možná varianta byl vybrán fluorid sírový. Koncentrace škodlivin a jejich úbytek byly experimentálně měřeny ve školní budově po rekonstrukci pláště, do kterého byla také instalována nová okna. Koncentrace škodlivin byly měřeny bez přítomnosti uživatelů, kdy byl před experimentálním měřením do vnitřního ovzduší rozptýlen fluorid sírový (SF_6) a přítomnost oxidu uhličitého byla zajištěna předchozím pobytem osob v místnosti. Koncentrace byly měřeny zařízením Innova 1303, které funguje na principu foto akustické spektroskopie jako monitor plynů. Úbytky koncentrace fluoridu sírového byly porovnány spolu s úbytky koncentrace CO_2 během času tohoto experimentálního měření. Byl naměřen a pozorován jiný průběh poklesu koncentrací těchto 2 plynů, neboť tyto plyny mají jiné hustoty. Z důvodu případných nevypovídajících výsledků při použití SF_6 pro laboratorní experimenty bylo použití stopovacího plynu zavrženo. Jako ukazatelé byly vybrány a měřeny teploty a rychlosti proudění vzduchu jako objektivní fyzikální veličiny.



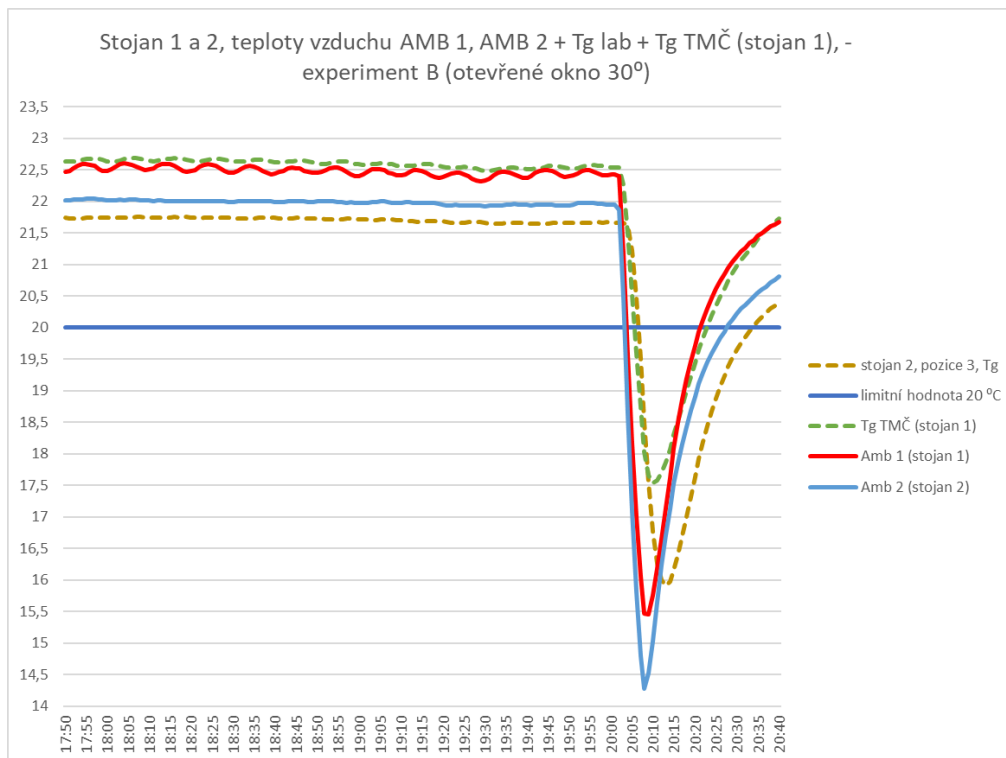
19.1 Obr. Experimentální měření koncentrací SF_6 a CO_2 v budově vysoké školy při zavřených oknech (Kohoutková, a další, 2015-7)

20. Příloha č. 5 - Průběhy teplot kulového teploměru a vzduchu během experimentů

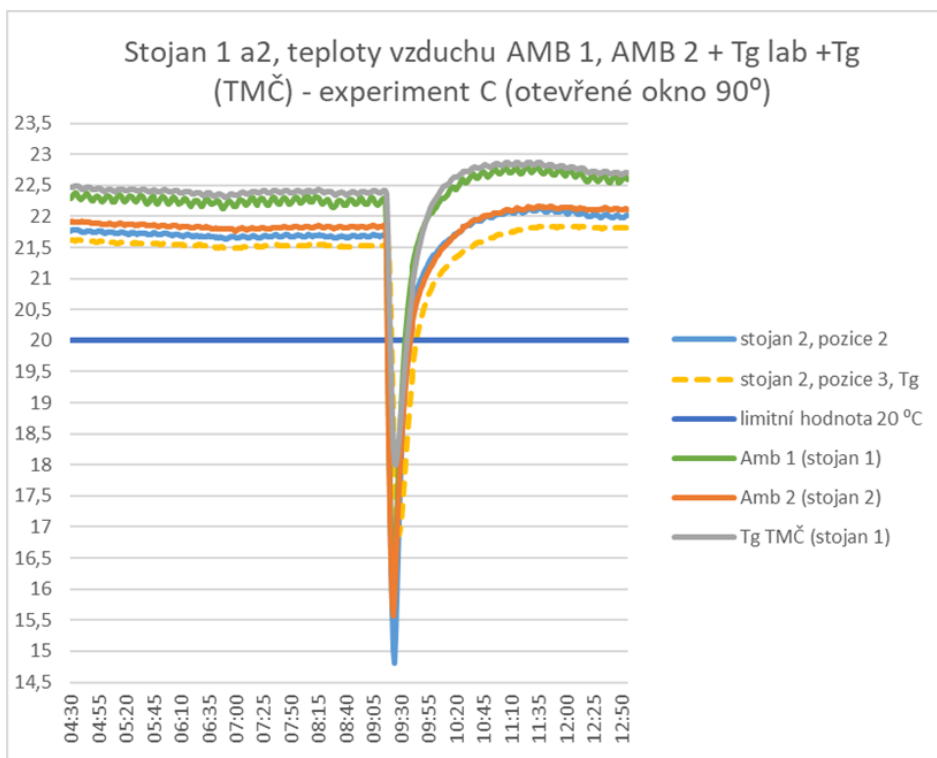
V této příloze uvádím grafy z experimentálního měření, konkrétně průběhy teplot kulového teploměru a vybraných teplot vzduchu (Amb) na stojanech 1 a 2.



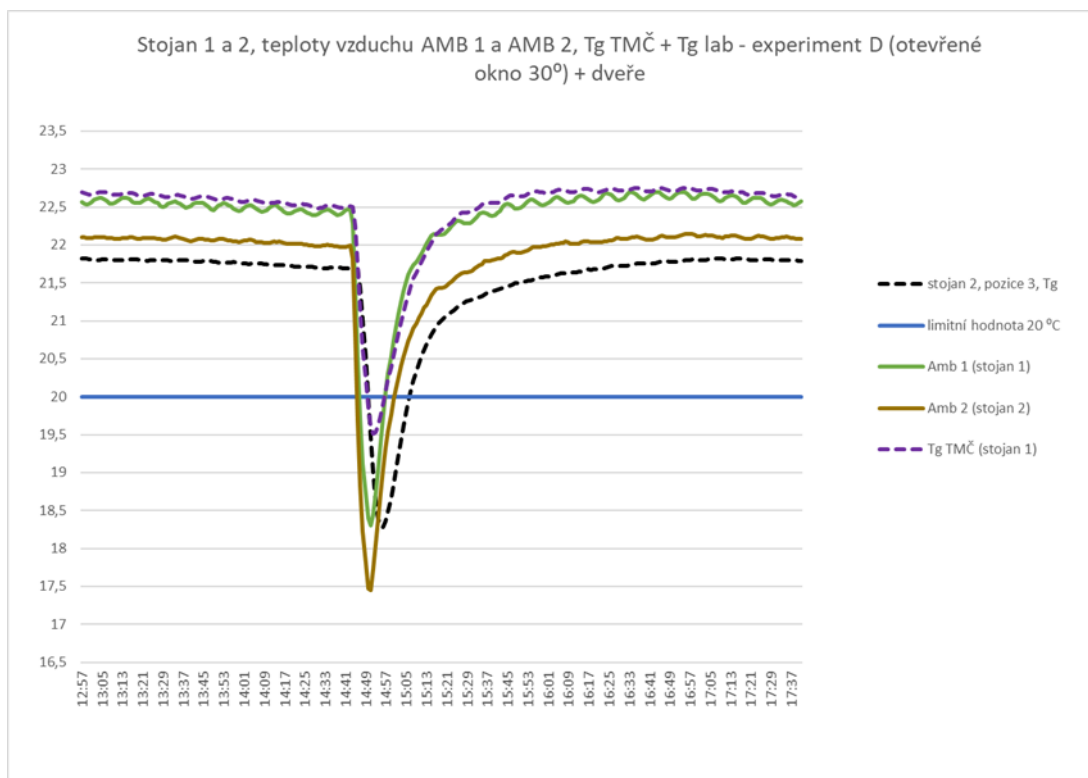
20.1 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment A (autor)



20.2 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment B (autor)



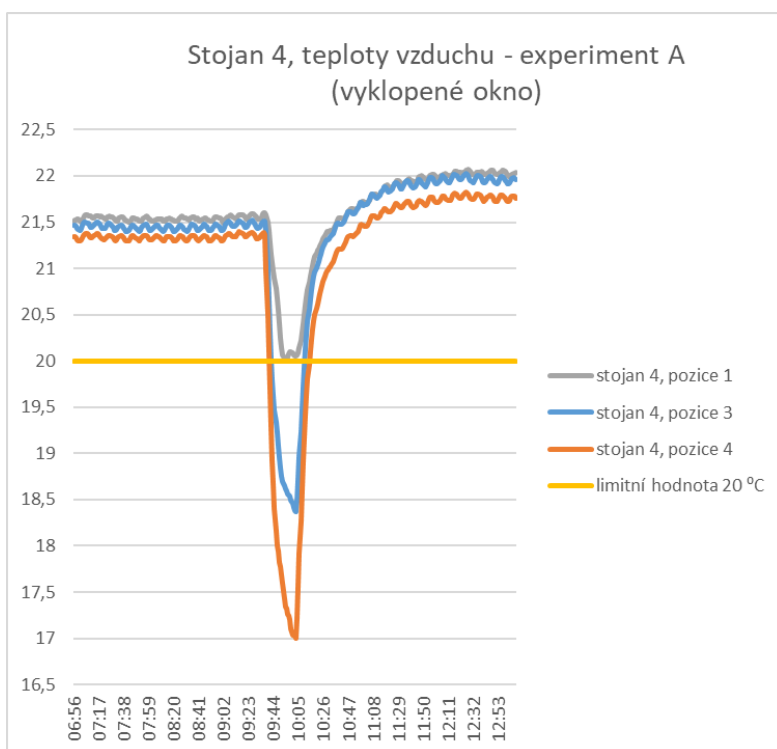
20.3 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment C (autor)



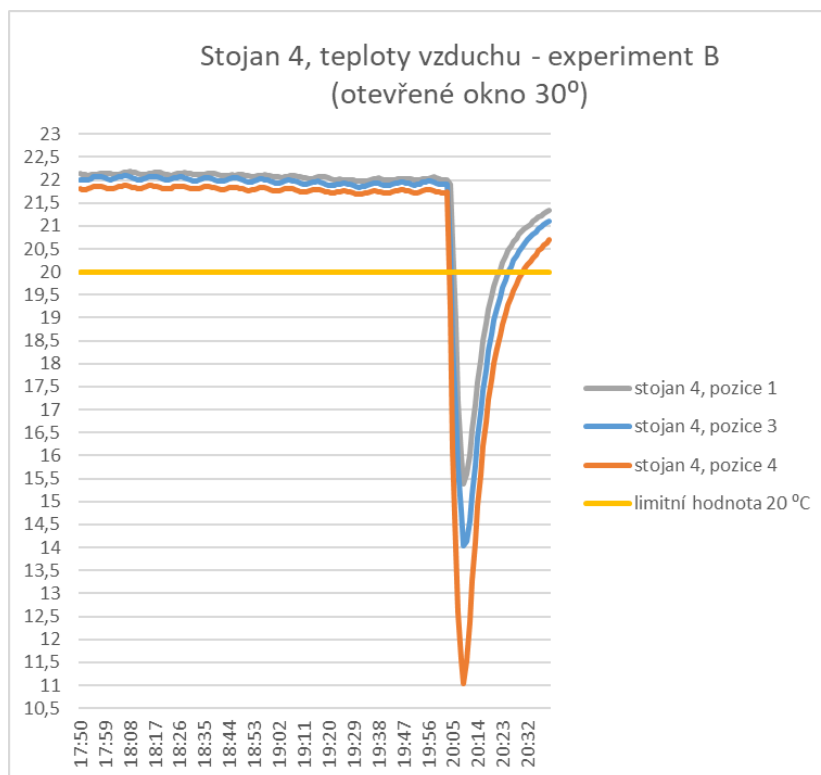
20.4 Obr. Průběhy vybraných teplot pro experiment D (autor)

21. Příloha č. 6 - Průběhy teplot vzduchu na stojanu 4 během experimentů

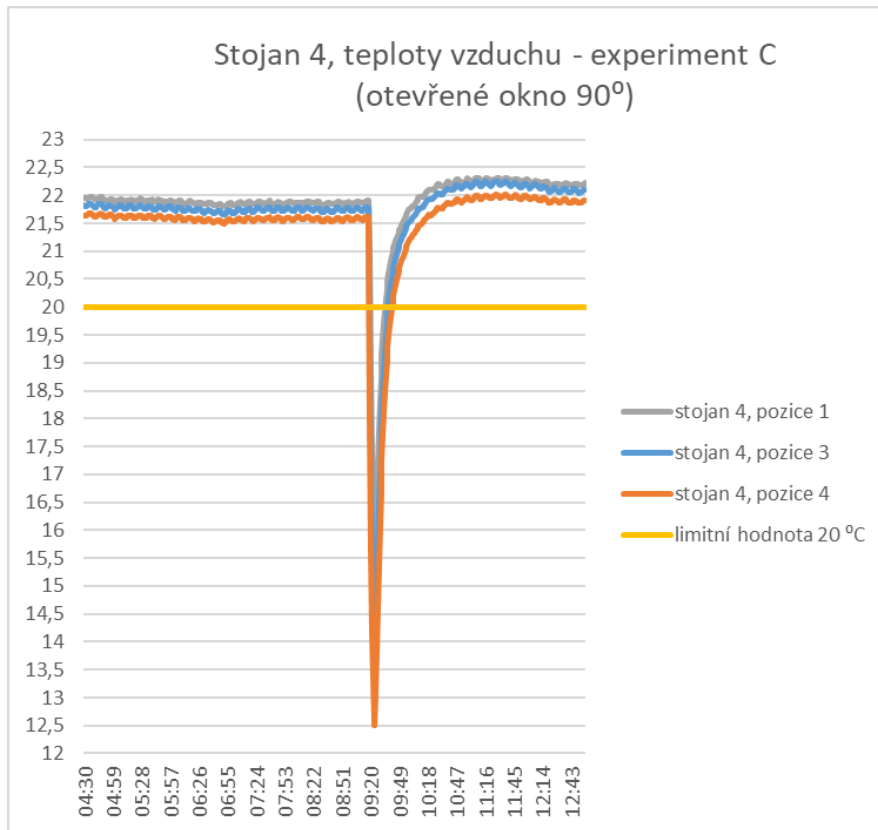
V této příloze uvádím grafy z experimentálních měření, konkrétně průběhy vybraných teplot vzduchu na stojanu 4, které byly použity pro výpočty ekvivalentní plochy průřezu.



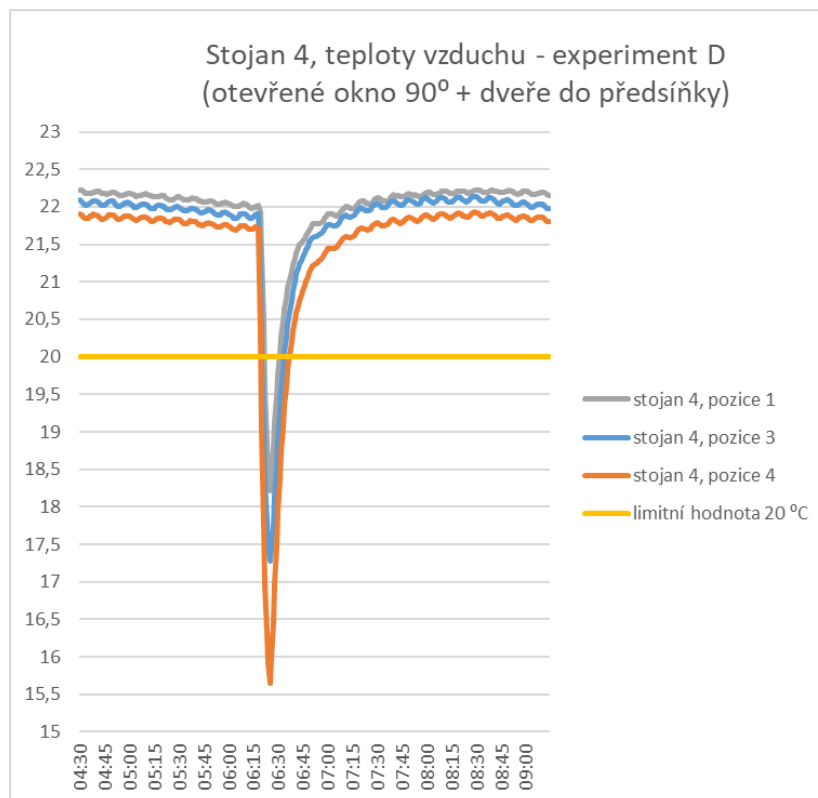
21.1 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment A (autor)



21.2 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment B (autor)



21.3 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment C (autor)



21.4 Obr. Průběhy vybraných teplot vzduchu pro experiment D (autor)

