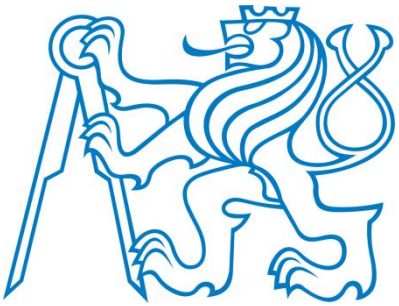
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



STUDIE PŘEMĚNY SKLADU V ČISTÉ PROSTŘEDÍ OPTICKÉ LABORATOŘE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. KATEŘINA ROŠKOTOVÁ

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.**

2017/2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Roškotová Jméno: Kateřina Osobní číslo: 410715

Zadávající katedra: technických zařízení budov

Studijní program: Inteligentní budovy

Studijní obor: Inteligentní budovy

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Studie přeměny skladu v čisté prostředí optické laboratoře

Název diplomové práce anglicky: Study of transformation of an utility room into a clean space of optical laboratory

Pokyny pro vypracování:
Zpracujte koncepci návrhu přeměny stávajícího skladového prostoru na optickou laboratoř s třídou čistého prostředí ISO 6. Proveďte průzkum současného stavu skladu a přilehlých prostor, zhodnoťte jej. Navrhněte úpravu technických zařízení, především vzduchotechniky pro zvýšení třídy čistoty, vytvoření vhodných podmínek vnitřního prostředí pro pracovníky a technologické vybavení. Popište správný provoz výsledného řešení. Zhodnoťte navržené řešení z pohledu přínosu pro čistý provoz laboratoře.

Seznam doporučené literatury:
ČSN EN ISO 14644-1 až 7, Čisté prostory a příslušné řízené prostředí.
Rubina, A. Vzduchotechnické systémy pro čisté prostory operačních sálů, STP, 2008.
ASHRAE HVAC Design manual for hospitals and clicnics, 2nd ed., Atlanta, 2013.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 21.2.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

21. 2. 2018
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

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

V Praze dne 20. května 2018 ……..

podpis

Poděkování

Ráda bych velmi poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Danielu Adamovskému, Ph.D. za odborné rady a věcné připomínky při zpracování této práce, a dále za trpělivost, vstřícný přístup a poskytnutý čas.

Dále bych chtěla poděkovat pracovníkům centra HiLASE za umožnění zpracování této práce a ochotu při poskytování potřebných informací při průzkumu stávajícího stavu.

Velké poděkování patří mé rodině za velikou podporu, trpělivost a povzbuzování po celou dobu mého studia.

Abstrakt:

Diplomová práce zpracovává koncepci přeměny čistého skladu laserového centra na optickou laboratoř s vyšší třídou čistoty. Návrh řešení by měl zajistit splnění požadovaných parametrů třídy čistoty ISO 6 dle ČSN EN ISO 14644-1 a současně zohlednit i specifické požadavky pro prostory optické laboratoře. Nedílnou součástí návrhu je i zajištění vhodných tepelně-vlhkostních podmínek pro pobyt osob. Navržené varianty řešení by měly sloužit jako představení možností řešení zadaného problému a jako podklad pro rozhodnutí laserového centra.

Podstatnou částí studie je analýza stávajícího stavu prostor, jejíž součástí bylo i provedení průzkumu pomocí měření koncentrace částic ve vznosu, tepelného komfortu a tzv. subjektivního hodnocení tepelného komfortu pomocí dotazníků. Zhodnocení stávajícího stavu umožnilo definování vstupních podmínek pro návrh variant možného řešení.

Navržené varianty mají odlišný vliv na provoz celého čistého prostoru a tento fakt může být proto stěžejní při rozhodování o nejvhodnější variantě. Pro novou optickou laboratoř byl vytvořen seznam doporučení pro provoz a údržbu čistého prostoru. Studie poukázala na problematiku návrhu takového prostoru, kde dochází ke střetu požadavků na vnitřní prostředí stanovených uživateli a instalovanými technologiemi.

Klíčová slova: čisté prostory, třída čistoty, koncentrace částic, kontaminace, vnitřní prostředí, tepelný komfort, laboratoř

Abstract:

This diploma thesis focuses on a conceptual design of transformation of a clean utility room in laser centre into an optical laboratory with a higher class of air cleanliness. The proposal should ensure that the required parameters for the class of air cleanliness ISO 6 have been met in accordance with ČSN EN ISO 14644-1, while taking into account the specific requirements for an optical laboratory. No less important part of the design is the achievement of suitable thermal and humidity environment for users of the laboratory. Suggested options of design should show various concepts of solutions of transformation and could be used for a laser centre to make a final decision.

An essential part of this study is the analysis of a current state of the space, including the research done by an airborne particle concentration measurement according to ČSN EN ISO 14644-1, measuring of thermal comfort and a subjective post-occupancy evaluation questionnaire. The assessment of the current state allowed the definition of input conditions for the design of possible solutions.

Proposed options have a different impact on the operation of cleanrooms, so this fact could be the most significant in terms of the final decision about the most suitable option. For the new optical laboratory, a list of recommendations for operation and maintenance of a cleanroom has been created. The study highlighted the issue of designing such a space, where there is a confrontation of the requirements for the internal environment from users and installed technologies.

Keywords: clean rooms, cleanliness class, particle concentration, contamination, indoor environment, thermal comfort, laboratory

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek ..... - 8 -

Úvod ..... - 10 -

Cíl práce ..... - 10 -

1 Metodika návrhu čistých prostor ..... - 11 -

1.1 Historie čistých prostor ..... - 11 -

1.2 Dostupné podklady pro návrh čistých prostor ..... - 11 -

1.3 Aplikace čistých prostor ..... - 14 -

1.4 Zdroje nečistot ..... - 15 -

1.5 Hlavní parametry návrhu čistého prostoru ..... - 15 -

1.6 Provoz a údržba čistého prostoru ..... - 24 -

2 Analýza stávajícího stavu objekt ..... - 26 -

2.1 Cíl analýzy ..... - 26 -

2.2 Popis analyzovaných prostor ..... - 26 -

2.3 Popis čistého provozu ..... - 28 -

2.4 Požadavky na stavebně-konstrukční řešení ..... - 28 -

2.5 Řešení čistého prostoru ..... - 29 -

2.6 Monitorování, údržba a plánované rekonstrukce ..... - 39 -

2.7 Průzkum ..... - 42 -

2.8 Vyhodnocení stávajícího stavu ..... - 82 -

3 Koncepce návrhu přeměny ..... - 83 -

3.1 Cíl koncepce ..... - 83 -

3.2 Definování podmínek návrhu ..... - 83 -

3.3 Možné varianty řešení ..... - 88 -

3.4 Diskuze a zhodnocení ..... - 106 -

3.5 Doporučení pro provoz, údržbu a úklid ..... - 108 -

Závěr ..... - 109 -

Použitá literatura ..... - 110 -

Seznam obrázků ..... - 117 -

Seznam grafů ..... - 119 -

Seznam příloh ..... - 119 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

IAQ	[-]	Indoor Air Quality = kvalita vnitřního vzduchu
CFD	[-]	Computational Fluid Dynamics = výpočetní metoda modelování proudění kapalin a plynů
PMV	[-]	předpověď středního tepelného pocitu
PPD	[%]	předpokládané procento nespokojených
SBS	[-]	Sick Building Syndrome = syndrom nemocných budov
a	[-]	poměrné obložení stropu
A	[-]	koeficient závislý na rychlosti proudění vzduchu
A_L	[m^2]	plocha netěsností
c	[J/(kg.K)]	měrná tepelná kapacita vzduchu
C	[-]	konstanta pro výpočet chladícího výkonu
$C_{n,m}$	[n/m^3]	limitní koncentrace částic pro uvedenou velikost částic a třídu čistoty
f_{cl}	[-]	poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu nahého člověka
h_c	[W/m^2K]	součinitel přestupu tepla konvekcí
H	[m]	světlá výška místnosti
K_p	[-]	součinitel prostoru
K_{tz}	[-]	součinitel tepelné zátěže
K_v	[-]	výškový součinitel
K_k	[-]	součinitel konvekce
K_{os}	[-]	součinitel obložení stropu
M	[W/m^2]	energetický výdej
n	[-]	konstanta pro výpočet chladícího výkonu
p_a	[Pa]	parciální tlak vodní páry
Δp	[Pa]	tlakový rozdíl mezi místnostmi
q_n	[W/m^2]	normalizovaný chladící výkon
ρ	[kg/m^3]	hustota vzduchu
Δt	[°C]	rozdíl teploty vzduchu a střední teploty chladící vody
t	[s]	čas
t_a	[°C]	teplota vzduchu

t_{cl}	[°C]	teplota povrchu oděvu
t_g	[°C]	výsledná teplota kulového teploměru
t_i	[°C]	vnitřní teplota v místnosti
t_o	[°C]	operativní teplota
t_p	[°C]	teplota přiváděného vzduchu
t_r	[°C]	střední radiační teplota
t_{w1}	[°C]	teplota přívodní chladící vody
t_{w2}	[°C]	teplota zpáteční chladící vody
v_a	[m/s]	rychlost proudění vzduchu
V	[m^3/h]	objemový průtok vzduchu
V_s	[l]	minimální objem měřeného vzorku vzduchu
V_{s1}	[l]	navržený objem měřeného vzorku vzduchu
W	[W/m^2]	užitečný mechanický výkon (většinou rovný nule)

Úvod

Čisté prostory jsou specifickým prostředím, které vyžaduje velmi komplexní a pečlivý přístup k návrhu již od počátku projektu, a zdaleka nezahrnuje pouze speciální řešení v oblasti vzduchotechniky, ale i požadavky na regulaci systémů či na stavebně-konstrukční část projektu. Jsou to prostory, ve kterých je udržována koncentrace částic na určitém limitu, a které jsou navrženy takovým způsobem, aby se minimalizovala jejich kontaminace z vnějšího prostředí, uvolňování částic a jejich usazování v prostoru. Kromě sledované čistoty jsou v prostorech řízeny i další parametry jako je např. teplota, tlak nebo relativní vlhkost. Při návrhu takového prostředí se často setkáváme s různými požadavky zejména na teplotu a vlhkost plynoucí z instalovaných zařízení, ale zároveň zde musí být zajištěny i vhodné podmínky pro pobyt osob.

Úspěšné dosažení požadované čistoty ale vyžaduje i dodržování doporučení pro pobyt uživatelů čistého prostoru, protože člověk je často největším zdrojem kontaminace a jeho chování může značně ovlivnit čistotu prostoru. V dnešní době se s čistými prostory setkáváme ve zdravotnictví např. na operačních sálech, v průmyslu, výrobě elektroniky nebo v laboratořích a všude tam, kde by vysoká koncentrace částic mohla ohrozit provoz, výrobu nebo i zdraví člověka.

Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout studii možného řešení přeměny skladu v čisté prostředí optické laboratoře třídy čistoty ISO 6 dle ČSN EN ISO 14644-1. Kromě požadovaného čistého prostředí by navržené řešení mělo zajistit i vhodné tepelně-vlhkostní podmínky pro umístění požadovaných technologií i pro pobyt osob. Pro definování vstupních podmínek návrhu bylo nutné provést průzkum současného stavu skladu a přilehlých prostor a analyzovat získané výsledky. Navržené varianty by měly ukázat možnosti dosažení přeměny a měly by sloužit jako podklad pro rozhodnutí laserového centra. Pro novou optickou laboratoř bude vytvořen seznam doporučení pro provoz a údržbu čistého prostoru.

1 Metodika návrhu čistých prostor

1.1 Historie čistých prostor

Na konci 19. století bylo zjištěno, že mikroorganismy jsou zodpovědné za infekce ran. Jedním z takových míst, kde byl tento problém význačný, byly nemocnice, a tak se začaly budovat operační sály s cílem kontrolovat roznos infekce. Čisté prostory prošly velkým rozvojem během 2. sv. války, protože vojenské letectvo a navigační technologie vyžadovaly výrobu velmi malých částí a stávající prostředí prašných výrobních hal přestávalo být pro tyto účely vhodné. K největšímu rozvoji však došlo v USA v souvislosti s rozvojem vesmírného programu NASA, kde kromě výroby choulostivých součástek byla hlavní myšlenkou navržení čistého prostoru snaha o zabránění rozšíření pozemských mikroorganismů i na jiné planety. Velmi důležitým bodem vývoje čistých prostor bylo v roce 1961 navržení konceptu usměrněného (laminárního) proudění americkým vědcem Willisem Whitfieldem, které se stalo základem pro moderní pojetí čistých prostor. [1; 2]

1.2 Dostupné podklady pro návrh čistých prostor

Postupný rozvoj čistých prostor s sebou přinášel i vývoj podkladů pro jejich návrh. Prvním takovým dokumentem byl v roce 1961 „Technical Manual 00-25-203“ vydaný vojenským letectvem USA a obsahoval postupy pro návrh čistého prostoru i pro jeho provoz. Významnějším dokumentem, který ovlivnil snad všechny budoucí podklady, se stala až publikace „Cleanroom and Work Station Requirements, Controlled Environments“ vydaná v roce 1963 v USA. Její následnou revizí v roce 1966 byla přejmenována na US Federal Standard 209A a v dalších letech byl tento nový dokument několikrát změněn (verze B-D). Poslední změna byla uskutečněna v roce 1992 pod názvem Federal Standard 209E, který je však v současné době již neplatný, nicméně s uváděnou klasifikací se stále můžeme v praxi setkat. V roce 1999 byla publikována mezinárodní norma ISO 14644-1, která je v současnosti nejpoužívanější nejen v zemích EU, ale i po celém světě. [2] V České republice je tato norma zavedena pod názvem ČSN EN ISO 14644-1.

Právně závazným podkladem je v ČR Vyhláška č. 414/2017 Sb. o správné lékárenské praxi (nahradila Vyhlášku č. 84/2008 Sb.). Mezi používanými technickými předpisy v ČR pro konkrétní aplikace jsou Pokyny pro správnou výrobní praxi Státního úřadu pro kontrolu

léčiv VYR-32 – Doplněk 1, verze 1 – Výroba sterilních přípravků, VYR-36 – Čisté prostory a LEK-17 – Příprava sterilních léčivých přípravků v lékárně a zdravotnických zařízeních.

1.2.1 ČSN EN ISO 14644-1

Norma ČSN EN ISO 14644-1 stanovuje klasifikaci čistých prostor a společně s dalšími částmi (Část 2–8) stanovuje požadavky a postupy pro jejich návrh, validaci, provoz i údržbu čistého prostředí. Čisté prostory definuje jako prostory, ve kterých je řízena koncentrace částic a které jsou navrhovány takovým způsobem, aby byla minimalizováno jejich uvolňování, přenos nebo usazování. V těchto prostorách jsou navíc řízeny i další parametry prostředí jako je např. teplota, tlak nebo vlhkost. Čisté prostory jsou podle této normy rozděleny do tříd čistoty podle požadovaného maximálního limitu kumulativní koncentrace různých velikostí částic ve vznosu uvedené v Tabulce 1. Pro mezilehlá čísla třídy čistoty je nutné požadovaný limit koncentrace vypočítat podle postupu daném normou. [3]

Tabulka 1 – Klasifikace dle ČSN EN 14644-1 [3]

ISO Class number (*N*)	Maximum allowable concentrations (particles/m^3) for particles equal to and greater than the considered sizes, shown below[a]					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
1	*10*[b]	d	d	d	d	e
2	100	*24*[b]	*10*[b]	d	d	e
3	1 000	237	102	*35*[b]	d	e
4	10 000	2 370	1 020	352	*83*[b]	e
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	d, e, f
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
9[g]	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

Klasifikace dle ČSN EN ISO 14644-1 dělí prostory podle třídy čistoty, stavu obsazenosti a velikosti částic, která odpovídá výše uvedené tabulce. Stav obsazenosti je možné rozdělit na tři stádia:

- „as built“ – stav, kdy je čistý prostor dokončen a vybaven všemi technickými systémy, které jsou v provozu, ale bez přítomnosti osob nebo vybavení
- „at-rest“ – stav, kdy je v čistém prostoru instalováno vybavení a technologie jsou uvedeny do provozu, ale bez přítomnosti uživatelů

- „operational“ – stav, kdy je čistý prostor v předpokládaném provozu s vybavením a určitým počtem osob [3]

1.2.2 FS 209E

Klasifikace podle poslední verze FS 209E udává koncentraci částic ve vznosu i v metrických jednotkách (Tabulka 2), zatímco předchozí verze FS 209D nikoliv.

Tabulka 2 – Klasifikace čistých prostor dle FS 209E [2; 4]

		Class Limits									
Class Name		**≥ 0.1µm**		**≥ 0.2µm**		**≥ 0.3µm**		**≥ 0.5µm**		**≥ 5µm**	
		Volume Units		**Volume Units**		**Volume Units**		**Volume Units**		**Volume Units**	
SI	**English**	**(m^3)**	**(ft^3)**	**(m^3)**	**(ft^3)**	**(m^3)**	**(ft^3)**	**(m^3)**	**(ft^3)**	**(m^3)**	**(ft^3)**
M 1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10.0	0.283	--	--
M 1.5	1	1 240	35.0	265	7.50	106	3.00	35.3	1.00	--	--
M 2		3 500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83	--	--
M 2.5	10	12 400	350	2 650	75.0	1 060	30.0	353	10.0	--	--
M 3		35 000	991	7 570	214	3 090	87.5	1 000	28.3	--	--
M 3.5	100	--	--	26 500	750	10 600	300	3 530	100	--	--
M 4		--	--	75 700	2 140	30 900	875	10 000	283	--	--
M 4.5	1 000	--	--	--	--	--	--	35 300	1 000	247	7.00
M 5		--	--	--	--	--	--	100 000	2 830	618	17.5
M 5.5	10 000	--	--	--	--	--	--	353 000	10 000	2 470	70.0
M 6		--	--	--	--	--	--	1 000 000	28 300	6 180	175
M 6.5	100 000	--	--	--	--	--	--	3 350 000	100 000	24 700	700
M 7		--	--	--	--	--	--	10 000 000	283 000	61 800	1 750

Kromě zmíněných norem byly i v dalších zemích vytvořeny normy klasifikující čisté prostory. V Tabulce 3 je uvedeno srovnání klasifikace čistých prostor podle různých norem.

Tabulka 3 – Porovnání klasifikace třídy čistoty ve vybraných zemích **[5]**

Země	**USA**	**USA**	**Velká Británie**	**Austrálie**	**Francie**	**Německo**	**ČR**
Platná norma	**209 D**	**209 E**	**BS5295**	**AS1386**	**AFNOR X44101**	**VDI 2083**	**ČSN EN ISO 14644-1**
Platí od roku	1988	1992	1989	1989	1989	1990	1999
							1
					-	0	2
	1	M1.5	C	0,035	-	1	3
	10	M2.5	D	0,35	-	2	4
	100	M3.5	E nebo F	3,5	4 000	3	5
	1 000	M4.5	G nebo H	35	-	4	6
	10 000	M5.5	J	350	400 000	5	7
	100 000	M6.5	K	3 500	4 000 000	6	8

1.2.3 Vyhláška č. 414/2017 Sb.

Vyhláška rozděluje maximální přípustné koncentrace částic podle stavu „za klidu“ a „za provozu“, pro který jsou přípustné limity vyšší. Zajištění požadovaných podmínek pro stav „za provozu“ vychází z předpokladu, že návrh prostor musí být proveden takovým způsobem, aby bylo dosaženo určité úrovně čistoty ve stavu „za klidu“ [6]. Rozdělení provozních stavů zde odpovídá ČSN EN ISO 14644-1. Stav „za klidu“ vyjadřuje stav, kdy jsou v prostoru nainstalovány všechny technologie a zařízení a jsou v provozu bez přítomnosti uživatelů, zatímco při stavu „za provozu“ je prostor využíván navrženým počtem pracovníků. [3]

Tabulka 4 – Klasifikace pro jednotlivé třídy čistoty vzduchu podle počtu částic [7]

Třída čistoty	**Maximální přípustný počet částic/m3 o velikosti rovné nebo větší**			
	Za klidu		**Za provozu**	
	0,5 µm	**5,0 µm**	**0,5 µm**	**5,0 µm**
A	3520	20	3 520	20
B	3520	29	352 000	2 900
C	352 000	2 900	3 520 000	29 000
D	3 520 000	29 000	nedefinováno	nedefinováno

Podle této tabulky při stavu „za klidu“ třída A odpovídá třídě čistoty ISO 4,8 pro velikosti částic ≥5,0 µm, třída B odpovídá ISO 5, třída C odpovídá ISO 7 resp. ISO 8 a třída D odpovídá ISO 8. Vyhláška dále uvádí, že pro dosažení požadované čistoty je nutné přizpůsobit počet výměn vzduchu velikosti místnosti, počtu pracovníků a vybavení. Zároveň pro třídy A, B a C vyžaduje použití vzduchotechnického systému s HEPA filtry. [6]

1.3 Aplikace čistých prostor

V dnešní době mají čisté prostory rozsáhlé použití a setkáváme se s nimi v odvětvích, kde by kontaminace mohla ohrozit výrobu nebo vývoj produktu či zdraví člověka. Čisté prostředí je vyžadováno např. při výrobě léčivých přípravků, výrobě zdravotnických nástrojů a implantátů, ve zdravotnických zařízeních, potravinářství, průmyslu, výrobě mikroelektroniky anebo v nejrůznějších laboratořích a výzkumných centrech. [2; 5]

Příkladem aplikace různých tříd čistoty je např. nemocnice, kde se v prostorách tzv. superaseptických sálů určených např. pro ortopedické zákroky nebo transplantace udržuje

čistota třídy ISO 5, zatímco např. v aseptických sálech běžné chirurgie se udržuje třída čistoty ISO 7 a v zázemí operačních sálů je udržována čistota ISO 8. Vyšší třídy čistoty než ve zdravotnických zařízeních jsou udržovány např. při výrobě mikroelektronických součástek nebo při výrobě a balení léčiv. [5]

Čisté prostory můžeme také rozdělit na dvě skupiny podle toho, zda je kritickým parametrem počet neživých nebo živých částic. Do první skupiny, kde je stěžejní počet neživých částic, patří např. výroba elektroniky, optiky nebo dalších odvětví průmyslu. Eliminace výskytu živých částic neboli mikroorganismů je naopak stěžejní ve farmacii, zdravotnictví nebo potravinářství. [8]

1.4 Zdroje nečistot

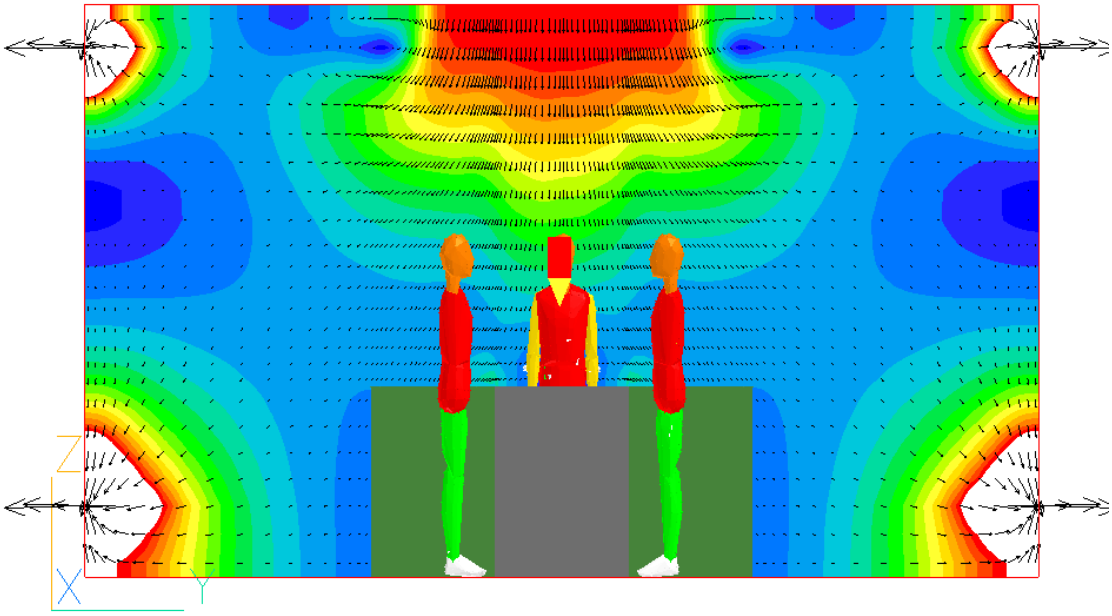
Zdrojem kontaminace čistého prostoru jsou zejména částice, které jsou uvolňovány z vybavení místnosti, zařízení nebo od uživatelů prostoru. Nejčastěji se jedná o částice uvolňované z obvodových konstrukcí, stropů nebo podlah, z lidského organismu nebo oděvu. Kromě vnitřních zdrojů nečistot může být kontaminace prostoru způsobena i zdroji z okolních přilehlých místností, proto je nutné udržovat v čistém prostoru požadovaný přetlak a pro vstup osob nebo materiálů používat personální, resp. materiálovou propusť. Částice přenášené vzduchotechnickou jednotkou z venkovního, resp. cirkulačního vzduchu jsou odstraňovány instalováním vysoce účinných filtrů. [1]

1.5 Hlavní parametry návrhu čistého prostoru

1.5.1 Koncepce návrhu

Návrh čistého prostoru vyžaduje komplexní řešení, a proto je vhodné kromě odborníků přizvat k prvotní studii i budoucí uživatele, aby se mohli vyjádřit k navrženému řešení. Příkladem může být např. přizvání lékařů při projektu operačních sálů, kteří na základě svých zkušeností sdělí své poznatky a připomínky k dispozici prostoru, umístění přívodních a odvodních prvků, ale i požadovanému tepelně-vlhkostnímu prostředí. Pro návrh je nezbytné přesně definovat požadované parametry a zohlednit i případnou potřebu přeměny prostoru v budoucnosti. Během návrhu vzduchotechnického řešení, ale i dispozice prostoru

je vhodné využít počítačové modelování CFD, které umožní simulaci proudění vzduchu a tím umožnit optimalizaci navrženého řešení (Obrázek 1).

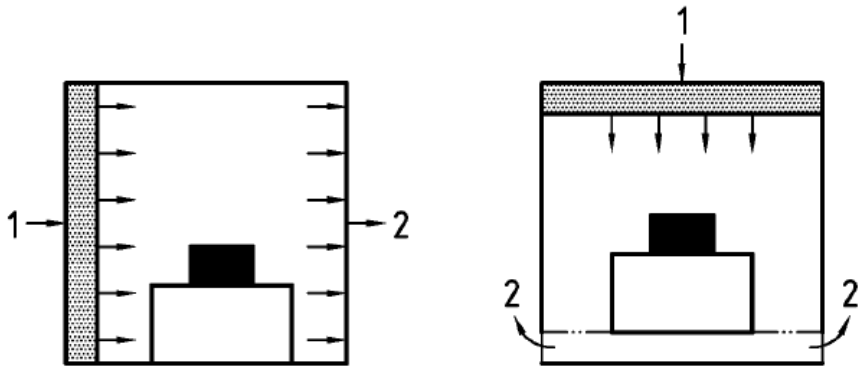


Obrázek 1 - CFD modelování proudění vzduchu na operačním sále (Vlastní tvorba)

1.5.2 Proudění vzduchu v čistém prostoru

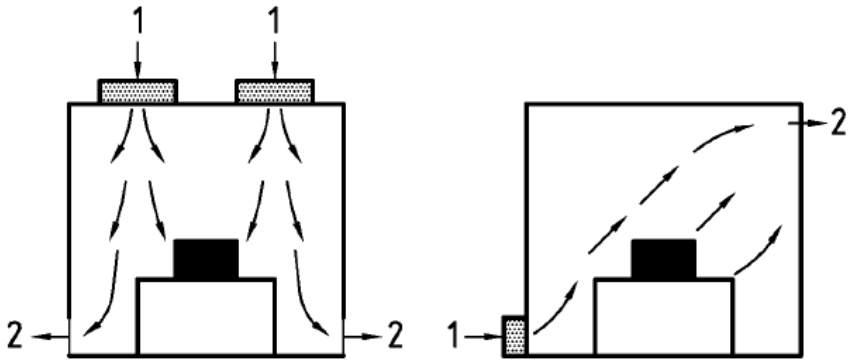
V čistém prostoru se setkáváme s prouděním usměrněným (jednosměrným, laminárním), neusměrněným (turbulentním), resp. s jejich kombinací (smíšené proudění). Zvolený typ proudění má vliv na celkovou účinnost větrání, koncentraci částic i rozložení teplot v prostoru a je navrženo pomocí vhodně zvolených přívodních a odvodních prvků. Volba typu proudění závisí především na požadované třídě čistoty. Pro třídy ISO 5 a lepší je typické usměrněné proudění a od třídy ISO 6 se navrhuje většinou proudění neusměrněné nebo smíšené. [9]

Při usměrněném proudění vzduch proudí z velkoplošného stropního přívodního prvku směrem dolů k podlaze, kde je odváděn podlahovým odsáváním. Vzduch je přiváděn s výstupní rychlostí 0,2 - 0,4 m/s a klesá v rovnoběžných proudnicích směrem dolů a tím pod prvkem vytváří tzv. čistou zónu, z které jsou odstraňovány nečistoty. Příkladem použití jsou např. operační sály, kde je nad operačním stolem umístěna velkoplošná vyústka (laminární strop), který zajišťuje odstranění případných bakterií a nečistot z operační zóny a snížení rizika infekce pacienta. Usměrněné proudění může být řešeno i ve směru horizontálním (Obrázek 2). [5]

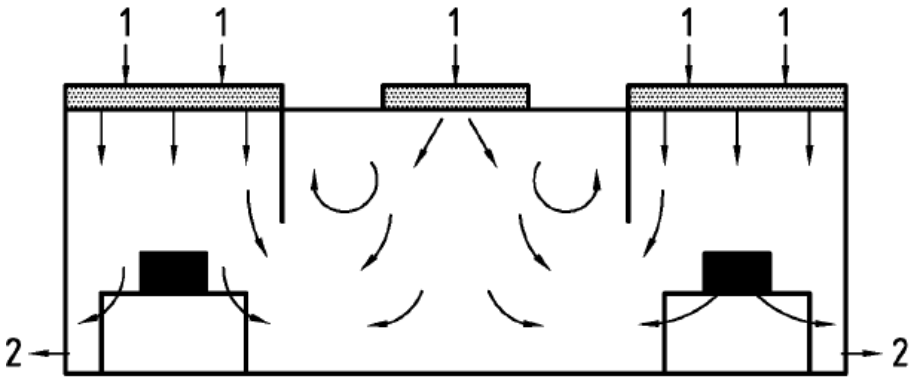


Obrázek 2 – Řešení usměrněného proudění [9]

Neusměrněné proudění je zajištěno přívodními prvky přivádějícími upravený vzduch, který ředí koncentraci částic v prostoru. Odvodní prvky jsou velmi často umístěny ve spodní části stěn (Obrázek 3). Smíšené proudění využívá kombinaci obou výše zmíněných typů v jednom prostoru (Obrázek 4). [5]

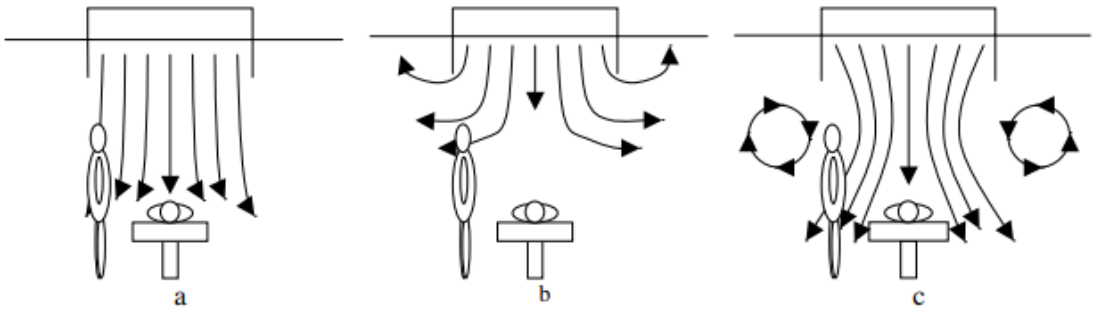


Obrázek 3 – Řešení neusměrněného proudění [9]



Obrázek 4 – Řešení smíšeného proudění [9]

Velký vliv na účinnost proudění má kromě dispozice prostoru umístění přívodních a odvodních prvků, vybavení, přítomnost osob a jejich chování i teplotní rozdíl přiváděného vzduchu a teploty v místnosti. Z Obrázku 5 je patrné, že pro zajištění správného proudění je nutné přivádět vzduch o nižší teplotě než je teplota v místnosti, aby klesal do operačního prostoru a udržoval zde čistou zónu. V případě, že je teplotní rozdíl příliš malý, směr proudění vzduchu je ovlivněn tepelnými zisky. Naopak při příliš nízké teplotě vzduchu (velkém teplotním rozdílu) se zvyšuje rychlost proudění, velikost čisté zóny je snižována a může být kontaminována částicemi vlivem vzniklý turbulencí. [10]



Obrázek 5 – Vliv teploty přívodního vzduchu na proudění vzduchu
a) – správný návrh, b) teplota přiváděného vzduchu příliš vysoká, malý rozdíl teplot, c) teplota přiváděného vzduchu příliš nízká, velký rozdíl teplot [10]

1.5.2.1 Další parametry čistého prostoru

Aby se zabránilo kontaminaci čistého prostoru z přilehlých prostor, je čistý prostor vzhledem k těmto prostorám udržován v přetlaku. Velikost přetlaku záleží na konkrétní aplikaci, ale většinou je doporučeno udržovat minimálně rozdíl 10 Pa vzhledem k běžným prostorám nebo prostorám s nižší třídou čistoty. Rychlost proudění vzduchu v prostoru by

měla být navržena nejen podle zvoleného typu proudění, ale i s ohledem na zajištění vhodných podmínek pro pobyt osob. [9] Počet výměn vzduchu v prostoru se odvíjí od požadované třídy čistoty, a i když jsou v literatuře dostupné jejich doporučené hodnoty, určení výměny vzduchu vychází velmi často spíše z poznatků z praxe. Příkladem je například prostor superaseptického sálu s třídou čistoty ISO 5, kde je požadována minimální výměna vzduchu 30 h^{-1}, a operační sály s třídou čistoty ISO 7 s vyžadovanou minimální výměnou 20 h^{-1}, zatímco v níže uvedené Tabulce 5 jsou doporučené hodnoty mnohem vyšší. [5; 11]

Tabulka 5 – Doporučené parametry čistého prostoru [12]

Třída čistoty dle ISO	8	7	6	5	4	3
Intenzita výměny vzduchu [h^{-1}]	20 až 25	35 až 60	120 až 300	-	-	-
Střední rychlost proudění vzduchu v prostoru [m/s]	-	-	0,1 až 0,2	0,3 až 0,45	0,45 až 0,5	0,45 až 0,5
Typ proudění v prostoru	turbulentní	turbulentní	smíšené	jednosměrné	jednosměrné	jednosměrné
Střední rychlost odváděného vzduchu [m/s]	2,5	1 až 2,5	1 až 2,5	0,3 až 0,45	0,45 až 0,5	0,45 až 0,5
Umístění odváděcí vyústky	ve stěně	ve stěně dole	ve stěně dole nebo podlahou	podlahou nebo ve stěně dole	podlahou	podlahou
Plocha filtrů v % plochy stropu	5 až 10	15 až 20	30 až 50	80	90 až 95	90 až 95
1. stupeň filtrace	G4	G4-F5	F5	F5	F6	F6
2. stupeň filtrace	F7	F7, F8	F8, F9	F9	F9, H10	H10, H11
3. stupeň filtrace	H12	H12, H13	H13, H14	H13, H14	H14, U15	U15 - U17
Přetlak [Pa]	5 až 10	>10	>10	>12	>15	>15
Kontrola předfiltrů	ročně	pololetně	čtvrtletně	čtvrtletně	měsíčně	měsíčně
Měření částic	ročně	měsíčně	týdně	týdně	denně	kontinuálně

1.5.3 Přístupy k návrhu řešení čistých prostor

Vzhledem k tomu, že čisté prostory mohou být rozděleny do čistých zón podle požadavků na výši koncentrace částic, je nutné tyto prostory od sebe určitým způsobem oddělit. ČSN EN ISO 14644-4 uvádí následující tři přístupy k oddělení jednotlivých zón:

- Vytěsňování – využívá malého rozdílu tlaků a vysoké rychlosti proudění vzduchu (>0,2 m/s) směrem k méně čistým prostorám
- Tlakový rozdíl – udržování vysokého tlakového rozdílu 5–20 Pa mezi čistým prostorem a prostorem s nižší čistotou tak, aby tlakový rozdíl byl dostatečný a stabilní, umožnil otevírání dveří a bylo zabráněno otočení směru proudění

- Fyzická bariéra – vytvoření fyzické bariéry jako prevence přenosu nečistot z méně čisté zóny do čisté zóny, příkladem fyzické bariéry využívané při přípravě léčiv je podtlakový izolátor s rukávy [9]

1.5.4 Filtrace

Podmínkou dosažení požadované třídy čistoty je instalace několika stupňů filtrace vzduchu s koncovými filtry s vysokou účinností, které jsou klasifikovány dle ČSN EN 1822. Označení filtrů prošlo změnou a z původních vysoce účinných filtrů HEPA a ULPA se oddělily ještě filtry skupiny EPA. V Tabulce 6 je zobrazeno porovnání nového a staršího označení a jsou zde uvedeny procentuální odlučivosti pevných částic pro jednotlivé třídy filtrů a možnosti jejich aplikace. V čistých prostorách se většinou používají nejméně tři stupně filtrace tak, aby koncové filtry třídy HEPA nebo ULPA nebyly zbytečně zanášeny částicemi větších velikostí. [13; 14] V případě nutnosti odstranění plynných znečišťujících látek ze vzduchu je nutné instalovat tzv. adsorpční filtry s aktivním uhlím, které tyto plynné škodliviny i zápach zachycují [15].

Tabulka 6 – Porovnání nového a původního značení vysoce účinných filtrů a jejich aplikace [14]

Filtrační skupiny	Odlučivost pro MPPS* (%)	ČSN EN 1822:2009	ČSN EN 1822			
		Test MPPS	Test MPPS	Test olejovou mlhou	Test aerosolem roztoku NaCl	
EPA filtry (Efficiency Particulate Air Filter)	85	E10	H10	Q	EU9-EU10	EPA a kompakty. V prostorách se středně vysokými nároky na čistotu vzduchu, pro zachycení částeček jako jsou spóry hub, bakterie. Třetí filtrační stupeň.
	95	E11	H11	Q/R	EU10	
	99.5	E12	H12	R	EU10-EU11	
HEPA filtry (High Efficiency Particulate Air Filter)	99.95	H13	H13	S	EU11-EU13	HEPA filtry, kompakty. V prostorách s vysokými nároky na čistotu vzduchu, pro zachycení částeček jako jsou spóry hub, bakterie. Jako třetí filtrační stupeň.
	99.995	H14	H14	S/T	EU13	
ULPA filtry (Ultra Low Penetrating Air Filter)	99.9995	U15	U15	T	EU14	ULPA filtry. Určeno do speciálních prostor s max. požadavky na čistotu vzduchu. Čtvrtý filtrační stupeň.
	99.9998	U16	U16	U		
	99.999995	U17	U17	U		

1.5.5 Tepelně-vlhkostní prostředí

Udržování tepelně-vlhkostních podmínek záleží na funkci čistého prostoru. Aplikace v průmyslu, při výrobě elektroniky, léčiv, potravinářství nebo různých laboratořích vyžadují udržování vnitřních podmínek podle požadavků instalovaných technologií nebo probíhajících procesů tak, aby nebyla ohrožena kvalita výsledných produktů nebo nedošlo k poškození technologií. Zajištění tepelného komfortu uživatelů takových místností je zde až druhotnou záležitostí. Oproti tomu např. na operačních sálech je vyžadováno takové vnitřní prostředí, aby byl zajištěn tepelný komfort uživatelů vedoucí k hladkému průběhu operace a nebylo ohroženo zdraví pacienta. [16] Správný návrh vhodné teploty a relativní vlhkosti a jejich udržování navíc snižuje i růst bakterií, které by mohly mít negativní dopad na dobu uzdravování pacienta. I v případě operačního sálu je velmi obtížné vyhovět všem uživatelům, protože např. chirurgové požadují nižší teploty z důvodu vysoké aktivity a vyššího tepelného odporu oděvu, zatímco anesteziologové a ostatní uživatelé s nižší aktivitou a tepelným odporem oděvu požadují vyšší teploty a zároveň je zde ještě nutné minimalizovat riziko podchlazení pacienta. [17; 18]

1.5.6 Části vzduchotechnického systému

1.5.6.1 Vzduchotechnická jednotka

Vzduchotechnická jednotka navržená pro čistý prostor zajišťuje kompletní úpravu vzduchu a musí být v tzv. hygienickém provedení. Nejčastěji je provedena jako sestavná s dvoustupňovou filtrací, zpětným získáváním tepla a/nebo směšováním, ohřevem a chlazením pomocí vodních výměníků, zvlhčováním a případně i odvlhčováním. Nejčastěji je pro zvlhčování instalován parní vyvíječ a pro odvlhčování se využívá kombinace chlazení a následného ohřevu nebo adsorpčního odvlhčování podle potřeby jednotlivých aplikací. Ve většině projektů se v dnešní době již využívá zpětné získávání tepla nejčastěji pomocí výměníků deskových, rotačních nebo s kapalinovým okruhem v případě větší vzdálenosti mezi přívodním a odvodním potrubím. [5] Směšování je možné využívat jen tam, kde nedochází v prostoru např. k používání anesteziologických plynů nebo dalších látek, které by se dostávaly cirkulací zpátky do prostoru. Výhodou směšování je opakované využití filtrovaného vzduchu, který v případě nízkého generování částic v místnosti má vyšší kvalitu než vzduch venkovní. [16]

1.5.6.2 Koncové prvky vzduchotechniky

Koncové prvky vzduchotechniky jsou umisťovány podle požadovaného typu proudění a třídy čistoty. Nejčastěji jsou přívodní prvky umístěny na stropě místnosti a odvodní prvky v dolní části stěn nebo v podlaze. V případě operačních sálů, kde jsou používány anesteziologické plyny, jsou odváděcí vyústky instalovány u stropu i u podlahy. Tento způsob umožňuje oddělení odsávání anesteziologických plynů koncentrovaných u podlahy od zbylého vzduchotechnického systému, který využívá cirkulaci vzduchu. Pro přívodní prvky je typické jejich provedení s filtry třídy HEPA nebo ULPA a nejčastěji se setkáváme s čistými nástavci nebo s tzv. laminárními stropy. Laminární strop je běžně užívaným velkoplošným prvkem pro přívod upraveného vzduchu na operačních sálech, protože umožňuje usměrněné proudění, kterým jsou vytěsňovány částice z operativního prostoru. Jeho konstrukce kromě přívodu vzduchu a filtrů obsahuje i laminarizátor usměrňující proudění a integrované osvětlení (Obrázek 6). [5]

Obrázek 6 – Laminární strop [19]

1.5.6.3 Potrubní rozvody

Na vzduchotechnická potrubí zajišťující distribuci vzduchu v čistých prostorách jsou kladeny zvýšené nároky na těsnost, aby nedocházelo k úniku vzduchu z potrubí a vnikání nečistot. Pro čisté prostory je vyžadováno použití potrubí těsnosti nejméně třídy B podle ČSN EN 12237 pro kruhová potrubí a podle ČSN EN 1507 pro pravoúhlá potrubí. [20; 21] Použití ohebného potrubí by mělo být omezeno pouze pro připojení koncových prvků. Při montáži potrubí i koncových prvků je nezbytné dodržet správný technologický postup, velkým nedostatkem bývá časté neutěsnění koncové vyústky k podhledu nebo stěně. [22]

1.5.7 Regulace čistého prostoru

Udržování požadovaného vnitřního prostředí v čistém prostoru s sebou nese požadavky na řízení teploty a vlhkosti, ale i stálých tlakových poměrů, aby nedocházelo ke kontaminaci prostoru z přilehlých místností. Vzduchotechnické jednotky pro prostory, kde je vyžadováno udržování stabilního tlaku v místnosti, jsou většinou instalovány s ventilátory s frekvenčními měniči a jsou řízeny podle konstantního tlaku. Oproti tomu některé aplikace např. na operačních sálech umožňují snížení množství přiváděného vzduchu na minimum v době nepoužívání prostoru, které vede k úsporám energií a nižším provozním nákladům. Regulace teploty a vlhkosti standardně probíhá pomocí systému řízení s instalovanými čidly v místnosti nebo v potrubí odváděného vzduchu. Jen výjimečně je uživateli např. operačního sálu umožněno ovládat požadovanou teplotu termostatem v místnosti, ale nikoliv již vlhkost z důvodu obtížné regulovatelnosti. [11]

1.5.8 Požadavky na stavebně-konstrukční řešení

Čisté prostory bývají konstrukčně odděleny od ostatních částí objektu a jejich dispozice jsou navrhovány podle požadavků na uspořádání prostor, umístění zařízení, vybavení a počet osob, ale i s ohledem na potřeby budoucí přeměny. Konstrukce by měly být jednoduché v těsném provedení bez hran a spár. V prostorách by měly být eliminovány rohy a kouty, v kterých by se udržovaly nečistoty a všechny povrchy by měly být snadno čistitelné. [11]

Velikost čistého prostoru je vhodné navrhovat co nejmenší s ohledem na plánované využití a v případě většího čistého prostoru je doporučeno ho rozdělit do zón. Dále je v projektu nutné pamatovat na návrh přilehlých a pomocných prostor, které budou sloužit pro zabezpečení provozu čistého prostoru, úklid a údržbu. [9]

1.5.9 Energetické úspory

Vzhledem k množství instalovaných systémů a technologií a přísným požadavkům na udržování požadovaného prostředí jsou čisté prostory velmi často vysoce energeticky náročnými projekty. Na druhou stranu, i zde je patrná snaha o snižování energetické náročnosti budov, a právě v těchto případech aplikovaná energetická opatření přinášejí viditelné výsledky. Kromě již zmíněného snížení množství přiváděného vzduchu v době nečinnosti nebo používání ventilátorů s frekvenčními měniči nebo EC motory, by mělo být

standardní součástí instalování systémů s vysokou účinností, využívání obnovitelných zdrojů energie, instalace LED osvětlení a vzduchotechnického systému se zpětným získávání tepla nebo cirkulací vzduchu. V prostorách s velkými zisky tepla, které jsou odváděny pomocí chladících zařízení, je možné toto odpadní teplo využívat např. pro vytápění jiných místností nebo předehřev teplé vody. Objekty s čistými prostory jsou obvykle vybaveny systémem řízení celé budovy, který monitoruje stávající stav a reguluje provoz systémů podle aktuální potřeby. Ke zvýšení energetických úspor bezpochyby vede i zaškolení uživatelů čistého prostoru a jeho správná údržba. [11; 16; 23]

1.6 Provoz a údržba čistého prostoru

1.6.1 Uvedení do provozu

Před uvedením čistého prostoru do užívání je nutné, aby prošel tzv. procesem validace podle požadavků stanovených v ČSN EN 14644-1. V čistém prostoru je provedeno měření koncentrace částic podle požadavků normy pro navrhovanou třídu čistoty a je zjištěno, zda prostor tyto požadavky splňuje či nikoliv. Počet měřících bodů je závislý na půdorysné ploše místností a délka měření je stanovená podle zvolené třídy čistoty. [3; 9]

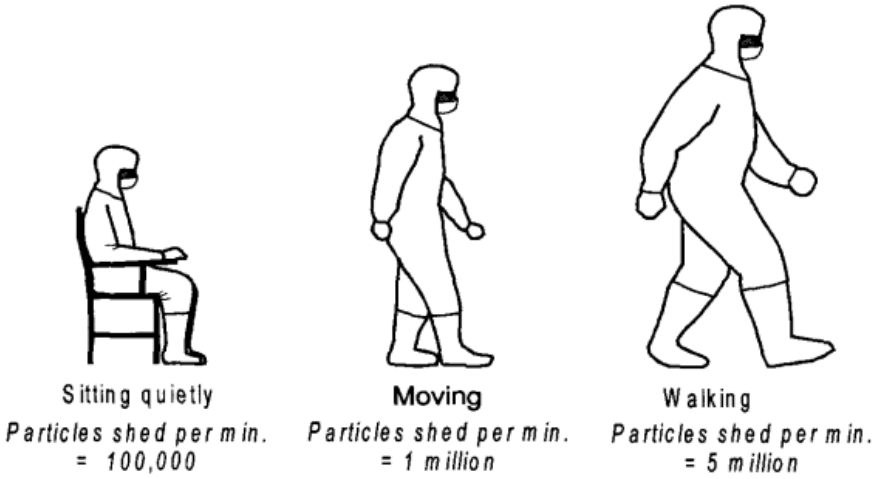
Norma ČSN EN 14644-3 uvádí i další volitelné testy s popisem metodiky měření i použitých přístrojů jako např. test tlakového obrazce, test těsnosti instalovaných filtrů, měření teploty nebo vlhkosti. [24] Testy by měly probíhat pouze za ustáleného vzduchotechnického systému a vnitřních podmínek. Před instalací posledního stupně filtrace musí být celý prostor včetně všech částí vzduchotechnického systému vyčištěn. [9]

Během provozu by měl být čistý prostor v pravidelných intervalech monitorován podle stanoveného plánu, který by měl obsahovat předmět monitorování a jeho frekvenci. Zejména se sleduje, zda je udržována požadovaná koncentrace částic, ale i tlakové poměry, teplota nebo vlhkost. [9]

1.6.2 Provozní podmínky

Úspěšný provoz čistého prostoru a udržování požadovaných podmínek vyžaduje stanovení provozního řádu, s kterým budou všichni uživatelé seznámeni. Jedná se především o podmínky vstupu osob do čistého prostoru, předepsané chování a požadavky na transport

materiálů. Mezi nejběžnější opatření čistých prostor patří používání předepsaného čistého oděvu, vstup osob přes vakuovou sprchu a transport předmětů přes materiálovou propusť, kde jsou náležitě očištěny od nečistot. Uživatelé by se měli vyvarovat užívání kosmetických přípravků, které zvyšují uvolňování částic a ze stejného důvodu by měli omezit i pohybovou aktivitu. Příklad závislosti vyššího uvolňování částic při vyšší aktivitě jedince je patrný z Obrázku 7. Uživatel, který pracuje v klidu v sedě uvolňuje přibližně 100 000 částic za minutu, zatímco z uživatele vykonávající chůzi se uvolňuje 50x více částic. V čistých prostorách by mělo být také omezeno užívání předmětů ze dřeva, papíru, kůže nebo bavlny a dalších přírodních materiálů, z kterých mohou být lehce uvolňovány částice. [2; 25]



Obrázek 7 – Uvolňování částic z lidského organismu v závislosti na provozované aktivitě [2]

1.6.3 Údržba čistého prostoru

Pro každý čistý prostor je nutné stanovit plán úklidu, kde bude uveden způsob i frekvence úklidu pro každou místnost čistého prostoru. Například šatny a vstupní chodby by měly být čištěny nejméně jednou denně. Úklid je většinou rozdělen podle rozsahu a některé činnosti jsou prováděny s nižší frekvencí. Běžně se otírají vzduchotechnické vyústky, pobytová místa, podlahy a vyměňují se jednorázové rohože, s nižší frekvencí se potom otírají plochy stěn a stropů. Zásadou správného úklidu je postupovat shora dolů, používat bezprašné utěrky, vysavače s vysoce účinnými filtry a předepsané čistící prostředky. Dále je nutné stanovit např. frekvenci kontroly zanesenosti a výměny filtrů. [25]

2 Analýza stávajícího stavu objekt

2.1 Cíl analýzy

Cílem této části je zjištění a posouzení současného stavu čistého skladu a přilehlých čistých prostor v objektu laserového centra HiLASE v Dolních Břežanech. Informace o stávajícím stavu prostor byly získány v podobě projektové dokumentace, validačního protokolu čistých prostor, prohlídek a odborných konzultací s pracovníky centra. Podstatnou částí analýzy je provedení průzkumu pomocí několika měření, které mají za cíl zjistit úroveň čistoty prostor, ale i vnitřního prostředí, zejména tepelně-vlhkostního mikroklimatu. Vyhodnocení stávajícího stavu čistého skladu a přilehlých místností povede k definování počátečních podmínek pro návrh řešení přeměny skladu na optickou laboratoř.

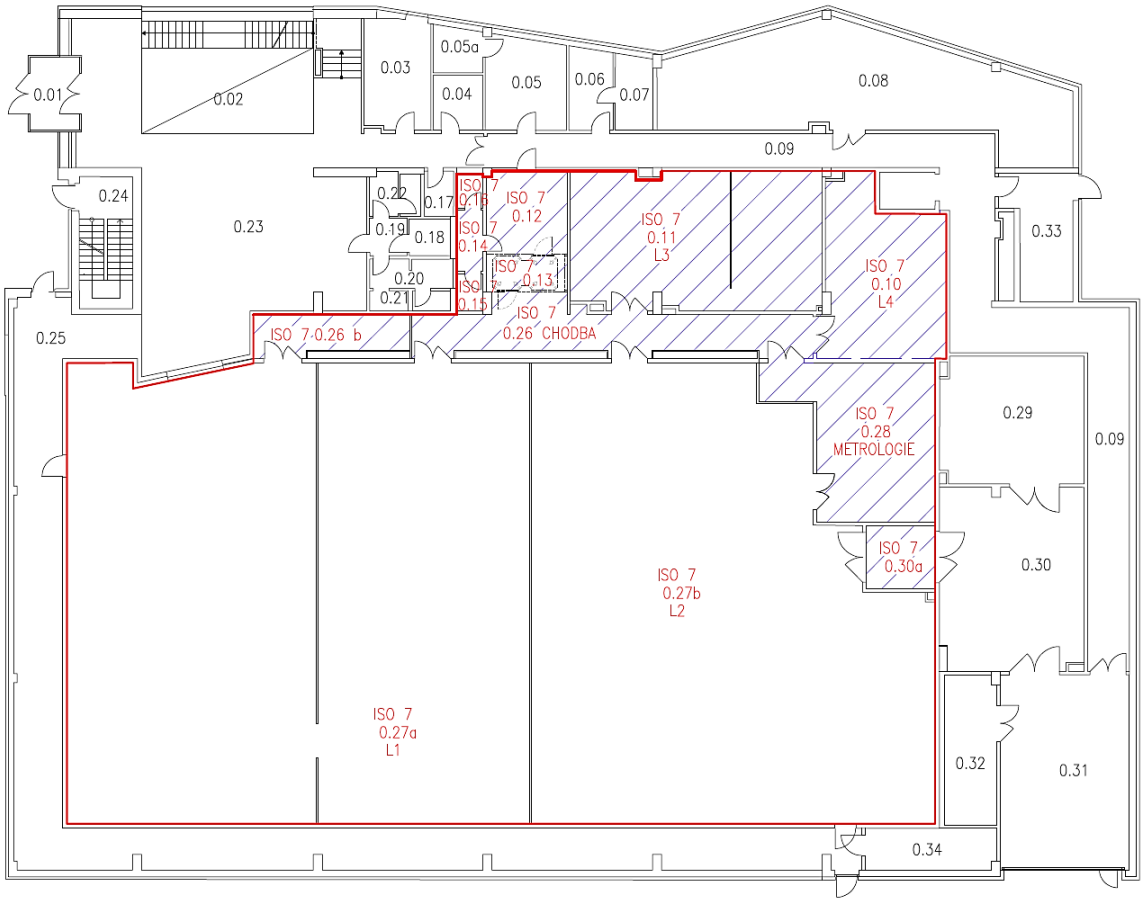
2.2 Popis analyzovaných prostor

Analyzované prostory jsou součástí objektu laserového centra HiLASE Fyzikálního ústavu Akademie věd, který byl otevřen na podzim roku 2014. Jedná se o budovu o třech nadzemních podlažích umístěnou v katastrálním území obce Dolní Břežany v zastavěné části na adrese Za Radnicí č.p. 828. Objekt je rozdělen na administrativní část a část laboratoří. Administrativní část se nachází v 2. a 3.NP a jsou zde umístěny kanceláře pro 60 osob, přednáškový sál pro 50 posluchačů, dvě zasedací místnosti a další nezbytné provozní a technické prostory. Laboratoře jsou umístěny v 1.NP, kde jsou v režimu čistého prostoru a v části 2.NP.

Předmětem analýzy a následné koncepce návrhu je prostor skladu (dále jako L4), který se nachází v čistém prostoru, kde je součástí pomocných prostor zajišťujících převážně zázemí hlavním laboratořím v laserové hale. Čistý prostor je umístěn pouze v 1.NP a je stavebně i funkčně oddělen od ostatních částí objektu. V hlavních laboratořích jsou umístěny laserové technologie, které vyžadují zvýšenou čistotu prostoru a také udržování požadované teploty a vlhkosti. Účelem pomocných prostor je zejména zajištění provozu laserových technologií, skladování materiálů a přístrojů nebo jejich montáž. V současnosti je místnost L3 využívána jako laserová laboratoř, v místnosti metrologie jsou ovládány laserové technologie v laboratoři L1/L2 a místnost L4 slouží částečně jako sklad a částečně jako

laserová laboratoř. V blízké budoucnosti je plánováno vytvoření optické laboratoře přeměnou místnosti L4, které vyžaduje zajištění určitých podmínek.

Na Obrázku 8 je zobrazen půdorys 1.NP s barevným vyznačením čistého prostoru. Šrafou jsou na obrázku vyznačeny pomocné prostory. Půdorys 1.NP s přiloženou tabulkou místností je součástí Přílohy č. 1.



Obrázek 8 – Umístění čistého prostoru v 1.NP

Vnitřní prostředí v pomocných prostorách je zajišťováno jedním vzduchotechnickým systémem a s ohledem i na provázanost provozu jednotlivých místností je nutné analyzovat i tyto přilehlé prostory. Vnitřní prostředí v místnosti L4 je tedy bezprostředně ovlivňováno těmito přilehlými prostory, protože zvolené řešení VZT systému neumožňuje samostatnou regulaci jednotlivých místností. Přesný popis řešení vzduchotechnického systému je uveden v části 2.5.

2.3 Popis čistého provozu

Budova laserového centra je využívána pracovníky administrativní části, uživateli běžných laboratoří a laboratoří umístěných v čistém prostoru ve všední dny v době od 8:00 do 22:00. Provoz čistých prostor není nijak ovlivněn provozem ostatních částí objektu. Odhadovaný počet uživatelů čistých prostor je cca 28 osob, ale obsazenost místností je velmi proměnlivá s ohledem na aktuální potřeby uživatelů a probíhajícího výzkumu.

V současné době jsou všechny místnosti čistého prostoru validovány na třídu ISO 7 dle ČSN EN 14644-1. Čisté prostředí s sebou přináší nutnost dodržování určitých zásad před vstupem do čistého prostoru i během pobytu, a proto jsou všichni uživatelé seznámeni s provozním řádem a bezpečnostními pokyny pro práci v tomto prostoru.

Podmínkou vstupu do čistého prostoru je obléknutí požadovaného pracovního oděvu, který se skládá z ochranné antistatické kombinézy, jednorázové pokrývky hlavy, jednorázových návleků na obuv, gumových rukavic a případně roušky na obličej. Osoby vstupující do čistého prostoru jsou povinny projít přes vzduchovou sprchu, která zabrání kontaminaci čistých prostor nečistotami z okolí. Pro psaní je nutné použití speciálních papírů, z kterých nejsou uvolňovány částice, a všechny přinesené obyčejné papíry musí být opatřeny folií. Veškeré přístroje, nástroje nebo např. i psací potřeby musí být před vstupem do čistého prostoru očištěny připravenými prostředky. Větší zařízení nebo technologie je nutné do laboratoří dopravit přes materiálovou propusť, kde jsou náležitě očištěny od nečistot.

Vzhledem k instalovaným laserovým technologiím, kvůli kterým je nutné pracovat v ochranných brýlích, jsou všichni uživatelé laboratoří nuceni prostor nejdéle po dvou hodinách na min. 15 minut opustit.

2.4 Požadavky na stavebně-konstrukční řešení

Hala laserových laboratoří (místnosti L1, L2, metrologie a materiálová propusť) je tzv. vestavěna do objektu a je dilatací oddělena od ostatních částí objektu z důvodu zabránění přenosu nežádoucích vibrací. Obvodové stěny i stropní konstrukce haly jsou vyrobeny z železobetonu. Ostatní nenosné stěny vnitřních prostor jsou tvořeny ze sádrokartonových příček s kovovými profily a minerální izolací. Všechny povrchy jsou opatřeny lehce omyvatelným nátěrem a stropní podhledy jsou navrženy a instalovány tak, aby se co nejvíce

omezilo pronikání vzduchu mezi spárami. Z důvodu složitosti vzduchotechnického systému byl nad stropním podhledem haly laserových laboratoří navržen meziprostor o výšce 1,25 metru, který umožňuje instalaci těchto systémů.

2.5 Řešení čistého prostoru

2.5.1 Třídy čistoty

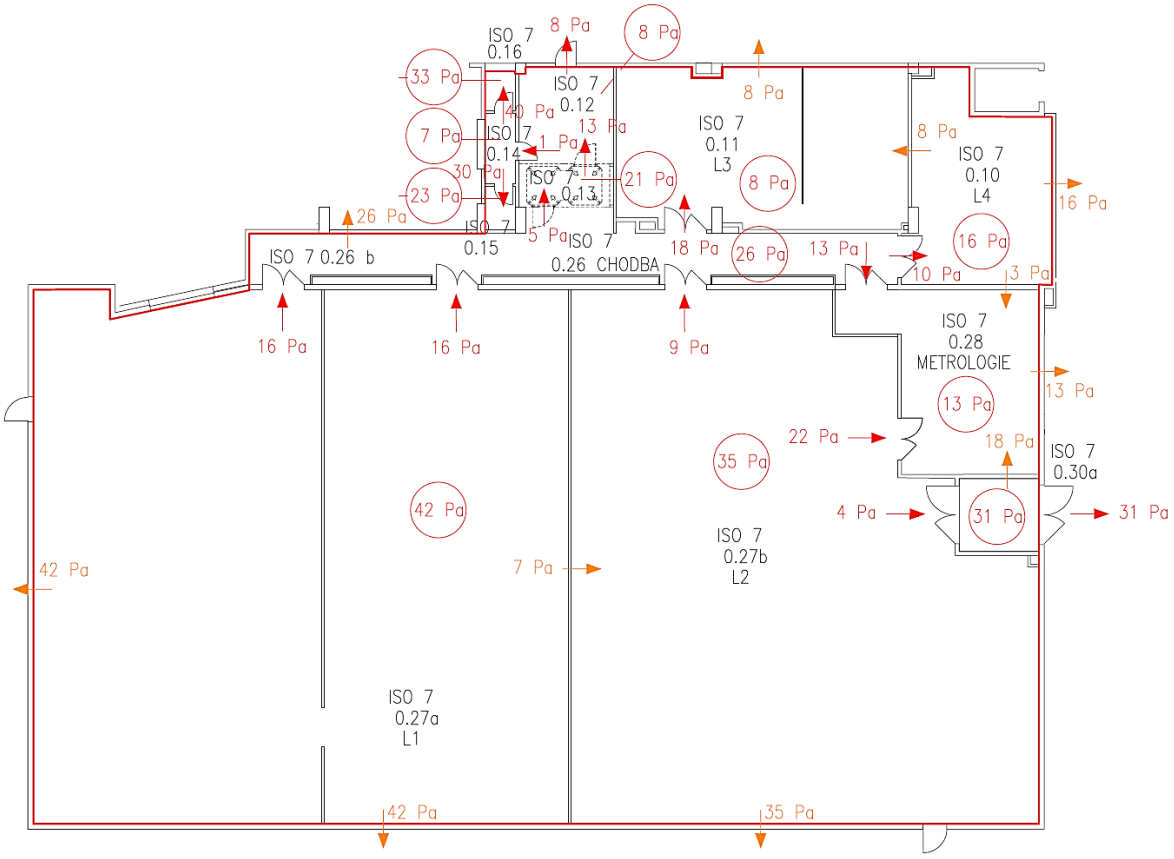
Z poskytnuté projektové dokumentace vyplývá, že místnosti laserové haly a chodba byly původně navrženy na třídu čistoty ISO 7, zatímco ostatní pomocné prostory byly navrženy na třídu ISO 8. Nicméně z poskytnutého validačního protokolu vyplývá, že všechny místnosti čistého prostoru splnily při procesu validace požadavky na třídu čistoty ISO 7. Zajímavé je, že pro prostory s navrženou třídou čistoty ISO 7 byla podle projektové dokumentace navržena 30-násobná výměna vzduchu a pro prostory s ISO 8 pouze 10-násobná výměna vzduchu, a přesto tyto místnosti splňují třídu ISO 7.

V místnostech nejsou instalovány žádné technologie, které by uvolňovaly částice do prostoru a největším zdrojem nečistot je zde člověk. Skutečná intenzita výměny vzduchu pro jednotlivé místnosti, která byla naměřená během procesu validace čistých prostor je uvedena v Tabulce 7.

Tabulka 7 – Výměna vzduchu v jednotlivých místnostech a přetlak k okolí podle validačního protokolu

Číslo místnosti	**Název místnosti**	**Třída čistoty**	**Výměna vzduchu**	**Přetlak**
[-]	**[-]**	**[-]**	**[h^{-1}]**	**[Pa]**
0.10	**Čistý sklad L4**	ISO 7	9,6	16
0.11	**Laserová laboratoř L3**	ISO 7	9,8	8
0.12	**R filtr**	ISO 7	9,9	8
0.13	**Personální propusť**	ISO 7	-	21
0.14	**Předsíň**	ISO 7	42,5	7
0.15	**WC**	ISO 7	-	-23
0.16	**WC**	ISO 7	-	-33
0.26	**Chodba**	ISO 7	28,1	26
0.27a	**Hala laserů L1**	ISO 7	37,4	42
0.27b	**Hala laserů L2**	ISO 7	28,9	35
0.28	**Metrologie**	ISO 7	29	13
0.30a	**Materiálová propusť**	ISO 7	29,7	31

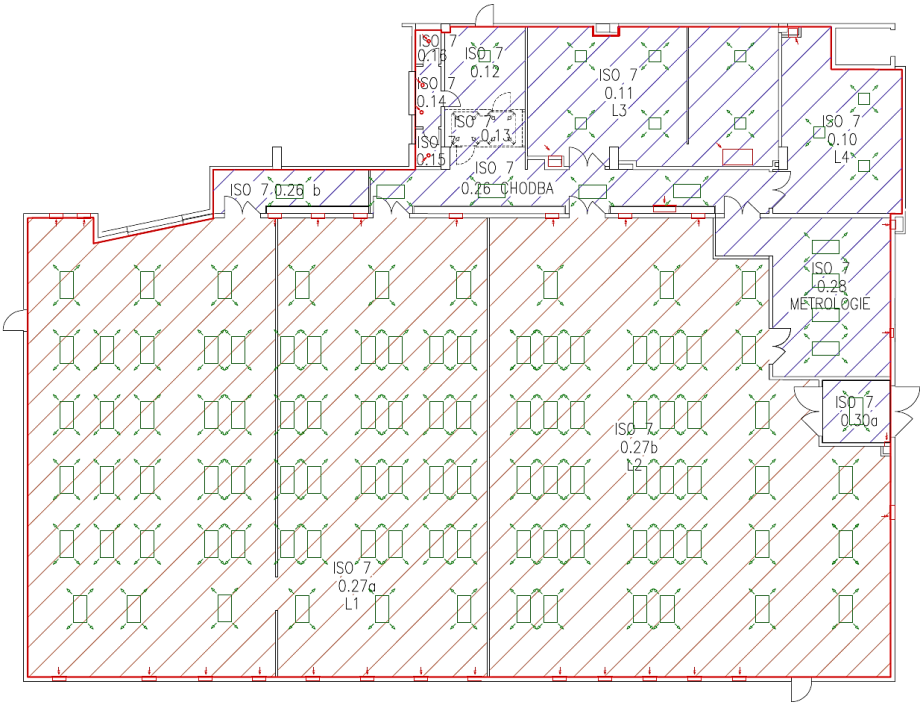
K místnostem L1 a L2 bylo při návrhu přistupováno s prioritou a navržený tlakový obrazec čistého prostoru je tomu uzpůsoben tak, že tyto prostory, i když jsou nakonec všechny místnosti validovány na stejnou třídu čistoty, jsou vzhledem k ostatním prostorám udržovány v přetlaku, aby nebyly ohroženy případnou kontaminací nečistotami z přilehlých prostor. Schéma tlakových poměrů vycházejících z validačního protokolu, který odpovídá i současnému stavu prostoru, je zobrazen na Obrázku 9. Hodnoty přetlaků pro jednotlivé místnosti jsou uvedeny ve výše zmíněné tabulce. Během validace ještě nebyla vytvořena místnost 0.26b, a proto není uvedena v tabulce ani na schématu tlakového obrazce. Rozdělovací příčka, která byla později v prostoru chodby 0.26 umístěna a vytvořila tak prostor 0.26b obsahuje integrovanou mřížku, která zajišťuje proudění vzduchu dle původního návrhu a v souladu s validačním protokolem.



Obrázek 9 – Schéma tlakového obrazce čistých prostor

2.5.2 Rozdělení vzduchotechnického systému čistého prostoru

Vzduchotechnický systém čistého prostoru se skládá ze dvou oddělených systémů, které zajišťují požadované vnitřní prostředí v různých částech prostor (Obrázek 10). Tyto systémy jsou na sobě funkčně nezávislé.



Obrázek 10 – Barevné rozdělení čistého prostoru na dva vzduchotechnické systémy

První vzduchotechnický systém zajišťuje udržení požadovaného vnitřního prostředí v místnosti L1 (0.27a) a L2 (0.27b) a skládá se z centrální vzduchotechnické jednotky, ve které je venkovní vzduch filtrován dvěma stupni filtrů (M5 a F7) a primárně upraven na požadovanou teplotu a vlhkost a následně z celkem čtyř tzv. dceřiných jednotek, které jsou napojené na centrální jednotku. Tyto jednotky zajišťují cirkulaci vzduchu, dochlazování a dohřívání vzduchu na požadovanou teplotu, třetí stupeň filtrace (F9) a pomocí stropních čistých nástavců s koncovou filtrací třídy E11 přivádějí vzduch do prostoru laboratoří. Zpět do cirkulačních jednotek je vzduch nasáván přes vyústky umístěné u podlahy na stěnách. Centrální i všechny dceřiné jednotky jsou umístěny ve strojovně vzduchotechniky v 2.NP.

Všechny ventilátory jsou vybaveny frekvenčními měniči a vzduchotechnický systém je řízen podle konstantní tlak v potrubí. Na trasy k jednotlivým cirkulačním jednotkám jsou umístěny regulátory průtoku, které udržují požadovaný přetlak v čistých prostorách.

Druhý vzduchotechnický systém zajišťuje čistotu a větrání tzv. pomocných prostor, mezi které patří místnost čistého skladu L4, laboratoř L3, chodba, místnost metrologie, materiálová propusť a prostor před vakuovou sprchou. Na rozdíl od prvního systému vzduchotechniky je součástí tohoto systému pouze jedna vzduchotechnická jednotka, která zajišťuje vnitřní podmínky pro všechny výše uvedené prostory. Tento vzduchotechnický systém bude detailněji popsán v následující kapitole.

2.5.3 Vzduchotechnický systém čistého skladu a přilehlých prostor

2.5.3.1 Popis systému

Systém zajišťuje větrání, odvod tepelné zátěže a udržování požadované třídy čistoty v pomocných prostorách. Vzhledem k tomu, že systém se skládá z jedné vzduchotechnické jednotky bez dalších koncových regulačních prvků, které by umožnily udržovat vnitřní prostředí podle požadavků jednotlivých místností, není možné zajistit dodržení požadovaných parametrů tepelné pohody v místnostech. Systém je řízen podle teplotního čidla v místnosti Metrologie, a tedy podmínky v ostatních prostorách jsou závislé na aktuální tepelné zátěži.

Vzduchotechnická jednotka je umístěna ve strojovně vzduchotechniky v 2.NP. Sání čerstvého a odvod znečištěného vzduchu je řešeno nad střechu objektu. Jednotka zajišťuje směšování vzduchu, chlazení, ohřev a dva stupně filtrace (filtry M5 a F9). Za vzduchotechnickou jednotkou je instalován parní vyvíječ, který zajišťuje požadovanou hodnotu relativní vlhkosti v místnostech zejména v zimním období. Vzduchotechnická potrubí jsou umístěná ve stropním meziprostoru nebo podhledu. Koncové přívodní prvky jsou navrženy jako stropní vyústky s koncovým stupněm filtrace třídy E11. Odvodní prvky jsou umístěny u podlahy na stěnách místností. Vzduch z prostoru před vakuovou sprchou je odveden přes navazující hygienické místnosti pomocí ventilátoru.

Vzduchotechnická jednotka je vybavena ventilátory s frekvenčními měniči a systém je řízen tak, aby v potrubí byl udržován konstantní tlak. Pro zaregulování systému podle požadovaných průtoků vzduchu v jednotlivých místnostech jsou na odbočky pro každou místnost umístěny regulátory průtoku, které zajišťují udržování požadovaného přetlaku v místnostech. Řešení vzduchotechnického systému je v Příloze č. 2.

2.5.3.2 Návrhové parametry

Analýza stávajícího stavu vyžadovala zjištění mnoha parametrů, které byly uvažovány při tvorbě projektové dokumentace. Některé parametry jako např. tepelná zátěž jednotlivých místností v této dokumentaci nebyly uvedeny a bylo nutné je dopočítat z již známých parametrů. Další parametry návrhu systému se od dokumentace odlišovaly a bylo nutné zjistit jejich skutečný stav např. i z poskytnutého validačního protokolu.

Uvažované vnější a vnitřní výpočtové podmínky jsou uvedeny v Tabulce 8. Z této tabulky je patrné, že je požadována konstantní teplota v místnostech v průběhu celého roku. Hodnota teploty přiváděného vzduchu v letním období nebyla v podkladech uvedena a byla zvolena na základě konzultací s pracovníkem obsluhy VZT systému a vlastní úvahy. Vyšší rozdíl mezi teplotou přiváděného vzduchu a teplotou vzduchu v místnosti není při takto zvoleném řešení systému VZT vhodný, protože by příliš nízká teplota přiváděného vzduchu mohla negativně ovlivňovat tepelnou pohodu uživatelů.

Tabulka 8 – Vnější a vnitřní výpočtové údaje objektu HiLASE

Vnější výpočtové údaje		
Zeměpisná poloha	49°57,749' s.š.; 14°27,321' v.d.	
Nadmořská výška	337 m.n.m	
Tlak vzduchu	97,22 kPa	
Parametry venkovního prostředí	**LÉTO**	**ZIMA**
Teplota venkovního vzduchu	32 °C	-12 °C
Entalpie vzduchu	58 kJ/kg	-9,6 kJ/kg
Vnitřní výpočtové údaje		
Parametry vnitřního prostředí	**LÉTO**	**ZIMA**
Teplota vzduchu	20°C	20°C
Relativní vlhkost vzduchu	55%	40%
Teplota přiváděného vzduchu	17°C	21°C

Pro zjištění tepelné zátěže bylo nutné nejdříve vypočítat množství přiváděného vzduchu z intenzity výměny vzduchu, která byla získána z validačního protokolu, protože navržené bilance vzduchu z projektové dokumentace se od skutečného stavu liší. Poté byla tepelná zátěž vypočítána dle rovnice (1) a výsledky jsou uvedeny v Tabulce 9. Tepelná ztráta místností byla převzata z projektové dokumentace.

$$Q = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i - t_p)}{3600} \quad [W] \tag{1}$$

Tabulka 9 – Vypočtené uvažované tepelné zátěže a tepelné ztráty pro jednotlivé místnosti

Číslo místnosti	Název místnosti	Plocha místnosti	Objem místnosti	Výměna vzduchu	Přívod vzduchu	t_i-t_p	Tepelná zátěž	Tepelná ztráta
[-]	[-]	[m^2]	[m^3]	[h^{-1}]	[m^3]	[°C]	[W]	[W]
0.10	**Čistý sklad L4**	38,6	119,66	9,6	1137	3	1148	600
0.11	**Laserová laboratoř L3**	68,5	212,35	9,8	2081	3	2102	850
0.12	**R filtr**	13	40,3	9,9	399	3	403	300
0.26+0.26b	**Chodba**	48,2	149,42	28,1	4199	3	4241	300
0.28	**Metrologie**	37	114,7	29	3326	3	3360	450
0.30a	**Materiálová propusť**	8,7	26,97	29,7	801	3	809	60

Navržení možného řešení přeměny skladu v další části práce vyžadovalo i zjištění množství odváděného vzduchu z každé místnosti, aby bylo možné stávající vzduchotechnický systém např. upravit. Vzhledem k tomu, že je požadováno udržovat všechny místnosti v přetlaku vzhledem k běžným prostorám, je nutné odvádět z místností méně vzduchu, než je přiváděno. Pro výpočet množství odváděného vzduchu z tlakových poměrů podle rovnice (2) je nutné také znát velikost netěsností v konstrukcích místnosti [16].

$$Q = 840 \cdot A_L \cdot \Delta p^{0,5} \quad [l/s] \tag{2}$$

Velikost netěsností ve stěnách a stropech byla stanovena podle Tabulky 10 z ČSN EN 12101-6 [26]. Železobetonové stěny, které oddělují laserovou halu od ostatních čistých prostor, byly uvažovány jako těsné, zatímco nenosné stěny ze sádrokartonových příček byly uvažovány jako průměrné. Pro výpočet úniku vzduchu dveřmi bylo podle poznatků z literatury uvažováno s mezerou do velikosti 5 mm [5; 16].

Tabulka 10 – Hodnoty úniku vzduchu konstrukcemi podle ČSN EN 12101-6 [26]

Tabulka A.5 – Hodnoty úniku vzduchu stěnami

Konstrukční prvek	Nepropustnost stěny	Poměr plochy stěny A_{LW}/A_{WALL}
obvodové stěny budovy (včetně trhlin v konstrukci, netěsností kolem oken a dveří)	těsná	$0{,}7 \times 10^{-4}$
	průměrná	$0{,}21 \times 10^{-3}$
	netěsná	$0{,}42 \times 10^{-3}$
	velmi netěsná	$0{,}13 \times 10^{-2}$
vnitřní a schodištní stěny (včetně trhlin v konstrukci, avšak nikoliv netěsnosti kolem oken a dveří)	těsná	$0{,}14 \times 10^{-4}$
	průměrná	$0{,}11 \times 10^{-3}$
	netěsná	$0{,}35 \times 10^{-3}$
stěny výtahové šachty (včetně trhlin v konstrukci, avšak nikoliv netěsnostmi kolem oken a dveří)	těsná	$0{,}18 \times 10^{-3}$
	průměrná	$0{,}84 \times 10^{-3}$
	netěsná	$0{,}18 \times 10^{-2}$

Tabulka A.6 – Hodnoty úniku vzduchu stropy

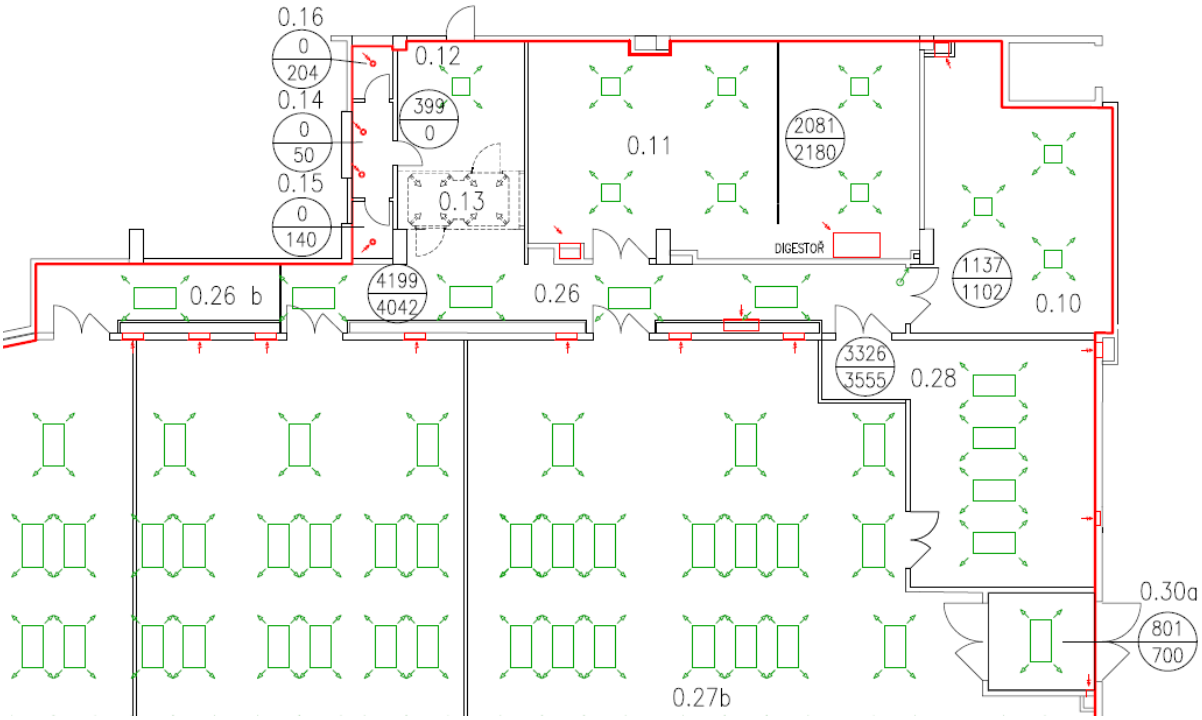
Konstrukční prvek	Nepropustnost stěny	Poměr plochy stěny A_{LF}/A_{Floor}
stropy (včetně trhlin v konstrukci a trhlin kolem prostupů)	průměrná	$0{,}52 \times 10^{-4}$

Vypočtené množství odváděného vzduchu je uvedeno v následující Tabulce 11 k porovnání s navrženými hodnotami dle poskytnuté projektové dokumentace.

Tabulka 11 – Množství přiváděného a odváděného vzduchu dle výpočtu a projektové dokumentace

		Vypočtený stav		**Návrh dle PD**	
Číslo místnosti	**Název místnosti**	**Přívod vzduchu**	**Odvod vzduchu**	**Přívod vzduchu**	**Odvod vzduchu**
[-]	**[-]**	**[m³/h]**	**[m³/h]**	**[m³/h]**	**[m³/h]**
0.10	**Čistý sklad L4**	1137	1102	1200	1100
0.11	**Laserová laboratoř L3**	2081	2180	2200	2000
0.12	**R filtr**	399	0	400	0
0.26+0.26b	**Chodba**	4199	4042	4500	4000
0.28	**Metrologie**	3326	3555	3500	3200
0.30a	**Materiálová propusť**	801	700	800	700
Celkem zařízení VZT č. 6		**11943**	**11579**	**12600**	**11000**
Odvod vzduchu přes 0.15 a 0.16		0	394	0	400

Z výsledků je patrné, že skutečné množství přiváděného i odváděného vzduchu se od navrženého stavu liší. Důvodem je rozdílná skutečná výměna vzduchu a jiné tlakové poměry oproti návrhu, kde se uvažoval rozdíl 10 Pa pro třídu čistoty ISO 8 a 20 Pa pro třídu čistoty ISO 7 vzhledem k běžným prostorám. Významnou roli v odlišnostech hraje především také obtížné stanovení plochy netěsností při návrhu systému, které je možné určit pouze jako předpokládanou hodnotu, ale ve skutečnosti se může značně lišit. Tlaková kaskáda čistého prostoru způsobila, že v místnosti metrologie a laboratoře L3 je možné vzduchotechnickým systémem odvádět více vzduchu než přivádět pro zajištění požadovaného přetlaku. Je to způsobeno vysokým tlakovým rozdílem mezi přilehlými místnostmi, z kterých se do výše zmíněných prostor dostává více vzduchu, než je odváděno netěsnostmi. Bilance přívodního a odvodního vzduchu jsou také uvedeny na Obrázku 11.



Obrázek 11 – Schéma koncových prvků VZT a navržení množství odváděného a přiváděného vzduchu pro jednotlivé místnosti

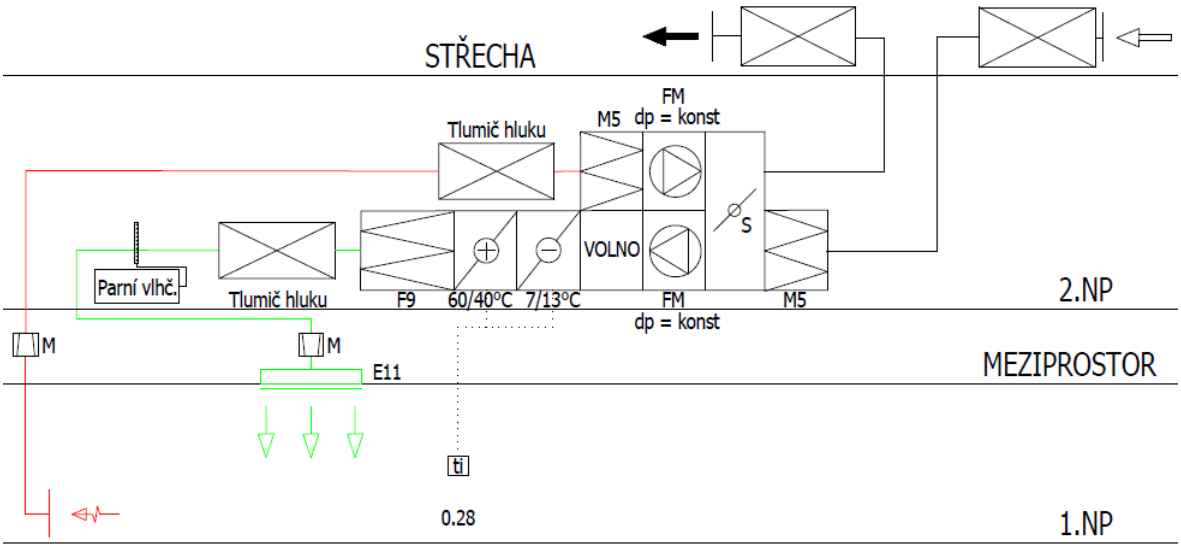
2.5.3.3 Vzduchotechnická jednotka

Vzduchotechnická jednotka umožňuje směšování venkovního vzduchu s cirkulačním, chlazení a ohřev přiváděného vzduchu. Zároveň jednotka zajišťuje první dva stupně filtrace pomocí instalovaných filtrů třídy M5 a F9. Konečný, třetí stupeň filtrace, je zajištěn filtry E11 instalovanými v přívodních prvcích v místnosti. Vzduch odváděný z místností je před

vstupem do směšovací komory čištěn filtrem třídy M5. Přívodní i odvodní ventilátor je vybaven frekvenčním měničem.

Zvlhčování je zajišťováno pomocí externě instalovaného vyvíječe páry, který je umístěn ve strojovně vzduchotechniky vedle jednotky a pomocí distribuční trubice umístěné v potrubí zvyšuje vlhkost přiváděného vzduchu na požadovanou hodnotu. Celkový instalovaný výkon zvlhčování je 15 kg/h.

Jednotka je vybavena dvěma vodními výměníky, které zajišťují chlazení, resp. ohřev přiváděného vzduchu. Instalovaný celkový výkon chlazení je 84 kW a ohřevu 37 kW. Průtok topné a chladící vody je dle informací možné ještě zvýšit. Zdrojem chladu jsou dvě vodou chlazené kompresorové jednotky a zdrojem tepla je plynový kondenzační kotel. Teplota přívodního vzduchu je řízena podle teplotního čidla v místnosti metrologie.



Obrázek 12 – Schéma VZT jednotky

2.5.3.4 Potrubí

Ležaté potrubí je vedeno v podhledu nebo ve stropním meziprostoru nad laserovou halou. Stoupací potrubí je vedeno v instalačních šachtách. Rozvody jsou z čtyřhranného potrubí nebo kruhového potrubí spiro z pozinkovaného plechu a jsou izolovány lamelovým pásem z minerální plsti s povrchovou úpravou z hliníkové folie. Napojení přívodních a odvodních prvků na hlavní rozvod je pomocí izolovaných ohebných hadic. Z důvodu zamezení pronikání hluku z ventilátorů do místností jsou v potrubí navrženy tlumiče hluku.

2.5.3.5 Přívodní a odvodní prvky

Upravený vzduch je do místností přiváděn čistými nástavci s filtry třídy E11. Přední část čistých nástavců je opatřena děrovaným plechem s volnou plochou 40 % celkové plochy prvku. V místnostech metrologie, materiálové propusti a v chodbě jsou čisté nástavce velikosti 1200 x 600 mm s filtry odpovídající velikosti, zatímco v ostatních místnostech jsou nástavce velikosti 500 x 500 mm. Odvodní prvky jsou umístěny u podlahy na stěnách. Vzduch z hygienického příslušenství je odváděn pomocí talířových ventilů umístěných v podhledu. Přívod vzduchu do těchto místností je zajištěn skrz dveřní mřížky.

2.5.3.6 Regulace

Vzduchotechnická jednotka s ventilátory s frekvenčními měniči je řízena podle konstantního tlaku v potrubí. Systém byl navržen tak, aby byly dodrženy požadované parametry v místnosti metrologie, takže v ostatních místnostech není možné 100% garantovat požadované parametry tepelně-vlhkostního prostředí a ty jsou závislé na aktuální tepelné zátěži. V průběhu provozování systému vyšlo najevo, že vysoká tepelná zátěž v místnosti metrologie a s tím spojená nutnost chlazení způsobuje příliš nízké teploty v ostatních místnostech. Z tohoto důvodu bylo v místnosti L3, která slouží jako laserová laboratoř a je využívána z ostatních místností nejvíce, instalováno teplotní čidlo. Toto čidlo, stejně jako čidlo v místnosti metrologie podává řídícímu systému informaci o aktuální teplotě v místnosti a systém tuto teplotu vyhodnotí a podle toho upraví teplotu přívodního vzduchu. Aby mohl systém vyhodnotit informace získané z obou čidel, bylo nutné pro každé čidlo stanovit váhu rozhodování. Pro místnost L3 je aktuálně pracovníkem zodpovědným za obsluhu systému nastavena váha na 60 % hodnoty a pro místnost metrologie je nastavena váha na 40 %. Vyšší váha pro místnost L3 byla zvolena z toho důvodu, že v místnosti je v porovnání s místností metrologie nižší tepelná zátěž a ze zkušeností bylo zjištěno, že teplota v místnosti L3 je v případě opačného nastavení příliš nízká a uživatelé si stěžují na snížený tepelný komfort. Toto váhové rozdělení je možné pracovníkem obsluhy systému kdykoliv změnit podle aktuální potřeby.

Po diskuzi s pracovníkem obsluhy bylo dále zjištěno, že teplota v místnostech je udržována na 22 °C v průběhu celého roku a nikoli na 20 °C, jak udává poskytnutá projektová dokumentace. Toto zvýšení vnitřní teploty umožňuje při zachování stejné teploty

přívodního vzduchu odvod vyšší tepelné zátěže z prostoru. Relativní vlhkost je v zimním období udržována pomocí zvlhčování většinou kolem 40 % a v letním období je vlhkost vyšší. Velmi často je hodnota vlhkosti řízena podle aktuálních požadavků uživatelů laboratoří, kteří pracují s technologiemi, které by vyšší vlhkost a s tím spojené riziko kondenzace mohlo ohrozit.

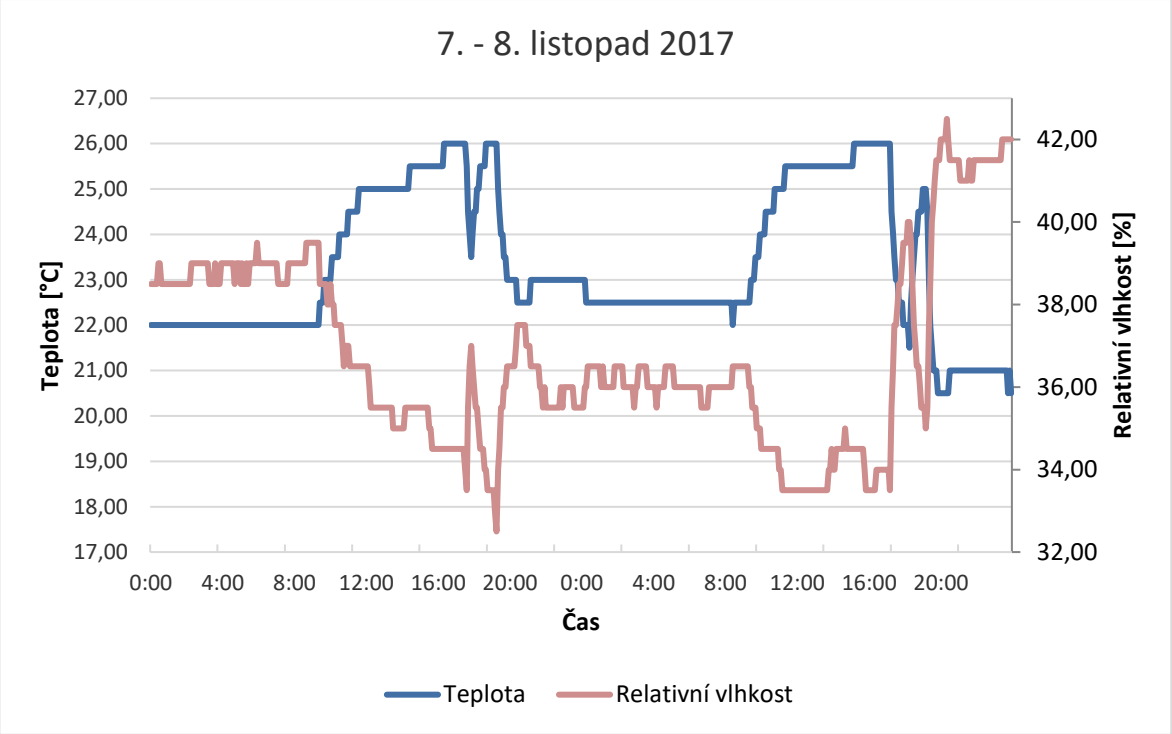
2.6 Monitorování, údržba a plánované rekonstrukce

2.6.1 Monitorování

Monitorování koncentrace částic v čistém prostoru probíhá téměř nepřetržitě. Nicméně k dispozici je pouze jeden čítač částic, který je nutné přenášet mezi jednotlivými místnostmi, a v jeden okamžik tak probíhá měření pouze v jednom místě. Z poskytnutých naměřených hodnot v místnosti L4 z období 06.05.2017 – 26.07.2017 vyplývá, že naměřené koncentrace částic dosahují velmi nízkých hodnot, které splňují požadovaný limit pro třídu čistoty ISO 7 dle ČSN EN 14644-1. Vzhledem k tomu, že naměřené hodnoty jsou velmi nízké ve srovnání s povolenými limity, je možné předpokládat, že místnost L4 by teoreticky mohla splnit i kritéria pro třídu čistoty ISO 6. Nízké koncentrace částic ve srovnání s limity pro třídu čistoty ISO 7 byly zaznamenány i v ostatních místnostech.

Dále je v místnostech podle potřeby monitorována teplota a relativní vlhkost. Poskytnuté výsledky monitorování místnosti L4 z období 03.11.2017 – 14.11.2017 ukázaly, že v tomto období vnitřní teplota v místnosti velmi často překračovala požadovanou hodnotu 22 °C. Místnost byla v tomto období denně využívána jako laboratoř a byly zde instalovány laserové technologie. Oproti běžnému stavu se tedy zvýšila obsazenost prostoru osobami a hlavně, jak vyplývá z naměřených hodnot teploty, se významně zvýšila tepelná zátěž prostoru. Pro ukázku průběhu teploty v místnosti L4 byly vybrány hodnoty z období 7. - 8. listopadu 2017, kdy teploty dosahovaly nejvyšších hodnot. V Grafu 1 je kromě teploty znázorněn i průběh relativní vlhkosti.

Graf 1 – Průběh teploty a relativní vlhkosti v místnosti L4 získaný z dlouhodobého monitorování



Z výše uvedeného grafu vyplývá, že jakmile místnost začala být využívána a laserové technologie byly uvedeny do provozu, teplota v místnosti začala stoupat. Instalovaný vzduchotechnický systém nebyl schopný udržet požadovanou teplotu, protože tepelná zátěž prostoru byla příliš vysoká. Maximální hodnoty teploty dosahovaly 26 °C a pro uživatele s ohledem na jejich práci i použitý oděv musely být značně nekomfortní. Během nočních hodin byla teplota konstantní na 22 °C nebo na hodnotě podle toho, zda byly v místnosti v provozu některé technologie i přes noc.

S rostoucí teplotou se samozřejmě snižovala relativní vlhkost, protože v místnosti nebyly kromě osob další zdroje vlhkosti, které by vlhkost výrazně zvyšovaly. Zatímco v noci relativní vlhkost v prostoru dosahovala 40 %, během provozu byla snížena až k hodnotě 32 %, která je považována již za velmi nízkou pro pobyt osob a zdaleka ne ideální. Instalované parní zvlhčování nebylo podle získaných informací příliš používáno, protože pracovníci požadovali takto nízké hodnoty z důvodu provozu laserových technologií a omezení rizika kondenzace na neizolovaných pomocných systémech např. chlazení.

2.6.2 Úklid a údržba čistého prostoru

Jednorázové bezprašné utěrky vlhčené demineralizovanou vodou jsou používány pro setření podlahy čistého prostoru, otření odtahů klimatizace a klik u dveří. Dále jsou během úklidu strženy jednorázové rohože před vstupem do jednotlivých laboratoří, vyneseny koše a vytřeny botníky v prostoru před personální propustí (R filtr). Tento úklid probíhá dle stanoveného rozpisu s minimální četností podle Tabulky 12. Jednou za měsíc jsou v místnosti materiálové propusti a R filtru otřeny stěny a stropy a jednou za půl roku jsou stěny a stropy otřeny v celém čistém prostoru za vzduchovou sprchou.

Tabulka 12 – Četnost úklidu jednotlivých místností čistého prostoru

Číslo místnosti	**Název místnosti**	**Četnost**
[-]	**[-]**	**[-]**
0.10	**Čistý sklad L4**	3 x týdně
0.11	**Laserová laboratoř L3**	1 x týdně
0.12	**R filtr**	5 x týdně
0.26+0.26b	**Chodba**	5 x týdně
0.27a	**L1**	2 x týdně
0.27b	**L2**	2 x týdně
0.28	**Metrologie**	2 x týdně
0.30a	**Materiálová propusť**	1 x týdně

Pro zajištění požadované třídy čistoty a správný chod vzduchotechnického systému je nezbytná pravidelná výměna filtrů. Podle poskytnutých informací jsou filtry třídy M5 měněny 1 x za 3 měsíce, filtry třídy F9 1 x za rok a filtry třídy E11 ještě nebyly od začátku provozu v roce 2014 vyměněny. Systém je vybaven měřením tlakové ztráty na filtrech, a podle toho je možné určit zanesenost filtru a nutnost jeho výměny.

2.6.3 Plánované opravy a rekonstrukce

V budoucnosti se uvažuje o přesunutí vzduchotechnických jednotek ze strojovny vzduchotechniky na střechu objektu a tím umožnění vytvoření další laboratoře v místnosti stávající strojovny. V případě přesunutí jednotek by se uvažovalo o přidání odvlhčovacího zařízení zejména do hlavní jednotky zajišťující primární úpravu vzduchu pro místnosti L1 a L2, které by umožnilo přesné dodržování požadované relativní vlhkosti v těchto místnostech v průběhu celého roku.

2.7 Průzkum

Přesné zachycení stávajícího stavu čistého skladu a přilehlých prostor vyžadovalo provedení průzkumu, který byl rozdělen do několika částí. Nejdříve byly tyto prostory podrobeny prohlídce na místě a bylo zjištěno stávající umístění vybavení a pracovních míst pro rozmístění měřících bodů. Samotné měření bylo z důvodu časové náročnosti, množství přístrojů a odlišné metodice rozděleno do tří etap. V první části bylo provedeno měření koncentrace částic, v druhé byl měřen tepelný komfort a poslední část obsahovala subjektivní hodnocení tepelného komfortu pomocí dotazníků. Naměřené hodnoty a odpovědi z dotazníků jsou k dispozici na CD, které je přiloženo k této práci.

2.7.1 Měření koncentrace částic

2.7.1.1 Cíl měření

Cílem tohoto měření je zjistit koncentraci částic v místnostech L3, L4, metrologii a v chodbě dle ČSN EN ISO 14644-1 a dle této normy stanovit klasifikaci třídy čistoty těchto prostor. Měření slouží k ověření stávající třídy čistoty, zachycení případných problémových míst a posouzení schopnosti stávajícího vzduchotechnického systému udržet požadované podmínky čistoty prostředí.

2.7.1.2 Metodika měření

Pro měření koncentrace částic a jeho vyhodnocení bylo nejdříve nutné určit návrhovou třídu čistoty prostoru, funkční stav prostoru, ve kterém bude měření provedeno a velikost měřených částic, podle kterých bude posouzena třída čistoty. Následně bylo nutné stanovit počet a umístění měřících bodů a objem měřícího vzorku vzduchu.

Měření a následné posouzení bylo provedeno pro výše zmíněné místnosti, jejichž prostředí je zajišťováno společnou vzduchotechnickou jednotkou. Na tuto vzduchotechnickou jednotku je dále ještě napojen čistý prostor šatny před personální propustí a materiálová propusť, které ale byly z měření vyjmuty. Ověření třídy čistoty prostoru laserových laboratoří L1 a L2 nebylo předmětem tohoto měření, protože uvedené místnosti mají vlastní vzduchotechnický systém. Z dlouhodobého monitorování je známo, že tyto místnosti splňují parametry třídy čistoty ISO 7.

V případě analyzovaných prostor bylo zvoleno posouzení podle třídy čistoty ISO 7, na kterou byly validovány. Výsledky dlouhodobého monitorování ukazují, že tuto třídu čistoty by měly splňovat i během provozu a dokonce z některých měření vyplývá, že prostory by mohly splňovat i podmínky pro třídu ISO 6. Posouzení místností podle třídy ISO 6 bylo vyhodnoceno jako nevhodné, protože vyšší třída čistoty by vyžadovala stanovení vyššího objemu měřícího vzduchu, a tedy i několikanásobně delší dobu měření, které by nebylo s použitým přístrojem proveditelné během jednoho dne.

Posuzované místnosti jsou měřeny podle ISO 14644-1 v tzv. „provozním stavu“ běžného pracovního dne, kdy jsou prostory využívány pracovníky. Měřená a posuzovaná velikosti částic byla stanovena podle schopnosti použitého přístroje měřit velikosti částic a z těchto hodnot byly vybrány velikosti podle ISO 146441-1 jako 0,3 μm, 0,5 μm, 1,0 μm a 5,0 μm. Následně bylo nutné stanovit množství vzduchu, ve kterém bude koncentrace částic měřena. Pro stanovení minimálního objemu vzduchu bylo nutné použít níže uvedený vzorec (3). Za $C_{n,m}$ je dosazena limitní koncentrace částic pro největší měřenou velikost částic (=5,0 μm) pro třídu čistoty ISO 7.

$$V_s = \frac{20}{C_{n,m}} \cdot 1000\ [l] \tag{3}$$

$$V_s = \frac{20}{2930} \cdot 1000 = 6{,}826\ l$$

Navržený objem vzduchu:

$$V_{s1} = 6{,}84\ l \geq 6{,}826\ l \Rightarrow OK$$

Při udávaném průtoku vzduchu přístrojem rychlostí 2,83 l/min trvá měření jednoho vzorku vzduchu o navrženém objemu 145 s a tento čas splňuje požadavek na minimální dobu měření dle ISO 14644-1. Vzhledem k posuzované stejné třídě čistoty ve všech místnostech je navržený objem vzduchu i doba trvání jednoho měření ve všech místnostech stejná. Pro vyloučení vlivu nežádoucích jevů na měření a zajištění dosažení kvalitních výsledků bylo měření v jednom měřícím bodě provedeno vždy třikrát.

Stanovení počtu měřících bodů bylo provedeno podle půdorysné plochy čistého prostoru místnosti podle ČSN EN 14644-1 a počty bodů jsou uvedeny v Tabulce 13.

Tabulka 13 – Stanovení počtu měřících bodů

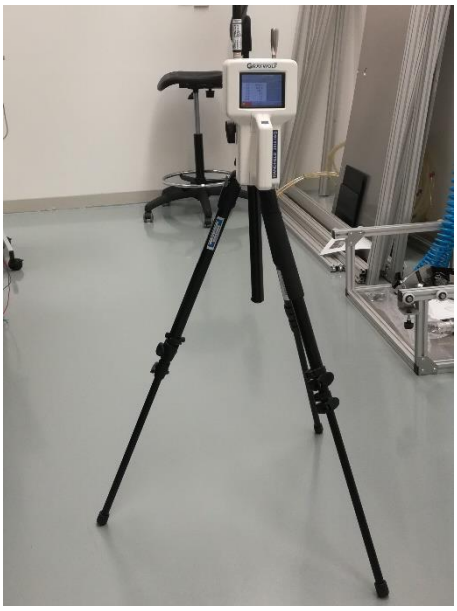
Místnost	Plocha	Minimální počet měřících bodů	Skutečný počet měřících bodů
[-]	[m^2]	[-]	[-]
L3	68,5	14	15
L4	38,6	10	10
Metrologie	37	10	10
Chodba	34,75	9	9

Měřící body byly rovnoměrně rozmístěny po ploše místnosti, aby co nejlépe reprezentovaly měřený prostor. Schéma rozmístění měřících bodů je v části 2.7.1.5. V místnosti L3 byl počet měřících bodů z důvodu geometrie prostoru navýšen z 14 na 15 bodů.

Měřící přístroj kromě koncentrace částic zaznamenával i teplotu vzduchu a relativní vlhkost v každém bodě měření. Naměřené hodnoty těchto veličin nebyly pro vyhodnocení použity, protože jsou znovu měřeny při měření tepelného komfortu. Měření koncentrace částic probíhalo během jednoho pracovního dne za běžného provozu a z důvodu měření nebyl omezen provoz v měřených místnostech ani nedošlo k posunu stálého vybavení a přístrojů.

2.7.1.3 Použité přístroje

Pro měření byl použit přenosný čítač částic Lighthouse 3100 IAQ s platnou kalibrací (Obrázek 13). Tento přístroj umožňuje měřit částice o velikosti 0,3 μm, 0,5 μm, 1,0 μm, 2,5 μm, 5,0 μm a 10,0 μm a to v kumulativním i diferenčním režimu. Přístroj měří částice ve vzorku vzduchu s objemovým průtokem o velikosti 2,83 l/min. Do přístroje je před začátkem měření nutné zadat potřebnou dobu měření nebo měřený objem vzduchu, počet cyklů měření v jednom bodě, prodlevu před začátkem samotného měření a mezi jednotlivými cykly. Po provedení měření přístroj přepočítá koncentraci částic podle změřeného objemu vzduchu na koncentraci částic v 1 m^3, která slouží jako referenční hodnota pro následné porovnávání s limitními normovými hodnotami. Použitý přístroj umožňuje měřit pomocí přídavného čidla i teplotu vzduchu a relativní vlhkost. Měření koncentrace částic, teploty i relativní vlhkosti bylo provedeno ve výšce 1,1 metru.



Obrázek 13 – Přenosný čítač částic

2.7.1.4 Postup měření

V čítači částic byl nastaven objem měřicího vzorku vzduchu na hodnotu 6,84 litru a počet cyklů v jednom měřícím bodě byl nastaven na tři. Před započetím měření byla nastavena prodleva 10 s, aby bylo možné od přístroje odstoupit do dostatečné vzdálenosti a měření nebylo ovlivněno. Prodleva mezi jednotlivými cykly byla nastavena na 5 s.

Podle stanoveného plánu umístění měřících bodů byly postupně naměřeny všechny body po 3 cyklech. Nejdříve bylo provedeno měření v místnosti L3, poté v místnosti metrologie, v chodbě a nakonec v prostoru L4. Během měření byly zaznamenány všechny rušivé vlivy, které by mohly ovlivnit naměřené hodnoty.

2.7.1.5 Výsledky měření a diskuze

Po dokončení měření všech bodů byly výsledky z přístroje exportovány do MS Excel a vyhodnoceny. Pro potřeby posouzení třídy čistoty byly naměřené hodnoty z přístroje získány v režimu kumulativní koncentrace částic a tyto hodnoty jsou používány ve všech částech vyhodnocení. Z jednotlivých cyklů měření v jednom bodě byl spočítán aritmetický průměr a tyto hodnoty byly porovnávány s limitními hodnotami koncentrace částic pro jednotlivé velikosti částic podle níže uvedené Tabulky 14 z ISO 14644-1. Posuzovaný čistý

prostor splňuje klasifikaci dle požadované třídy ISO ve chvíli, kdy průměrné hodnoty ve všech bodech měření splňují požadavek limitní koncentrace částic.

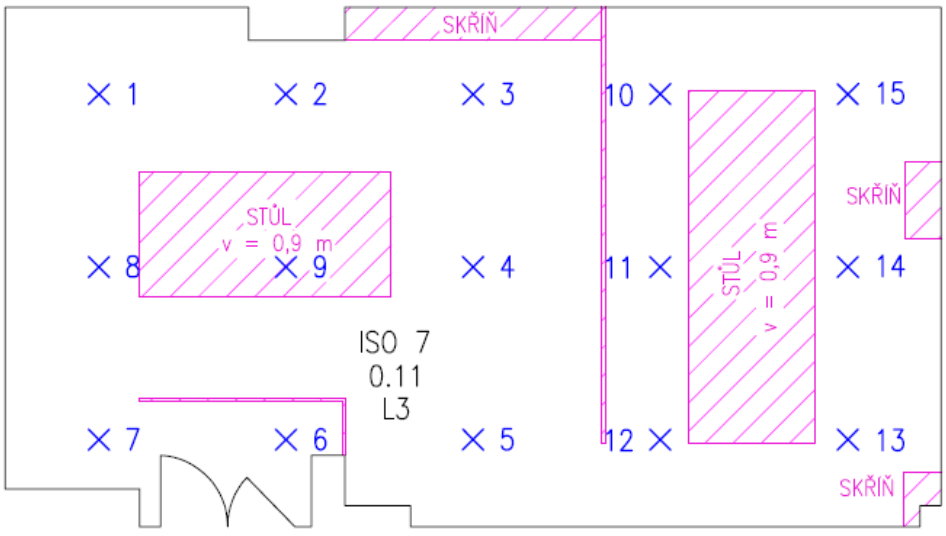
Tabulka 14 – Maximální povolené kumulativní koncentrace částic/m^3 dle ISO 14644-1 [3]

ISO Class number (*N*)	Maximum allowable concentrations (particles/m^3) for particles equal to and greater than the considered sizes, shown below[a]					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
1	*10*[b]	d	d	d	d	e
2	100	*24*[b]	*10*[b]	d	d	e
3	1 000	237	102	*35*[b]	d	e
4	10 000	2 370	1 020	352	*83*[b]	e
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	d, e, f
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
9g	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

Během analýzy výsledků bylo zjištěno, že u několika bodů při opakování měření přístroj vyhodnotil koncentraci částic jako nulovou pro všechny velikosti částic. Předpokladem tohoto výsledku je nespecifikovaná chyba přístroje, který mohl z různých důvodů vyhodnotit, že měření není platné a zaznamenat tak nulové hodnoty. Vzhledem k malé četnosti výskytu a absenci tohoto problému ve všech cyklech měření v jednom bodě, nebyla ohrožena platnost výsledků měření. Tyto výsledky jsou označeny v tabulce hvězdičkou a z analýzy byly vyjmuty a nebyly zahrnuty do výpočtu aritmetického průměru.

A) Místnost L3 – Laserová laboratoř

Datum a čas měření: 08.března 2018 09:15:30 – 11:19:42



Obrázek 14 – Schéma umístění měřících bodů v místnosti L3

Tabulka 15 – Výsledky měření v místnosti L3 (kumulativní hodnoty)

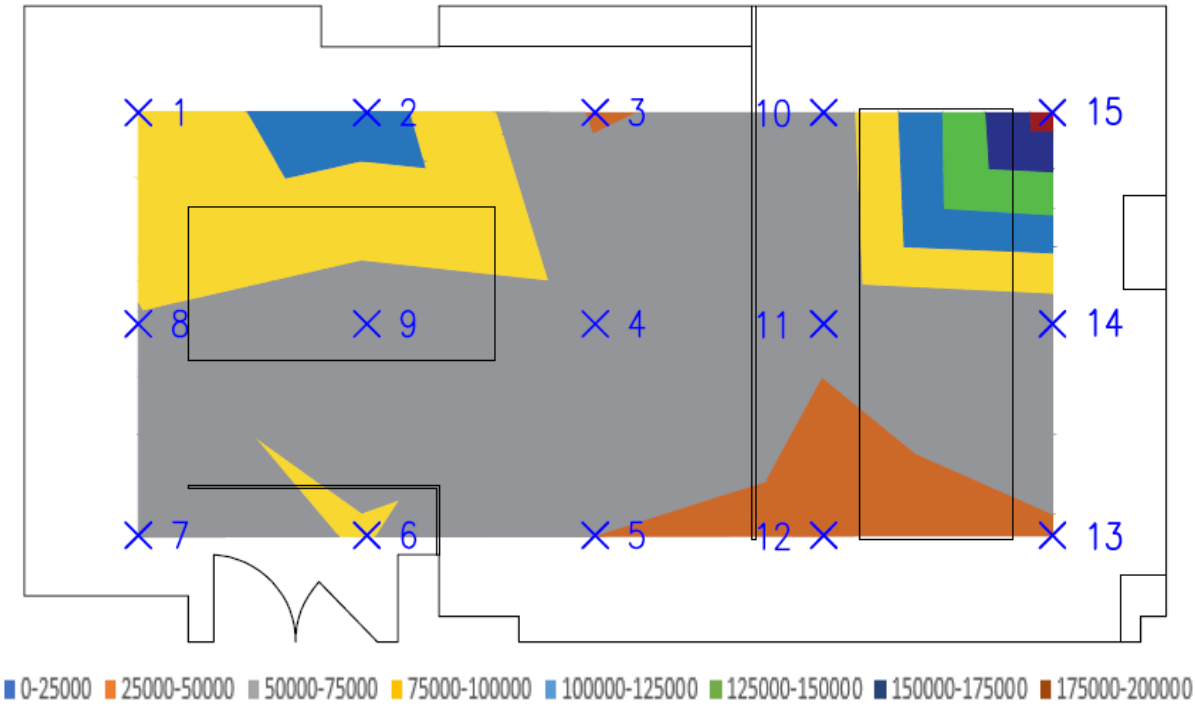
Číslo bodu	Číslo vzorku měření	0,3 µm	Průměr 0,3 µm	0,5 µm	Průměr 0,5 µm	1,0 µm	Průměr 1,0 µm	5,0 µm	Průměr 5,0 µm	Vyhodnocení
[-]	[-]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[-]
1	1	85 485,8	87 093,3	9 644,6	9 060,0	3 507,1	2 386,8	1 169,0	584,5	**Splňuje**
	2	84 316,8		9 060,0		2 045,8		146,1		
	3	91 477,2		8 475,5		1 607,4		438,4		
2	1	132 393,5	112 958,2	9 352,3	9 108,7	1 315,2	1 266,5	0,0	146,1	**Splňuje**
	2	96 153,3		9 206,2		2 045,8		438,4		
	3	110 327,9		8 767,8		438,4		0,0		
3	1	42 523,7	47 784,4	3 068,7	4 286,5	146,1	730,6	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	52 314,4		4 530,0		1 022,9		0,0		
	3	48 515,0		5 260,7		1 022,9		0,0		
4	1	70 580,6	66 489,0	4 822,3	5 747,8	438,4	974,2	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	61 082,2		6 137,4		1 169,0		0,0		
	3	67 804,2		6 283,6		1 315,2		0,0		
5	1	47 053,7	49 878,9	3 507,1	4 042,9	730,6	633,2	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	50 853,1		4 091,6		438,4		0,0		
	3	51 729,9		4 530,0		730,6		0,0		
6	1	67 658,0	76 766,8	7 452,6	9 790,7	1 607,4	3 214,9	0,0	243,5	**Splňuje**
	2	81 832,6		13 005,5		4 383,9		584,5		
	3	80 809,7		8 913,9		3 653,2		146,1		
7	1	61 959,0	59 767,0	7 598,7	6 332,3	2 484,2	1 558,7	584,5	292,3	**Splňuje**
	2	57 721,2		5 845,2		1 022,9		0,0		
	3	59 620,9		5 552,9		1 169,0		292,3		
8	1	71 603,5	73 016,1	6 868,1	7 111,6	2 484,2	1 948,4	292,3	146,1	**Splňuje**
	2	75 402,9		7 452,6		1 753,6		0,0		
	3	72 041,9		7 014,2		1 607,4		146,1		
9	1	55 675,4	60 302,8	4 383,9	7 501,3	730,6	3 312,3	0,0	584,5	**Splňuje**
	2	57 282,8		4 968,4		1 315,2		0,0		
	3	67 950,3		13 151,7		7 891,0		1 753,6		
10	1	58 305,7	57 331,5	7 891,0	7 257,8	2 630,3	1 802,3	730,6	341,0	**Splňuje**
	2	53 775,7		6 722,0		1 461,3		292,3		
	3	59 913,2		7 160,4		1 315,2		0,0		
11	1	48 515,0	51 876,0	5 699,1	6 137,4	1 315,2	1 704,8	292,3	292,3	**Splňuje**
	2	46 615,4		5 114,5		1 461,3		292,3		
	3	60 497,7		7 598,7		2 338,1		292,3		
12	1	46 469,2	44 472,1	5 114,5	4 968,4	1 022,9	1 071,6	438,4	194,8	**Splňuje**
	2	43 254,4		5 699,1		1 169,0		146,1		
	3	43 692,8		4 091,6		1 022,9		0,0		
13	1	59 328,6	49 050,9	5 552,9	5 163,2	2 045,8	1 510,0	292,3	146,1	**Splňuje**
	2	44 423,4		5 406,8		1 169,0		146,1		
	3	43 400,5		4 530,0		1 315,2		0,0		
14	1	70 580,6	58 354,4	8 037,1	6 088,7	2 045,8	1 315,2	0,0	97,4	**Splňuje**
	2	53 191,2		5 260,7		1 022,9		292,3		
	3	51 291,5		4 968,4		876,8		0,0		
15	1	158 550,7	188 020,2	12 274,9	16 707,5	3 361,0	3 020,0	730,6	389,7	**Splňuje**
	2	209 842,2		19 581,4		2 630,3		292,3		
	3	195 667,6		18 266,2		3 068,7		146,1		
Průměr		72 210,8		7 287,0		1 763,3		230,6		**Splňuje ISO 7**
Maximum		209 842,2		19 581,4		7 891,0		1 753,6		
Minimum		42 523,7		3 068,7		146,1		0,0		
Směrodatná odchylka		36 798,7		3 456,0		1 318,6		346,2		

Nejvyšší koncentrace částic ≥0,3 μm byla v místnosti naměřena v bodě č. 15. Naměřená hodnota je více než dvojnásobkem průměru hodnot naměřených v této místnosti, a i v ostatních velikostech částic tento měřící bod značně překračuje průměr. Měřící bod se nachází dle výše uvedeného Obrázku 14 v rohu místnosti v nejvzdálenějším místě od jediného odvodního prvku vzduchotechnického systému a vzhledem k jeho umístění lze předpokládat, že proudění vzduchu v tomto místě nebude dostatečné natolik, aby z oblasti rohu byly nečistoty prouděním vymývány. Vysoké hodnoty koncentrace částic byly naměřeny i v bodě 1 a 2, v jejichž blízkosti jsou uskladněny pomocné konstrukce a materiály, které mohou být zdrojem nečistot.

Vyšší hodnoty naměřené v bodě 6 jsou pravděpodobně způsobeny tím, že měřící bod se nachází v blízkosti vstupu do místnosti, a protože je místnost L3 udržovaná vzhledem k přilehlé chodbě v podtlaku, případné nečistoty mohou dveřmi vnikat do místnosti. Situaci může zhoršovat i instalovaná posuvná látková oddělovací stěna, která je umístěna těsně před vstupem, protože může negativně ovlivňovat proudění vzduchu směrem k odvodní vyústce.

Průměrné hodnoty kumulativní koncentrace částic jednotlivých velikostí v měřeném prostoru nedosahují více než 8 % limitu koncentrace dle třídy ISO 7 a maximální hodnoty dosahují nejvýše 60 % této limitní koncentrace. Ve všech měřících bodech tedy byly naměřené koncentrace částic menší než jejich limitní hodnoty pro třídu čistoty ISO 7 a výsledky potvrzují, že místnost L3 splňuje podmínky pro klasifikaci třídy ISO 7 dle ČSN EN ISO 14644-1.

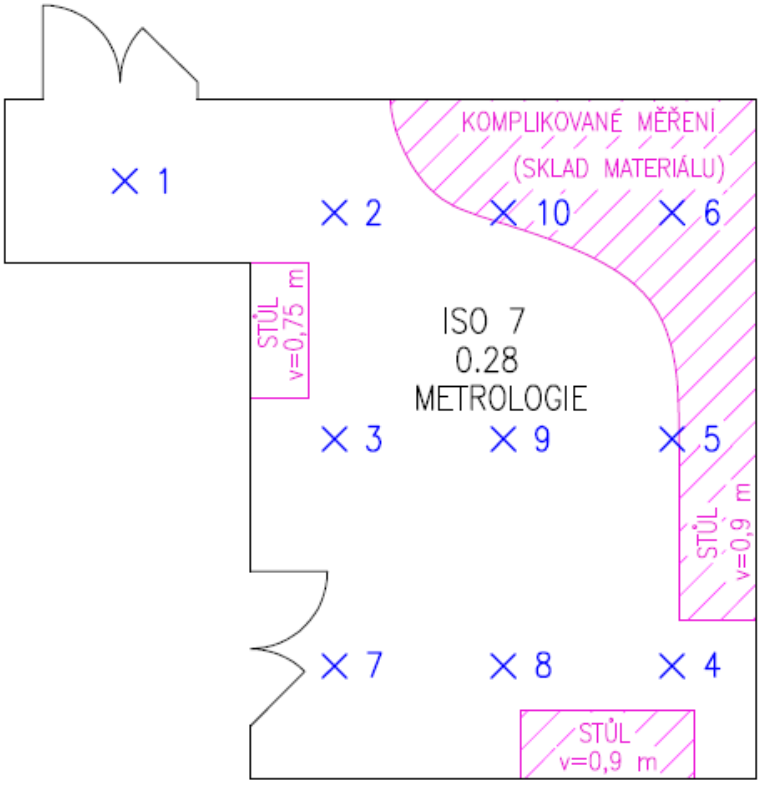
Výsledky měření pro koncentraci částic ≥0,3 μm byly graficky zobrazeny a rozložení koncentrací mezi jednotlivými měřícími body v půdoryse místnosti L3 je zobrazeno na Obrázku 15. Grafické zobrazení názorně ukazuje zvýšenou koncentraci v oblasti měřícího bodu č. 15, který se nachází v rohu.



Obrázek 15 – Grafické rozložení koncentrace částic ≥0,3 µm v měřících bodech v L3

B) Místnost metrologie

Datum a čas měření: 08.března 2018 11:25:56 – 12:53:02



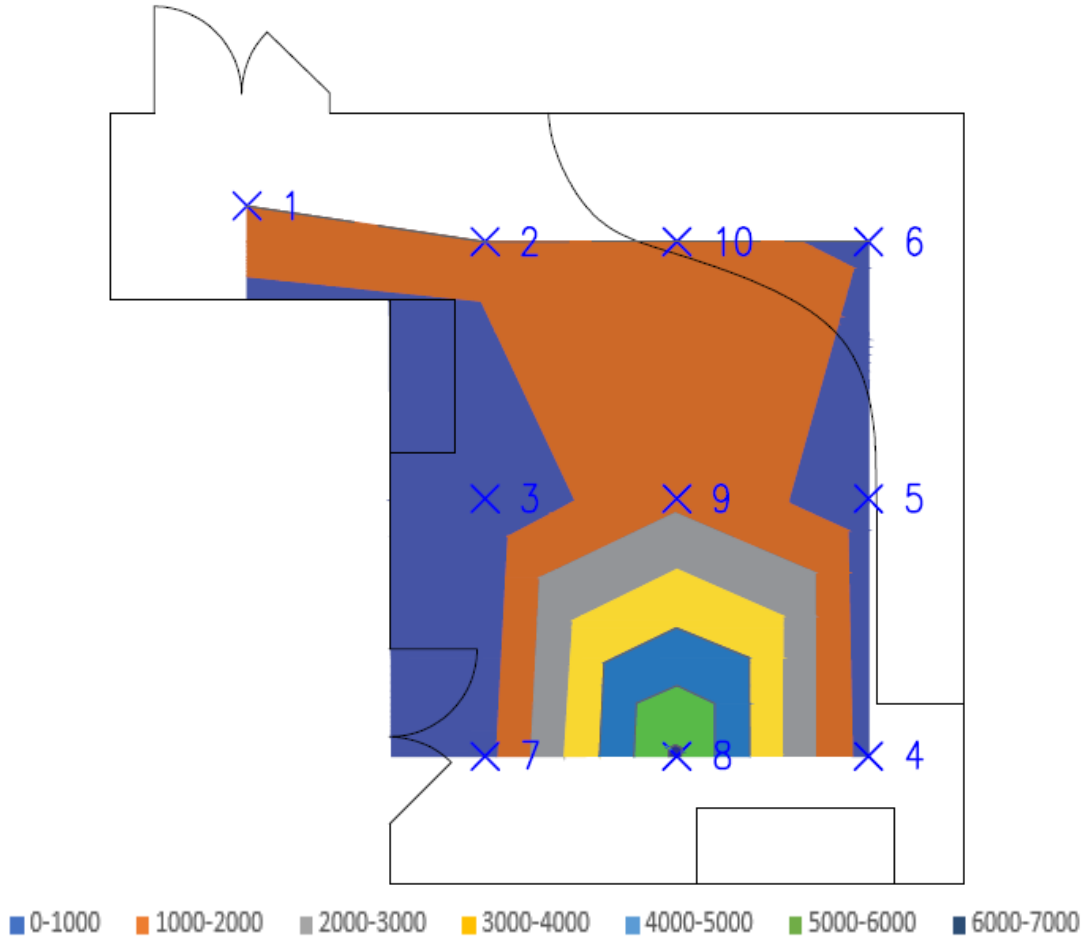
Obrázek 16 - Schéma umístění měřících bodů v místnosti metrologie

Tabulka 16 - Výsledky měření v místnosti metrologie (kumulativní hodnoty)

Číslo bodu	Číslo vzorku měření	0,3 µm	Průměr 0,3 µm	0,5 µm	Průměr 0,5 µm	1,0 µm	Průměr 1,0 µm	5,0 µm	Průměr 5,0 µm	Vyhodnocení
[-]	[-]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[-]
1	1	1 753,6	1 169,0	438,4	389,7	292,3	97,4	146,1	48,7	**Splňuje**
	2	730,6		292,3		0,0		0,0		
	3	1 022,9		438,4		0,0		0,0		
2	1	1 315,2	1 217,7	146,1	97,4	146,1	48,7	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	292,3		146,1		0,0		0,0		
	3	2 045,8		0,0		0,0		0,0		
3	1	146,1	194,8	0,0	48,7	0,0	0,0	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	146,1		146,1		0,0		0,0		
	3	292,3		0,0		0,0		0,0		
4	1	876,8	511,5	292,3	146,1	146,1	73,1	0,0	0,0	**Splňuje**
	2*	0,0*		0,0*		0,0*		0,0*		
	3	146,1		0,0		0,0		0,0		
5	1	876,8	389,7	146,1	48,7	146,1	48,7	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	146,1		0,0		0,0		0,0		
	3	146,1		0,0		0,0		0,0		
6	1	730,6	925,5	438,4	584,5	146,1	292,3	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	438,4		146,1		0,0		0,0		
	3	1 607,4		1 169,0		730,6		0,0		
7	1*	0,0*	584,5	0,0*	146,1	0,0*	146,1	0,0*	0,0	**Splňuje**
	2	584,5		146,1		146,1		0,0		
	3*	0,0*		0,0*		0,0*		0,0*		
8	1	14 759,1	6 186,2	4 530,0	1 899,7	1 022,9	438,4	146,1	97,4	**Splňuje**
	2	2 630,3		1 022,9		146,1		0,0		
	3	1 169,0		146,1		146,1		146,1		
9	1	2 922,6	1 851,0	1 753,6	828,1	730,6	487,1	0,0	97,4	**Splňuje**
	2	1 022,9		292,3		292,3		146,1		
	3	1 607,4		438,4		438,4		146,1		
10	1	2 776,5	1 169,0	1 753,6	779,4	876,8	389,7	292,3	146,1	**Splňuje**
	2	146,1		146,1		146,1		0,0		
	3	584,5		438,4		146,1		146,1		
Průměr		1 515,4		535,8		211,1		43,3		**Splňuje ISO 7**
Maximum		14 759,1		4 530,0		1 022,9		292,3		
Minimum		146,1		0,0		0,0		0,0		
Směrodatná odchylka		2 776,2		934,8		293,2		79,2		

Nejvyšší hodnoty koncentrace částic velikosti ≥0,3 µm a ≥0,5 µm byly naměřeny v bodě 8 dle Obrázku 16. V blízkosti tohoto místa seděli po celou dobu měření dva lidé, kteří mohou být značným zdrojem kontaminace prostoru, a z tohoto důvodu byla pravděpodobně naměřená hodnota několikanásobně vyšší než v jiných bodech.

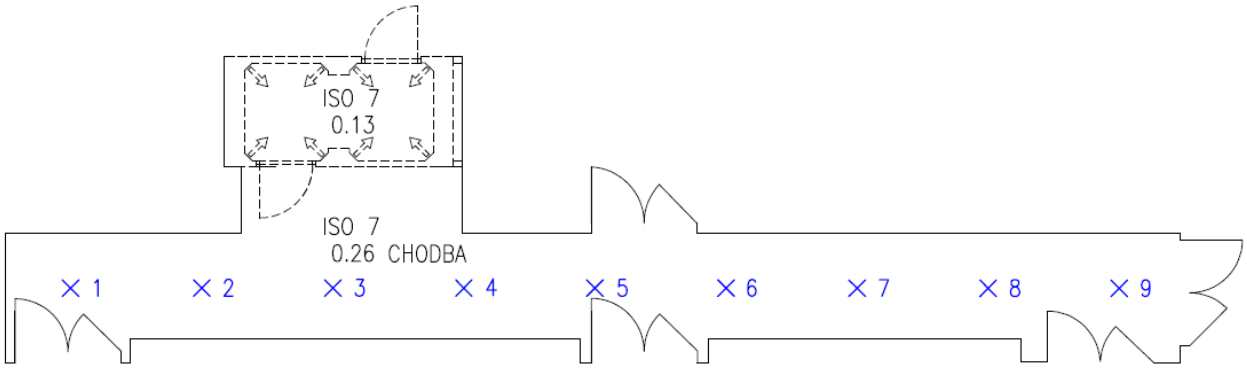
Průměrné hodnoty kumulativní koncentrace částic jednotlivých velikostí v měřeném prostoru dosahují pouze 1,5 % limitu koncentrace částic dle třídy ISO 7 a maximální hodnoty dosahují nejvýše 10 % tohoto limitu. Ve všech měřících bodech byly koncentrace částic menší než limitní hodnoty stanovené pro třídu čistoty ISO 7 a místnost metrologie splňuje podmínky pro klasifikaci třídy ISO 7 dle ČSN EN ISO 14644-1. Obrázek 17 ukazuje grafické rozložení koncentrace částic mezi jednotlivými měřícími body v půdoryse.



Obrázek 17 – Grafické rozložení koncentrace částic ≥0,3 µm v měřících bodech v metrologii

C) Chodba

Datum a čas měření: 08.března 2018 12:59:06 – 14:34:38



Obrázek 18 – Schéma umístění měřících bodů v chodbě

Tabulka 17 – Výsledky měření v chodbě (kumulativní hodnoty)

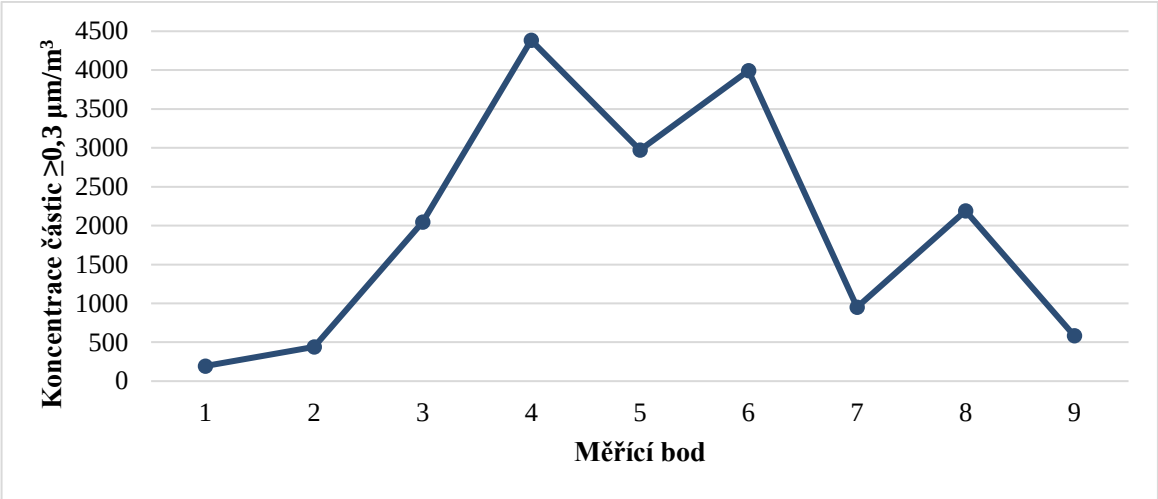
Číslo bodu	Číslo vzorku měření	0,3 µm	Průměr 0,3 µm	0,5 µm	Průměr 0,5 µm	1,0 µm	Průměr 1,0 µm	5,0 µm	Průměr 5,0 µm	Vyhodnocení
[-]	[-]	[p/m³]	[p/m³]	[p/m³]	[p/m³]	[p/m³]	[p/m³]	[p/m³]	[p/m³]	[-]
1	1	146,1	194,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Splňuje
	2	146,1		0,0		0,0		0,0		
	3	292,3		0,0		0,0		0,0		
2	1	730,6	438,4	438,4	219,2	292,3	146,1	146,1	73,1	Splňuje
	2	146,1		0,0		0,0		0,0		
	3*	0,0*		0,0*		0,0*		0,0*		
3	1	1 461,3	2 045,8	730,6	1 217,7	584,5	1 071,6	292,3	292,3	Splňuje
	2	3 068,7		2		2		584,5		
	3	1 607,4		876,8		584,5		0,0		
4	1*	0,0*	4 383,9	0,0*	2 849,5	0,0*	1 059,4	0,0*	657,6	Splňuje
	2	4 822,3		3		2		876,8		
	3	3 945,5		2		1		438,4		
5	1	1 169,0	2 971,3	584,5	974,2	292,3	438,4	0,0	146,1	Splňuje
	2	3 653,2		1		438,4		0,0		
	3	4 091,6		1		584,5		438,4		
6	1	10	3 994,2	1	487,1	146,1	97,4	0,0	0,0	Splňuje
	2	584,5		292,3		146,1		0,0		
	3	1 169,0		0,0		0,0		0,0		
7	1	292,3	949,8	0,0	73,1	0,0	0,0	0,0	0,0	Splňuje
	2*	0,0*		0,0*		0,0*		0,0*		
	3	1 607,4		146,1		0,0		0,0		
8	1	146,1	2 191,9	146,1	1 704,8	146,1	1 217,7	0,0	292,3	Splňuje
	2	6 137,4		4		3		876,8		
	3	292,3		146,1		146,1		0,0		
9	1	1 169,0	584,5	584,5	243,5	438,4	146,1	292,3	97,4	Splňuje
	2	438,4		0,0		0,0		0,0		
	3	146,1		146,1		0,0		0,0		

Číslo bodu	Číslo vzorku měření	0,3 µm	Průměr 0,3 µm	0,5 µm	Průměr 0,5 µm	1,0 µm	Průměr 1,0 µm	5,0 µm	Průměr 5,0 µm	Vyhodnocení
[-]	[-]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[-]
Průměr		1 978,8		840,2		560,2		164,4		**Splňuje ISO 7**
Maximum		10 229,1		4 822,3		3 361,0		876,8		
Minimum		146,1		0,0		0,0		0,0		
Směrodatná odchylka		2 462,6		1 225,1		929,9		280,3		

Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány převážně mezi body 3–6 (viz. Obrázek 18), které byly umístěny v nejvíce frekventovaném místě ve středu chodby před výstupem z vakuové sprchy, vstupem do šatny a vstupem do dalších dvou laboratoří. Tato oblast by mohla být považována za kritickou a v případě nedodržování předepsaných pokynů pro uživatele by koncentrace částic v tomto místě mohla značně stoupat. Výkyvy mezi jednotlivými cykly měření ve stejném bodě ukazují, jak bylo měření ovlivněno pohybem osob v blízkosti měřícího zařízení. Obecně se dá říci, že čím více osob prošlo kolem měřícího bodu, tím vyšší byla naměřená koncentrace částic v tomto bodě. Nicméně naměřené hodnoty jsou v porovnání s limitními požadavky opět velmi nízké, průměrné hodnoty v místnosti nedosahují více než 6 % limitní koncentrace dle třídy ISO 7 a maximální hodnoty dosahují nejvýše 30 % limitu. Prostor chodby splňuje podle výsledků měření podmínky pro klasifikaci třídy ISO 7 dle ČSN EN ISO 14644-1.

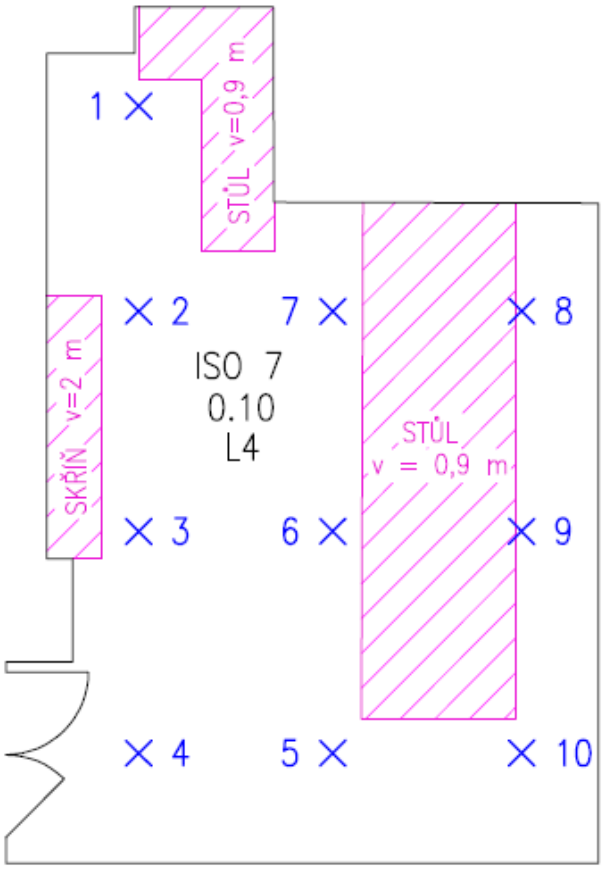
Na následujícím Grafu 2 je znázorněn průběh koncentrace částic ≥0,3 µm v jednotlivých měřících bodech po délce chodby. Je zde vidět, že nejvyšší koncentrace částic je uprostřed chodby mezi body 3–6, kde projde nejvíce osob. Oproti tomu oblast kolem bodů 1 a 9 je využívaná nižším počtem osob a tedy i naměřené hodnoty koncentrace jsou mnohem nižší než ve frekventované části chodby.

Graf 2 - Koncentrace částic ≥0,3 µm v měřících bodech v chodbě



D) Místnost L4 – Čistý sklad (budoucí optická laboratoř)

Datum a čas měření: 08.března 2018 14:38:57 – 15:58:16



Obrázek 19 - Schéma umístění měřících bodů v místnosti L4

Tabulka 18 – Výsledky měření v místnosti L4 (kumulativní hodnoty)

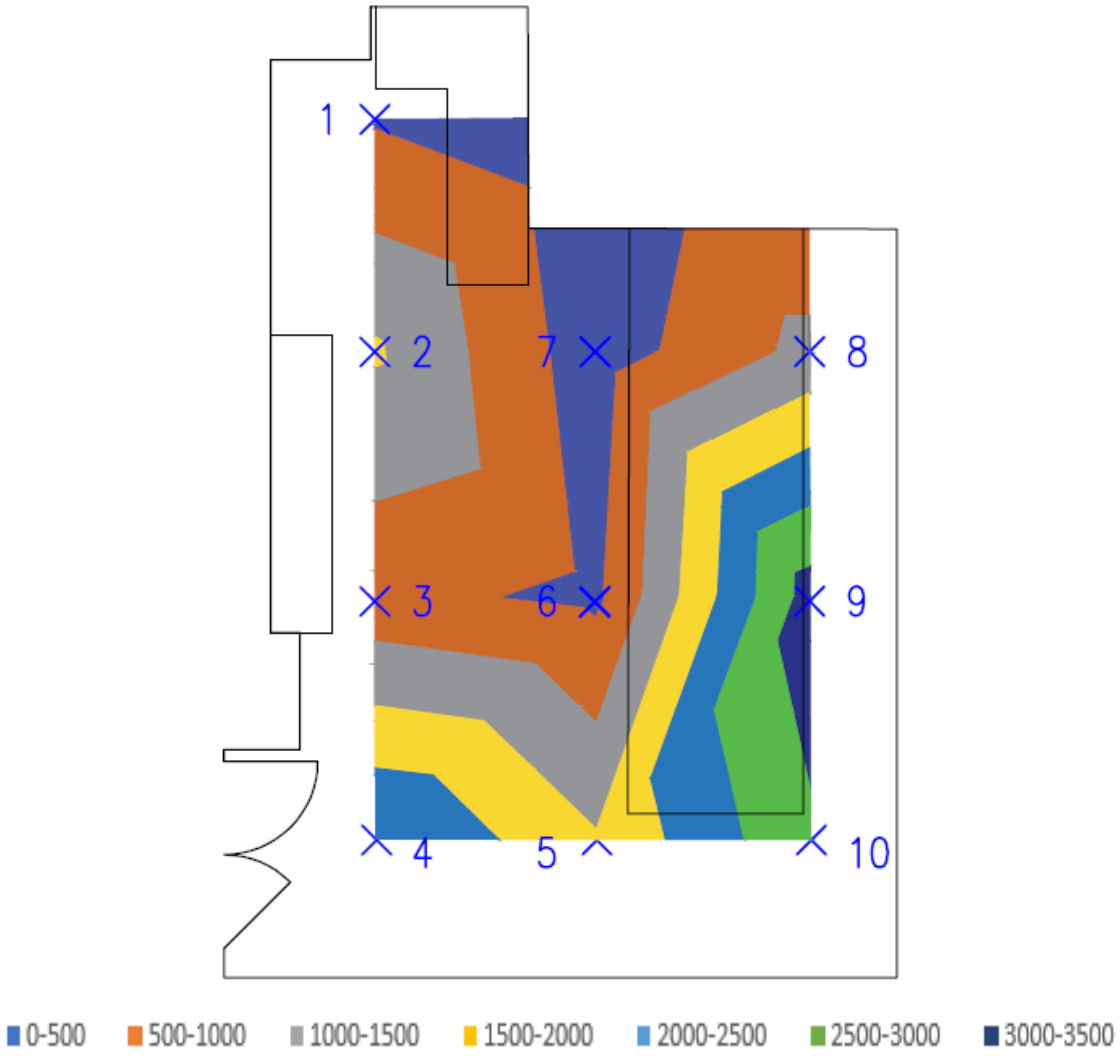
Číslo bodu	Číslo vzorku měření	0,3 µm	Průměr 0,3 µm	0,5 µm	Průměr 0,5 µm	1,0 µm	Průměr 1,0 µm	5,0 µm	Průměr 5,0 µm	Vyhodnocení
[-]	[-]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[p/m^3]	[-]
1	1	146,1	389,7	0,0	48,7	0,0	48,7	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	438,4		146,1		146,1		0,0		
	3	584,5		0,0		0,0		0,0		
2	1	2 045,8	1 558,7	292,3	487,1	0,0	341,0	0,0	97,4	**Splňuje**
	2	1 753,6		730,6		584,5		146,1		
	3	876,8		438,4		438,4		146,1		
3	1	438,4	633,2	0,0	97,4	0,0	48,7	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	1 022,9		292,3		146,1		0,0		
	3	438,4		0,0		0,0		0,0		
4	1	4 091,6	2 581,6	876,8	633,2	292,3	292,3	292,3	97,4	**Splňuje**
	2	1 169,0		438,4		292,3		0,0		
	3	2 484,2		584,5		292,3		0,0		
5	1	1 753,6	1 558,7	730,6	633,2	584,5	389,7	146,1	97,4	**Splňuje**
	2	2 338,1		1 022,9		584,5		146,1		
	3	584,5		146,1		0,0		0,0		
6	1	292,3	389,7	0,0	48,7	0,0	0,0	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	730,6		146,1		0,0		0,0		
	3	146,1		0,0		0,0		0,0		
7	1	146,1	219,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**Splňuje**
	2	292,3		0,0		0,0		0,0		
	3*	0,0*		0,0*		0,0*		0,0*		
8	1	1 022,9	1 169,0	292,3	438,4	146,1	194,8	146,1	97,4	**Splňuje**
	2	584,5		146,1		0,0		0,0		
	3	1 899,7		876,8		438,4		146,1		
9	1	3 068,7	3 312,3	1 753,6	1 315,2	1 169,0	876,8	292,3	194,8	**Splňuje**
	2	2 338,1		1 022,9		584,5		0,0		
	3	4 530,0		1 169,0		876,8		292,3		
10	1	3 068,7	2 971,3	1 461,3	1 461,3	730,6	925,5	292,3	243,5	**Splňuje**
	2	2 484,2		1 461,3		1 169,0		292,3		
	3	3 361,0		1 461,3		876,8		146,1		
Průměr		1 521,8		534,1		322,5		85,7		**Splňuje ISO 7**
Maximum		4 530,0		1 753,6		1 169,0		292,3		
Minimum		146,1		0,0		0,0		0,0		
Směrodatná odchylka		1 254,3		545,8		371,3		114,0		

Měření v místnosti L4 mohlo být negativně ovlivněno přesunem menšího stolu, který byl proveden cca pět hodin před začátkem měření v této místnosti a množství částic v prostoru tím mohlo být zvýšeno a rozvířeno. Výsledky měření je možné považovat za velmi

vyrovnané, hodnota směrodatné odchylky dosahovala nejnižší hodnot v porovnání s ostatními místnostmi. Nejvyšší hodnoty koncentrace částic byly naměřeny zejména v oblasti za velkým stolem (Obrázek 19) v bodech 8–10. V těchto místech může docházet k problematickému vymývání částic prouděním vzduchu a nečistoty mohou v této oblasti zůstávat. Tato oblast s nejvyšší koncentrací částic je vidět v grafickém rozložení koncentrace částic na Obrázku 21. Koncentrace částic dle grafického zobrazení stoupá směrem ke vstupu do místnosti, protože zde vlivem přetlaku dochází k pronikání částic z chodby. Výši koncentrace částic v celé místnosti může negativně ovlivňovat i skladování materiálu a drobných nástrojů v levé části místnosti (Obrázek 20).

Obrázek 20 – Sklad materiálu v místnosti L4

Průměrné hodnoty nedosahují více než 3 % limitní koncentrace dle třídy ISO 7 a maximální hodnoty dosahují nejvýše 10 % této požadované hodnoty. Výsledky potvrzují, že místnost L4 splňuje i za běžného provozu podmínky pro klasifikaci třídy ČSN EN ISO 14644-1.



Obrázek 21 – Grafické rozložení koncentrace částic ≥0,3 µm v měřících bodech v L4

V Tabulce 19 jsou uvedeny výsledky posouzení třídy čistoty všech místností a zároveň jsou zde uvedeny i výsledky průměrných hodnot teploty a relativní vlhkosti. Tyto výsledky slouží pouze pro informaci, protože měřením teploty a vlhkosti se bude zabývat část 2.7.2. Všechny místnosti splňují požadavky pro třídu čistoty ISO 7 dle ČSN EN ISO 14644-1.

Tabulka 19 – Porovnání průměrných výsledků měření mezi jednotlivými místnostmi

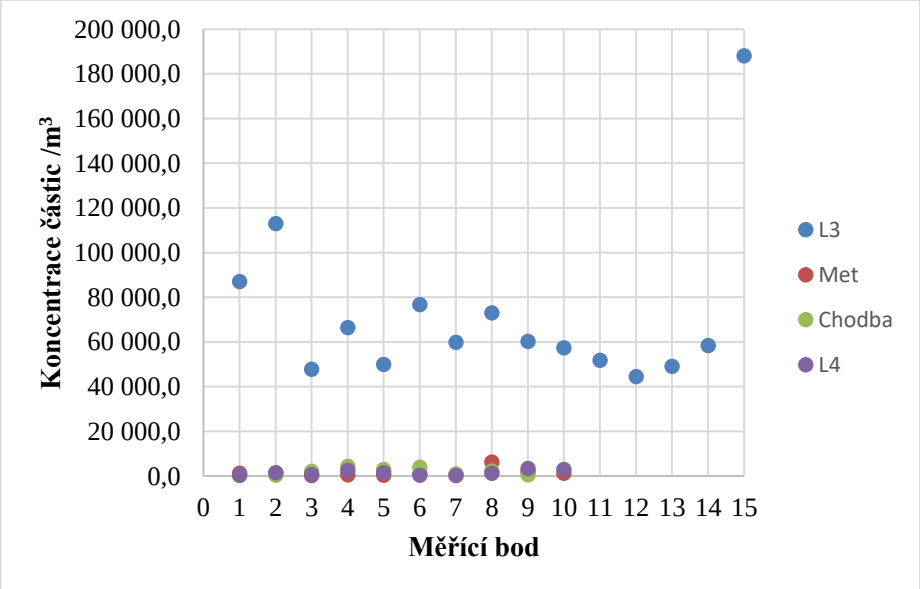
Místnost	**Třída čistoty prostředí dle ČSN EN ISO 14644-1**	**Průměrná teplota vzduchu**	**Průměrná relativní vlhkost**
[-]	**[-]**	**[°C]**	**[%]**
L3	ISO 7	21,70	41,70
Metrologie	ISO 7	19,50	46,50
Chodba	ISO 7	18,50	44,60
L4	ISO 7	19,50	43,70

2.7.1.6 Zhodnocení

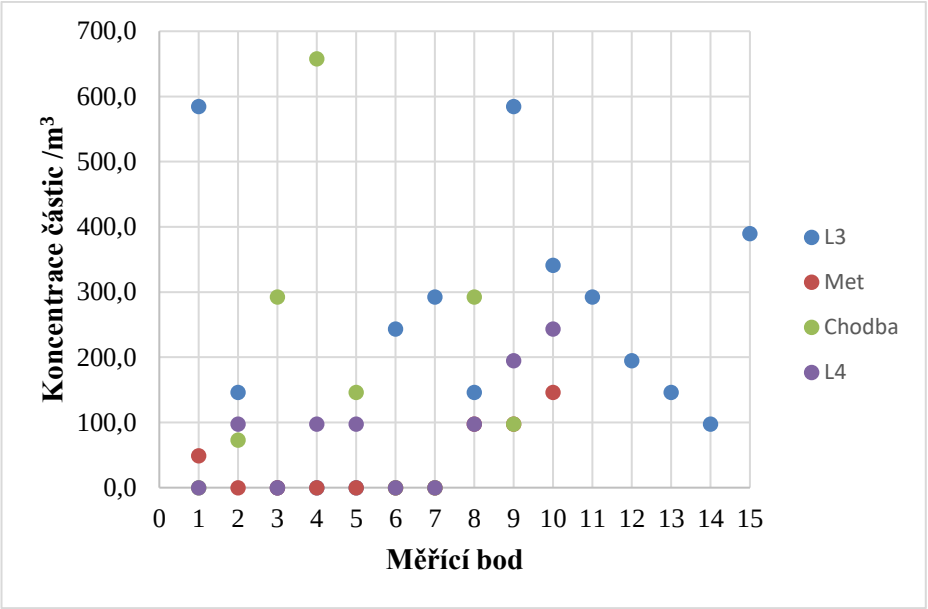
Měřením koncentrace částic bylo ověřeno, že všechny analyzované místnosti splňují za běžného provozního stavu požadavky klasifikace třídy ISO 7 dle ČSN EN ISO 14644-1. Naměřené hodnoty ve všech místnostech dosahovaly nízkých hodnot v porovnání s limitními koncentracemi částic a nejvyšší hodnoty byly naměřeny v místnosti L3. Porovnání naměřených hodnot v jednotlivých místnostech je zobrazeno v Grafu 3, z kterého vyplývá, že v místnosti L3 byly naměřené koncentrace částic ≥0,3 µm mnohonásobně vyšší než u ostatních místností, u kterých byly hodnoty podobné. V Grafu 4 jsou zobrazeny koncentrace částic ≥ 5,0 µm. Oproti přechozímu grafu se rozložení bodů značně změnilo a mezi naměřenými hodnotami v L3 a ostatních místnostech není již tak vysoký rozdíl.

Vyšší koncentrace částic v místnosti L3 je pravděpodobně způsobena špatně navrženým vzduchotechnickým systémem, který nezajišťuje dostatečné vymývání nečistot v celém prostoru laboratoře a vznikají tak tzv. hluchá místa, kde se shromažďují nečistoty. Snížení koncentrace částic v místnosti může být znesnadněno i stávajícím rozdělením místnosti na dvě části, protože dělící stěna může zhoršovat parametry proudění a tím i účinnost vymývání prostoru vzduchem. Podobně může situaci zhoršovat i pohyblivá textilní stěna. Je velmi pravděpodobné, že koncentraci částic zvyšují i uskladněné materiály a pomocné konstrukce, které by bylo vhodné přemístit.

Graf 3 – Naměřené kumulativní koncentrace částic ≥0,3 µm



Graf 4 - Naměřené kumulativní koncentrace částic ≥5,0 µm



Nejnižších koncentrací částic bylo dosaženo v místnosti metrologie a L4. Je možné, že tyto místnosti mohou dosáhnout takových podmínek, které by splňovaly klasifikaci podle třídy ISO 6. Přímé porovnání s limity třídy ISO 6 není relevantní, protože měření podle třídy ISO 6 vyžaduje větší objem měřeného vzduchu, který by byl desetinásobný oproti třídě ISO 7. Největší problém s dosažením požadovaných koncentrací by byl pravděpodobně u částic velikosti ≥5,0 µm, kde v některých měřících bodech průměrné hodnoty z měření pro ISO 7 téměř dosahovaly limitních koncentrací třídy ISO 6.

Zvýšení třídy čistoty prostor by nemuselo být docíleno jen úpravou vzduchotechnického systému, ale v tomto případě je vzhledem k nízkým hodnotám koncentrací možné, že by postačilo i dodržování určitých podmínek. Zejména by se jednalo o dodržování správného chování uživatelů v čistém prostoru nebo omezení skladování přebytečných materiálů. Podmínkou úspěšného dosažení třídy ISO 6 by bylo i zvýšení frekvence úklidu těchto místností. Pro další ověření těchto výsledků doporučuji podstoupit nové měření stejných bodů dle požadavků třídy ISO 6.

2.7.2 Měření tepelného komfortu

2.7.2.1 Cíl měření

Měření tepelného komfortu bylo provedeno za účelem posouzení tepelně-vlhkostního prostředí v místnostech L1, L3, L4 a metrologie. Výsledky měření byly porovnány s požadavky na vnitřní prostředí stanovenými dle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. a současně naměřené veličiny umožnily výpočet ukazatelů tepelné pohody PMV a PPD dle ČSN EN ISO 7730 [27; 28]. Součástí měření bylo i měření koncentrace CO_2, které bylo vyhodnoceno dle ČSN EN 15251 [29].

2.7.2.2 Metodika měření

Vzhledem k tomu, že lidé tráví v budovách většinu svého života, mělo by být zajištění vhodného vnitřního prostředí vnímáno jako podstatná část při navrhování budov a jejich technických systémů, neboť prostředí může mít pozitivní či negativní vliv např. na produktivitu práce či zdraví. Při hodnocení tepelného komfortu se postupuje podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 7730 nebo americké ANSI/ASHRAE 55 [28; 30]. Tepelný komfort neboli také tepelná pohoda vyjadřuje stav mysli, ve kterém je jedinec spokojen s okolním tepelným prostředím [31]. Je to tedy takový stav, kdy jedinci není ani příliš chladno a ani příliš teplo a tento stav je podmíněný tepelnou rovnováhou. [32]

Faktory, který tepelnou pohodu ovlivňují rozdělujeme na parametry prostředí, mezi které patří střední radiační teplota, teplota vzduchu, rychlost proudění a relativní vlhkost vzduchu, a parametry osobní, kterými je metabolické teplo a tepelný odpor oděvu. Existují i další parametry jako je průvan, vertikální rozdíl teplot či asymetrie sálání, které mohou způsobit místní nepohodu. Dosažení stavu tepelné pohody je však závislé na mnoha dalších okolnostech jako je např. věk, pohlaví, fyzický nebo psychický stav jedince. [28]

Metody hodnocení tepelného prostředí jsou většinou rozdělovány na objektivní a subjektivní. Objektivní metody zkoumají tepelnou rovnováhu a skutečný účinek prostředí na člověka pomocí měření. Subjektivní metody zjišťují tepelný pocit člověka a jeho vnímání okolí. Nejčastěji používanou subjektivní metodou je hodnocení pomocí dotazníků, která však bývá často doplňováno o měření tepelně-vlhkostních veličin. [30]

Mezi metody hodnocení vnitřního prostředí se řadí i tzv. předpisové metody, které sledují dodržování hygienických předpisů. Jedním z takových předpisů je Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. Toto nařízení rozděluje pracovní prostředí do tříd I–V podle průměrného energetického výdaje a pro jednotlivé třídy pracovišť stanovuje přípustné mikroklimatické podmínky. Každá třída práce je ještě zatříděna do kategorie prostředí A, B nebo C podle požadavků na kvalitu prostředí. Přípustné hodnoty mikroklimatických podmínek pro klimatizované pracoviště třídy I a IIa jsou uvedeny v následující tabulce. [27]

Tabulka 20 – Přípustné hodnoty nastavení mikroklimatických podmínek pro klimatizované pracoviště třídy I a IIa [27]

Třída práce	M [W.m-2]	Kategorie	Klimatizované pracoviště				V_a[m.s^{-1}]	Rh[%]
			nastavení vytápění		nastavení chlazení			
			tepelný odpor oděvu 1,0 clo		tepelný odpor oděvu 0,5 clo			
			t_{omin} (t_{gmin}) [°C]		t_{omin} (t_{gmin}) [°C]			
I	≤ 80	A	22	± 1,0	24,5	± 1,0	0,05 až 0,2	30 až 70
		B		± 1,5		+ 1,5 - 1,0		
		C		+ 2,5 - 2,0		+ 2,5 - 2,0		
IIa	81-105	A	20	± 1,0	23	± 1,0		
		B		± 1,5		+ 1,5 1,0		
		C		+ 2,5 - 2,0		+ 2,5 - 2,0		

Mezi hlavní kritéria hodnocení tepelné pohody patří operativní teplota a ukazatele PMV a PPD. Operativní teplota je dle ČSN EN ISO 7730 definována jako „jednotná teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by tělo sdílelo sáláním i konvekcí stejné množství tepla, jako ve skutečném, teplotně nesourodém prostředí“. [28]

Operativní teplotu není možné získat měření, ale je nutné ji vypočítat podle rovnice, ve které je koeficient A závislý na rychlosti proudění vzduchu (4):

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r \quad [°C] \tag{4}$$

Pro malé rychlosti proudění ≤0,2 m/s je možno operativní teplotu vypočítat jako aritmetický průměr hodnot teploty vzduchu a střední radiační teploty [28]. Dle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. je hodnocení podle průměrné operativní teploty možné nahradit hodnocením podle výsledné teploty kulového teploměru ve chvíli, kdy rychlost proudění vzduchu je ≤0,2 m/s [27].

Výše zmíněná kritéria pro hodnocení tepelné pohody, ukazatelé PMV a PPD, byly stanoveny podle p. Fangera a jejich postup výpočtu je popsán v ČSN EN ISO 7730. Stanovení těchto ukazatelů vyžaduje nejprve určení parametrů prostředí i parametrů metabolického výdaje a tepelného odporu oděvu. Některé parametry je možné změřit, u některých jako je např. střední radiační teplota je nutné použít výpočet a u parametrů osobních je většinou ke stanovení hodnot použito odborného odhadu. [31]

Ukazatel PMV vyjadřuje tzv. předpokládanou průměrnou volbu neboli průměrný tepelný pocit člověka ve větší skupině osob vystavené stejnému prostředí a je stanoven podle rovnice (5) [28]:

$$PMV = (0{,}303 \cdot e^{-0{,}036M} + 0{,}028) \cdot \left\{ \begin{array}{c} (M-W) - 3{,}05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6{,}99 \cdot (M-W) - p_a] \\ 0{,}42 \cdot [(M-W) - 58{,}15] - 1{,}7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0{,}0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3{,}96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (5)$$

Vypočtená hodnota PMV je poté porovnána na následující sedmibodové stupnici:

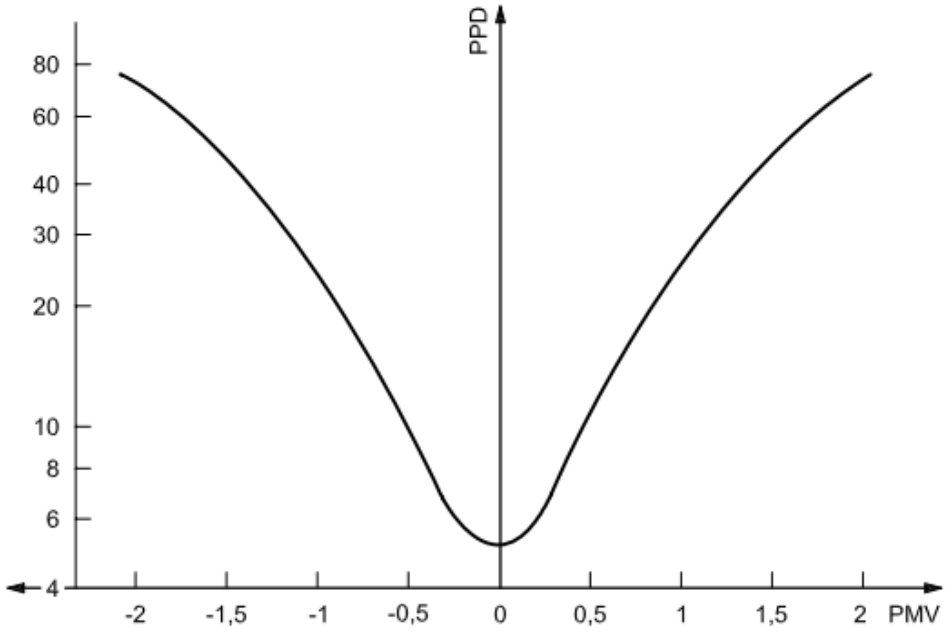
3	2	1	0	-1	-2	-3
Horko	Teplo	Mírně teplo	Neutrální	Mírně chladno	Chladno	Zima

Oproti tomu ukazatel PPD vyjadřuje předpokládané procento nespokojených osob větší skupiny lidí vlivem tepelného prostředí. Nespokojenými osobami jsou ti jedinci, kterým je příliš teplo nebo zima a na výše zmíněné stupnici by volili horko, teplo, chladno nebo zimu. Zbylé osoby by se cítili tepelně neutrálně nebo by pociťovali mírně teplo nebo mírně chladno. Výpočet vychází ze stanoveného PMV a proběhne podle rovnice (6) [28]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0{,}03353 \cdot PMV^4 - 0{,}2179 \cdot PMV^2)} \quad [\%] \quad (6)$$

Ze závislosti PPD na PMV zobrazené v Grafu 5 je vidět, že pro hodnotu PMV = 0 je hodnota PPD rovná 5 %. Z toho vyplývá, že ve velké skupině osob lze očekávat i při neutrálním tepelném prostředí minimálně 5 % nespokojených osob.

Graf 5 – Předpokládané procento nespokojených (PPD, %) jako funkce PMV [28]



Podle vypočtených ukazatelů PMV a PPD je dále analyzované prostředí začleněno do kategorie vnitřního tepelného prostředí podle Tabulky 21.

Tabulka 21 – Kategorie vnitřního prostředí dle ČSN EN ISO 7730 [28]

Kategorie vnitřního tepelného prostředí	**Celkový tepelný stav těla**	
	Předpokládané procento nespokojených	**Předpokládané průměrné hodnocení**
A	<6 %	- 0,2 < PMV < + 0,2 %
B	<10 %	- 0,5 < PMV < + 0,5 %
C	<15 %	- 0,7 < PMV < + 0,7 %

Pro výpočet PMV a PPD a posouzení tepelného komfortu dle ČSN EN ISO 7730 je vyžadováno naměření veličin výsledné teploty kulového teploměru, teploty vzduchu, rychlosti proudění a relativní vlhkosti. Následně je nutné vypočítat střední radiační teplotu dle vzorce (7), který uvažuje použití kulového teploměru o průměru 150 mm [33]:

$$t_r = \left[\left(t_g + 273\right)^4 + 2{,}5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot \left(t_g - t_a\right)\right]^{1/4} - 273 \qquad [°C] \qquad (7)$$

Pro provedení výpočtu ukazatelů PMV a PPD bylo nutné stanovit metabolický výdej a tepelný odpor povrchu oděvu uživatele čistého prostoru. Podle ČSN EN ISO 7730 práce v laboratoři odpovídá energetickému výdeji 93 W/m^2 a tedy hodnotě metabolického výdeje 1,6 met (1 met = 58,2 W/m^2), který odpovídá velmi lehké aktivitě stojícího jedince [28]. Tato aktivita by podle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. odpovídala třídě IIa, a protože se jedná o pracoviště s požadovanou vysokou kvalitou prostředí, analyzované místnosti budou porovnávány podle kategorie A [27].

Člověk s kombinací oblečení skládající se ze spodního prádla, košile, kalhot, pracovního pláště, ponožek a bot má tepelný odpor oděvu 0,9 clo (1 clo = 0,155 m^{2}K/W) [28]. Největším problémem při určení odporu oděvu je započtení čisté pracovní kombinézy, a proto byly pro stanovení odporu čerpány i poznatky z literatury. Podobně jako uživatelé čistých laboratoří mohou být oblečeni i lékaři na operačním sále. Zatímco pro práci chirurgů je uvažována hodnota tepelného odporu oděvu kolem 1,4 clo, oděv lékařů-anestetiků nebo sester bývá často s nižším odporem kolem 0,9 clo [34]. Je pravděpodobné, že pracovní oděv uživatelů čisté laboratoře je spíše přirovnatelný k pracovnímu oděvu sester či anestetiků. Pro ověření správnosti stanovení hodnot veličin metabolického výdaje a tepelného odporu oděvu byly tyto hodnoty zkontrolovány po vyhodnocení výsledků subjektivního hodnocení pomocí dotazníků v části 2.7.3, aby uvedené hodnoty byly relevantní vzhledem k činnosti a oděvu uživatelů laboratoře. Výsledky části 2.7.3 správnost těchto hodnot potvrdily.

Vzhledem ke složitosti výpočtu ukazatelů PMV a PPD bylo v této práci přistoupeno k použití výpočtového programu Tepelný komfort 2.1 sestavený panem doc. Ing. Vladimírem Zmrhalem, Ph.D., který slouží ke stanovení ukazatelů tepelné pohody PMV a PPD podle ČSN EN ISO 7730 [35]. Správnost výpočtu PMV a PPD v tomto programu je předpokládána, nicméně pro zajištění použití správných výsledků pro vyhodnocení stávajícího stavu byly hodnoty pro kontrolu ověřeny i v online výpočtovém programu CBE Thermal Comfort Tool [36].

Doplňkem měření tepelného komfortu bylo měření koncentrace CO_2 a vyhodnocení dle ČSN EN 15251. Maximální úroveň koncentrace CO_2 ve vnitřních prostorách je 1500 ppm, ale doporučováno je spíše udržování koncentrace pod hodnotou 1000 ppm, protože právě od této koncentrace se objevují příznaky na lidský organismus jako je únava nebo snížení pozornosti. Se zvyšující se koncentrací se zhoršují účinky na lidský organismus a člověk trpí bolestmi hlavy, nevolností nebo ho sužují dýchací potíže [29]. Podle Tabulky 22 je možné

posuzované místnosti zatřídit do kategorií dle výše koncentrace CO_2 nad hodnotou koncentrace ve venkovním ovzduší [29]. Za referenční hodnotu koncentrace ve venkovním ovzduší je používána hodnota 350 ppm, nicméně v současnosti koncentrace CO_2 v atmosféře dosahuje hodnot kolem 400 ppm [29]. V čistém prostoru je vzhledem k vysoké výměně vzduchu s nejméně 15 % venkovního vzduchu předpokládána velmi nízká koncentrace CO_2, která by měla být podobná koncentraci ve venkovním ovzduší.

Tabulka 22 – Zvýšení koncentrace CO_2 nad koncentraci ve venkovním ovzduší [29]

Kategorie	**CO_2**
[-]	**[ppm]**
I	**350**
II	**500**
III	**800**
IV	**> 800**

Měření všech veličin probíhalo v místnostech L1, L3, L4 a metrologie. Měření nemohlo z bezpečnostních důvodů probíhat při spuštěných laserových technologiích, a proto byla z měření vyjmuta místnost laserové laboratoře L2, aby nebyl provoz v této místnosti narušen. Z vlastního průzkumu stávajícího stavu a projektové dokumentace vyplývá, že v místnosti L2 jsou velmi podobné tepelně-vlhkostní podmínky i intenzita provozu jako v místnosti L1. Z tohoto důvodu je možné předpokládat podobné výsledky jako v místnosti L1 i pro místnost L2.

V každé místnosti byla určena typická pracovní místa a jejich umístění bylo zakresleno. Rozmístění pracovních bodů v jednotlivých místnostech je zobrazeno v části 2.7.2.5. V místnosti L1, L3 a L4 bylo předpokládáno, že uživatelé laboratoří konají pracovní činnost ve stoje, zatímco v místnosti metrologie byla uvažována na všech pracovních pozicích práce v sedě, a podle toho byla nastavena výška měření. Pro stojící osobu byla výška měření teploty kulového teploměru stanovena na 1,1 m, která odpovídá výšce břicha stojící osoby, a pro všechny ostatní přístroje byla výška měření 1,7 m, která odpovídá výškové úrovni hlavy [33]. Pro sedící osobu byla výška měření kulového teploměru stanovena na 0,6 m a pro všechny ostatní přístroje byla výška měření 1,1 m [33]. Z důvodu proveditelnosti měření během jednoho pracovního dne nebyly veličiny měřeny ve třech výškách v úrovni hlavy, břicha a kotníků.

2.7.2.3 Použité přístroje

Pro měření byla použita měřící sada Ahlborn Almemo (Obrázek 22), která se používá pro měření tepelného komfortu v místnostech s mírnou tepelnou zátěží. Jako datalogger byla použita jednotka Almemo 710, která umožňuje připojení až 10 různých čidel. Součástí měřící sady byl kulový teploměr, všesměrový anemometr pro měření rychlosti proudění vzduchu, kombinované čidlo teploty a vlhkosti vzduchu. K měřící sadě byl přidán digitální snímač koncentrace CO_2. Stativ umožňoval nastavení výšky měření dle požadavků. Z poskytnutých informací výrobce byly zjištěny následující informace [37]:

Kulový teploměr:

Měděný kulový teploměr o průměru 150 mm pro měření výsledné teploty kulového teploměru s centrálně umístěným čidlem Pt100. Měřící rozsah čidla je -50 až +200 °C.

Všesměrový anemometr:

Termoanemometrické všesměrové čidlo pro měření nízkých rychlostí vzduchu v rozsahu 0,01 – 1 m/s se schopností rozlišení 0,001 m/s. Přesnost měření je udávána jako ±1,0 % z rozsahu a ±1,5 % z naměřené hodnoty.

Kombinované čidlo teploty a vlhkosti:

Kombinované digitální čidlo, které umožňuje měření teploty, relativní vlhkosti a dále také rosného bodu a měrné vlhkosti. Měřící rozsah teploty je -20 °C až +80 °C a relativní vlhkosti je 5 % až 98 %. Přesnost měření teploty je ±0,3 °C pro teploty do 25 °C a přesnost měření vlhkosti je ±1,8 %.

Snímač koncentrace CO2:

Digitální snímač koncentrace CO_2 ve vzduchu s měřícím rozsahem 0 až 10 000 ppm. Přesnost měření je ± (100 ppm + 5 % z měřené hodnoty).

Obrázek 22 – Měřící souprava

2.7.2.4 Postup měření

Všechna uvedená čidla byla upevněna na stojan do požadované výšky a před začátkem měření byla v dataloggeru nastavena délka měřícího cyklu na 1 minutu a celková doba měření jednoho pracovního místa na 10 minut. Pro měření všech veličin byla nastavena funkce průměrování hodnot během jednoho měřícího cyklu.

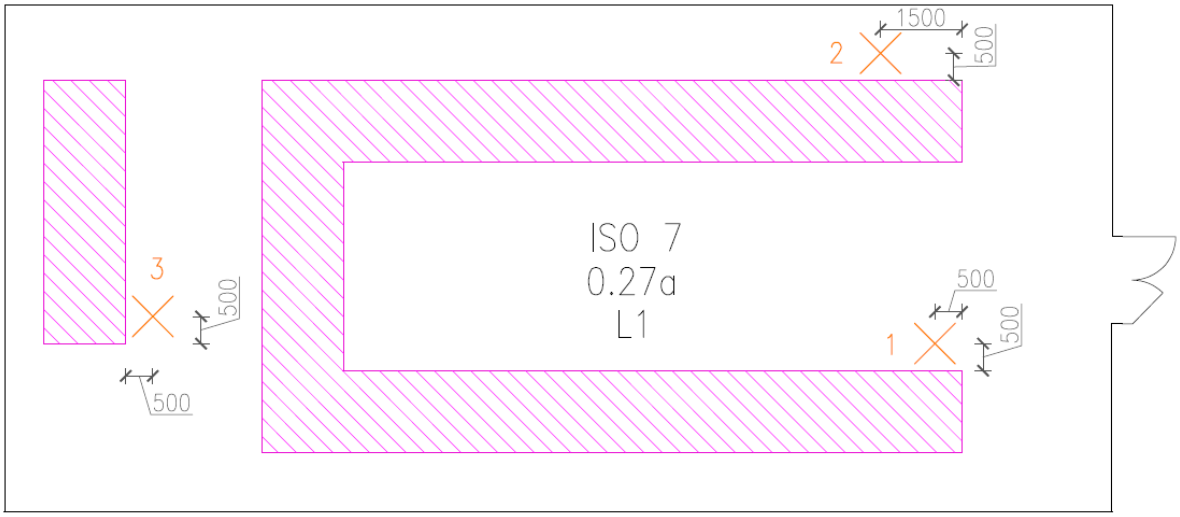
Nejdříve měření probíhalo v laboratoři L1 z důvodu co nejmenšího narušení provozu laserových technologií, které nemohly být z důvodu bezpečnosti současně v provozu. Poté bylo měření provedeno v laboratoři L3, v místnosti L4 a nakonec v místnosti metrologie. Po dokončení všech měření byla data stažena do MS Excel a vyhodnocena.

2.7.2.5 Výsledky a diskuze

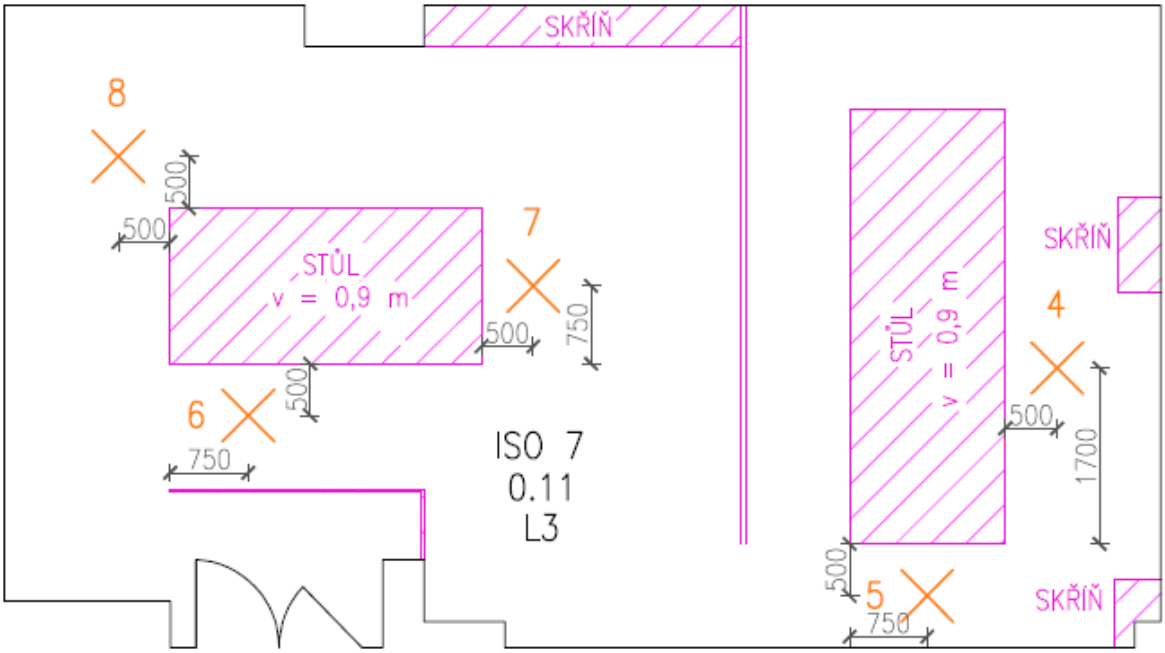
Měření probíhalo za běžného provozu laserových laboratoří dne 15.března 2018 v čase 08:54:05 – 11:58:36. Během měření nebyly zaznamenány žádné skutečnosti, které by mohly

ovlivnit platnost měření. Všechny naměřené výsledky včetně naměřených hodnot rosného bodu a měrné vlhkosti jsou k dispozici na CD, které je přiloženo k této práci.

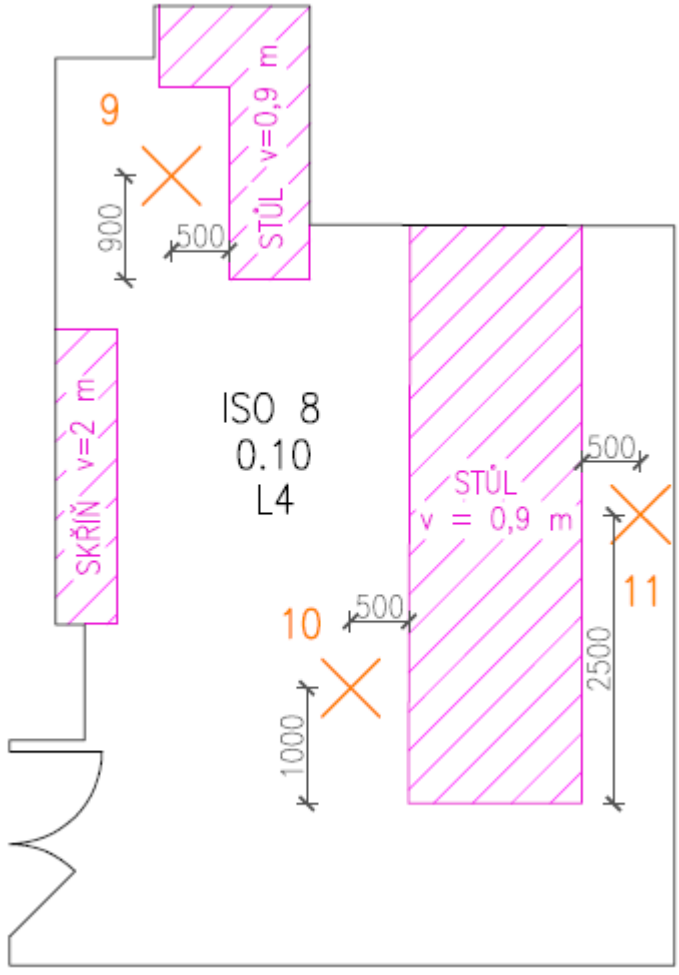
Vzhledem k tomu, že uživatelé laboratoří mění svá pracoviště a pohybují se po místnosti, posouzení podle Nařízení vlády č.361/2007 Sb., ČSN EN ISO 7730 a ČSN EN 15251 bylo provedeno vždy pro celou místnost, tedy dohromady pro všechny pracovní místa v rámci místnosti. Pro každou veličinu byla ze všech naměřených hodnot pro jednu pracovní pozici spočítána průměrná hodnota, která sloužila pro porovnání jednotlivých pracovišť v rámci místnosti. Umístění měřících bodů je zobrazeno na následujících obrázcích.



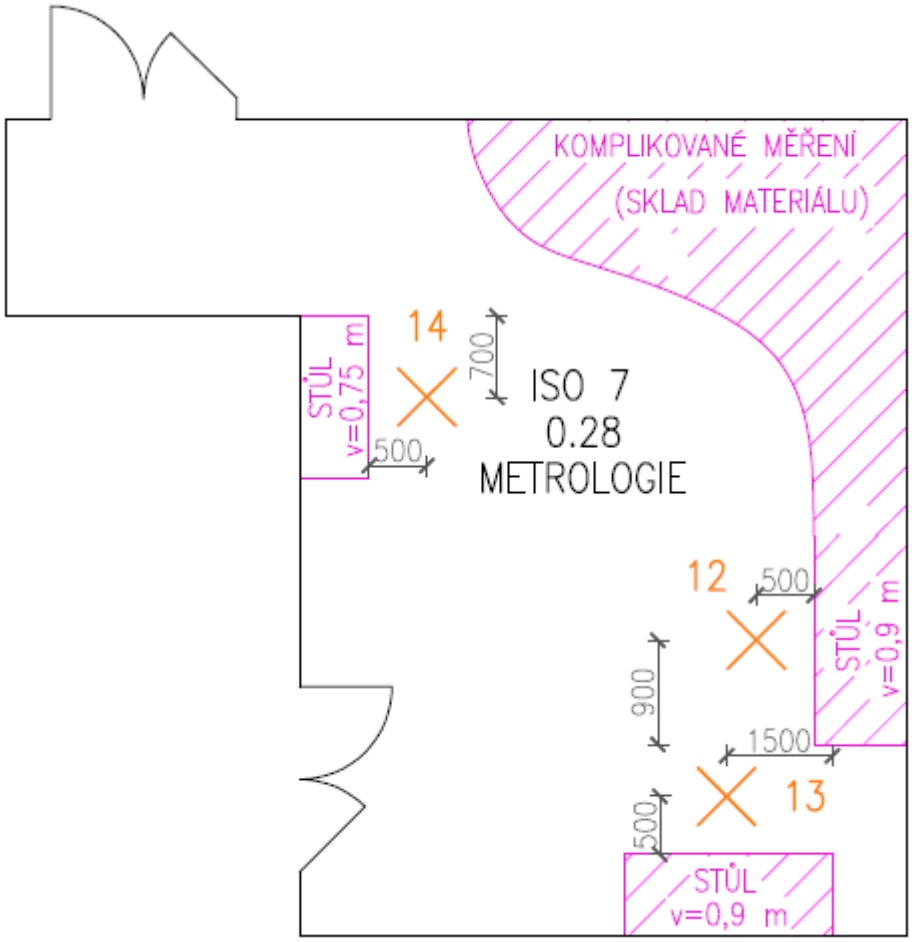
Obrázek 23 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti L1



Obrázek 24 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti L3



Obrázek 25 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti L4



Obrázek 26 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti metrologie

Průměrné naměřené hodnoty pro jednotlivá pracovní místa včetně průměrných hodnot veličin pro celou místnost jsou zobrazeny v Tabulce 23, ve které jsou uvedeny i vypočtené hodnoty střední radiační teploty.

Největší rozdíly mezi vnitřními podmínkami na jednotlivých pracovištích byly zaznamenány v místnostech L1 a L4. Nicméně z výsledků je patrné, že rozdíly mezi pracovišti nejsou příliš vysoké. Pouze v místnosti L1 by vyšší rozdíly v rychlosti proudění mohly způsobit snížený komfort na některých pracovních místech. Právě v místnosti L1 dosahuje rychlost proudění nejvyšších hodnot i nejvyšších rozdílů ve srovnání s ostatními místnostmi. Tento jev může být způsoben zejména vysokým počtem výměn vzduchu v porovnání s ostatními čistými prostory a může způsobit rozdílné podmínky na pracovním místě, které je umístěno těsně pod přívodní vyústkou, ve srovnání s pracovištěm, které je například umístěno ve středu mezi dvěma přívodními prvky.

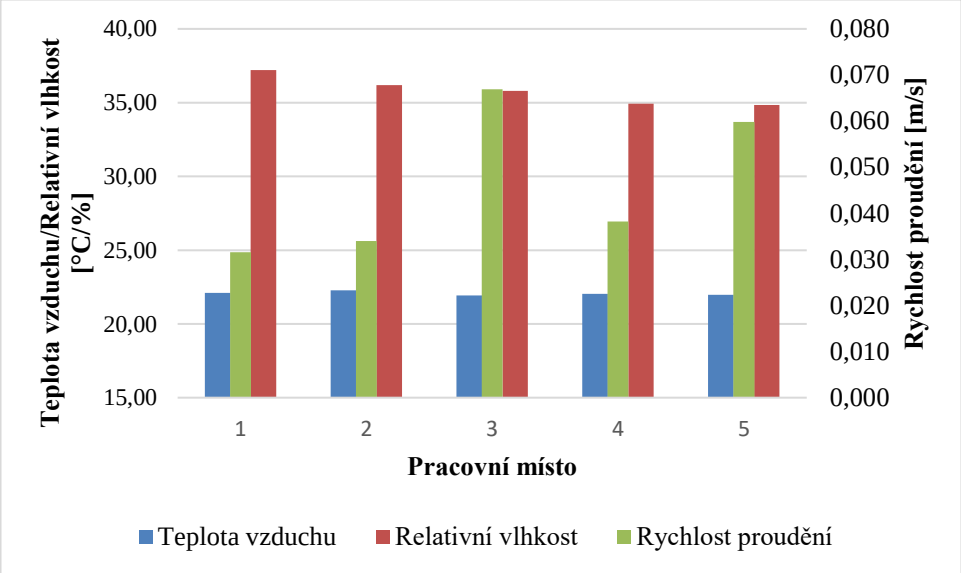
Tabulka 23 – Průměrné naměřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivá pracovní místa

Místnost	Pracovní místo	Rychlost proudění	Teplota vzduchu	Relativní vlhkost	Teplota kulového teploměru	Koncentrace CO_2	Střední radiační teplota
[-]	[-]	[m/s]	[°C]	[%]	[°C]	[ppm]	[°C]
L1	1	0,159	22,43	40,02	22,74	404	22,98
	2	0,210	21,94	37,94	22,31	397	22,65
	3	0,105	22,24	35,87	22,27	398	22,29
	Průměr	0,158	22,20	37,94	22,44	400	22,64
	Maximum	0,210	22,43	40,02	22,74	404	22,98
	Minimum	0,105	21,94	35,87	22,27	397	22,29
	Směrodatná odchylka	0,043	0,20	1,69	0,21	3	0,28
L3	4	0,032	22,11	37,21	22,34	408	22,40
	5	0,034	22,27	36,19	22,31	421	22,32
	6	0,067	21,93	35,79	22,10	395	22,18
	7	0,038	22,04	34,93	21,93	396	21,90
	8	0,060	21,97	34,85	22,06	398	22,10
	Průměr	0,046	22,06	35,80	22,15	404	22,18
	Maximum	0,067	22,27	37,21	22,34	421	22,40
	Minimum	0,032	21,93	34,85	21,93	395	21,90
	Směrodatná odchylka	0,014	0,12	0,87	0,15	10	0,18
L4	9	0,030	21,40	35,70	21,50	406	21,53
	10	0,051	21,18	37,53	20,89	413	20,76
	11	0,069	20,71	40,24	20,53	436	20,45
	Průměr	0,050	21,10	37,82	20,97	419	20,91
	Maximum	0,069	21,40	40,24	21,50	436	21,53
	Minimum	0,030	20,71	35,70	20,53	406	20,45
	Směrodatná odchylka	0,016	0,29	1,87	0,40	13	0,45
Metrologie	12	0,066	20,03	43,89	20,36	434	20,52
	13	0,082	20,03	44,28	20,08	436	20,10
	14	0,110	19,91	44,79	20,01	443	20,08
	Průměr	0,086	19,99	44,32	20,15	438	20,24
	Maximum	0,110	20,03	44,79	20,36	443	20,52
	Minimum	0,066	19,91	43,89	20,01	434	20,08
	Směrodatná odchylka	0,018	0,06	0,37	0,15	4	0,21

Rozdíly mezi jednotlivými pracovními místy jsou kromě tabulky také patrné z následujícího Grafu 6, kde jsou zobrazeny průměrné hodnoty rychlosti proudění, teploty vzduchu a relativní vlhkosti na jednotlivých místech v místnosti L3. Tato místnost byla vybrána z toho důvodu, že zde bylo měřeno nejvíce pracovních pozic a zobrazení výsledků je názornější než u menšího počtu bodů. Z grafu je vidět, že zatímco u teploty vzduchu a relativní vlhkosti rozdíly mezi jednotlivými body nejsou příliš vysoké, u rychlosti proudění maximální rychlost dosahuje téměř dvojnásobné hodnoty než v bodě s nejnižší rychlostí. Tento jev se opakoval ve všech místnostech a jak již bylo zmíněno výše, je způsoben tím, že

některé pracovní pozice jsou umístěny v těsné blízkosti přívodních vyústek a rychlost proudění je v takovém místě mnohem vyšší než v místech vzdálených od přívodních, resp. odvodních prvků.

Graf 6 – Porovnání některých naměřených veličin na jednotlivých pracovištích v místnosti L3



Průměrná rychlost proudění vzduchu nepřekročila 0,2 m/s, a proto bylo možné nahradit operativní teplotu hodnotou výsledné teploty kulového teploměru. Uvedené výsledky v Tabulce 24 jsou porovnány s požadavky pro třídu práce IIa kategorie A dle Nařízení vlády 361/2007 Sb. [27].

Tabulka 24 – Průměrné hodnoty měřených veličin pro jednotlivé místnosti

Místnost	Rychlost proudění	Teplota vzduchu	Relativní vlhkost	Teplota kulového teploměru	Střední radiační teplota	Operativní teplota	Koncentrace CO_2
[-]	[m/s]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]
L1	0,158	22,20	37,94	22,44	22,64	22,44	400
L3	0,046	22,06	35,80	22,15	22,18	22,15	404
L4	0,050	21,10	37,82	20,97	20,91	20,97	419
Metrologie	0,086	19,99	44,32	20,15	20,24	20,15	438

Všechny místnosti kromě L3 splňují požadovanou rychlost proudění vzduchu, která je stanovena mezi 0,05 až 0,2 m/s. V místnosti L3 je naměřená průměrná rychlost proudění nižší a je možné, že rychlost proudění bude i uživateli posouzena jako nedostatečná. Relativní vlhkost byla splněna ve všech místnostech, ale pohybovala se spíše na dolní hranici uvedeného rozmezí a naměřené hodnoty vlhkosti nelze považovat jako ideální. Optimální

hodnota relativní vlhkosti na podobných pracovištích je udávána mezi 40–60 % [38; 39]. V tomto rozmezí se naměřená vlhkost pohybovala pouze v místnosti metrologie. Nižší vlhkost než 40 % je mnohdy uživateli vnímána negativně, protože způsobuje vysychání sliznic, a také zvyšuje riziko syndromu nemocných budov (SBS) [39].

Posouzení podle operativní teploty vyhověly místnosti L4 a metrologie a nevyhověly místnosti L1 a L3. Pro třídu IIa kategorie A je požadovaná teplota 20 °C ±1 °C a místnosti L1 a L3 tuto hodnotu překračují. Při vyšší tepelné zátěži by nemusela vyhovět ani místnost L4, která jen velmi těsně splňuje požadovanou hodnotu.

V druhé části byly z výsledků měření určeny ukazatele PMV a PPD a ve všech místnostech vyšlo, že vnitřní prostředí je vnímáno jako mírně teplé. Největší předpokládané procento nespokojených osob bylo zaznamenáno v místnosti L3, která jako jediná byla zařazena do kategorie prostředí C, nicméně kategorii B nevyhověla pouze velmi těsně. Nejvyšší kategorie prostředí A byla zjištěna v místnosti metrologie, kde hodnota PMV a PPD byla velmi nízká.

Tabulka 25 – Zatřídění místností do kategorie prostředí dle ČSN EN ISO 7730

Místnost	**PMV**	**Slovní vyhodnocení**	**PPD**	**Kategorie prostředí dle ČSN EN ISO 7730**
[-]	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
L1	0,45	Mírně teplo	9,20 %	B
L3	0,51	Mírně teplo	10,30 %	C
L4	0,33	Mírně teplo	7,20 %	B
Metrologie	0,19	Mírně teplo	5,80 %	A

Na závěr byly požadované místnosti porovnány podle ČSN EN 15251 podle hodnot koncentrace CO_2 nad venkovní koncentrací. Všechny místnosti dosahovaly velmi nízkých koncentrací CO_2, které byly přibližně stejné jako běžná koncentrace ve venkovním prostředí. Nízké hodnoty koncentrace CO_2 zajistily, že všechny místnosti spadají do kategorie prostředí I dle ČSN EN 15251.

Tabulka 26 – Vyhodnocení analyzovaných místností dle ČSN EN 15251

Místnost	**Průměrná hodnota koncentrace**	**Kategorie prostředí**
[-]	**[-]**	**[-]**
L1	400	I
L3	404	I
L4	419	I
Metrologie	438	I

2.7.2.6 Zhodnocení

Posouzení místností podle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. třídy práce IIa kategorie A vyhověly pouze místnosti L4 a metrologie. Důvodem nesplnění požadovaných podmínek byla zejména příliš vysoká teplota nebo nízká rychlost proudění vzduchu. Tyto nedostatky způsobují, že uživatelé místností mohou pociťovat nedostatečnou rychlost proudění vzduchu a tepelnou nepohodu. Předpoklad sníženého tepelného komfortu byl potvrzen i výsledky hodnocení tepelného komfortu dle ČSN EN ISO 7730, kdy vnitřní prostředí bylo vyhodnoceno jako mírně teplé. Nejlepší podmínky vnitřního prostředí byly zjištěny v místnosti metrologie, kde i naměřená relativní vlhkost splňuje optimální podmínky pro pobyt osob. V ostatních místnostech by mohla být relativní vlhkost udržovaná na vyšší hodnotě, nicméně vzhledem k instalovaným technologiím je upřednostňována nižší relativní vlhkost z důvodu zamezení rizika kondenzace na pomocných systémech a technologiích. Vysoká intenzita větrání ve všech místnostech zajišťuje velmi nízkou koncentraci CO_2, která je téměř shodná s koncentrací ve venkovním prostředí.

Vnitřní prostředí v analyzovaných místnostech je vzhledem k instalovaným technologiím a charakteru provozu udržováno téměř konstantní v průběhu celého roku, a tedy zjištěné vnitřní podmínky by měly být v průběhu roku podobné. Shrnutí výsledků je uvedeno v Tabulce 27.

Tabulka 27 – Vyhodnocení analyzovaných místností dle Nařízení vlády č.361/2007 Sb., ČSN EN ISO 7730 a ČSN EN 15251

	Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.			**ČSN EN ISO 7730**		**ČSN EN 15251**
Místnost	**Posuzovaná třída práce**	**Kategorie**	**Vyhodnocení**	**Slovní vyhodnocení**	**Kategorie prostředí**	**Kategorie prostředí**
[-]	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
L1	IIa	A	**Nesplňuje**	Mírně teplo	B	I
L3	IIa	A	**Nesplňuje**	Mírně teplo	C	I
L4	IIa	A	**Splňuje**	Mírně teplo	B	I
Metrologie	IIa	A	**Splňuje**	Mírně teplo	A	I

2.7.3 Subjektivní hodnocení tepelného komfortu pomocí dotazníků

2.7.3.1 Cíl subjektivního hodnocení

Cílem subjektivního hodnocení tepelného komfortu je vyhodnotit vnímání tepelného komfortu uživateli čistého prostoru a zachytit případné zdroje diskomfortu, které nejsou podchyceny samotným měřením tepelného komfortu. Vnímání tepelné pohody bude na závěr hodnocení porovnáno s výsledky měření tepelného komfortu. Výsledky subjektivního hodnocení a zejména zjištěné nedostatky mohou posloužit ke snazšímu definování podmínek budoucí optické laboratoře.

2.7.3.2 Metodika subjektivního hodnocení

Subjektivní hodnocení tepelného komfortu pomocí dotazníků se stává nedílnou součástí hodnocení tepelné pohody uživatele. Oproti objektivní metodě hodnocení prostředí pomocí měření tepelně-vlhkostních veličin má subjektivní hodnocení výhody v podobě zachycení možných problematických míst a zdrojů případné nespokojenosti osob. Interpretace výsledků hodnocení je ovlivněna především sestavením dotazníku pomocí vhodně formulovaných otázek. Dotazníky je nutné vždy přizpůsobit konkrétnímu prostoru a snažit se volbou otázek co nejlépe zachytit stávající prostředí a jeho možné nedostatky. Subjektivní hodnocení bývá velmi často doplňkem měření tepelně-vlhkostního prostředí, protože vyplňuje ta problematická místa hodnocení, které by pomocí měření nebyly zachyceny. Zároveň umožňuje uživatelům vyjádřit se k vnímání prostředí a zjistit tak jejich připomínky k obývanému prostoru a jejich míru spokojenosti. Velmi často se tato metoda používá ve chvíli, kdy není z různých důvodů umožněno samotné měření tepelného komfortu.

Pro účely průzkumu stávajícího stavu čistého skladu a přilehlých čistých prostor bylo nutné vypracovat dotazník tak, aby co nejlépe zachycoval analyzované prostředí a specifika čistého prostoru. Příklady modelových otázek, kterými byl tento dotazník inspirován jsou uvedeny v americké normě ASHRAE 55 z roku 2013 [30].

Vzhledem k tomu, že čisté prostory laboratoří jsou využívány zejména cizinci, dotazník byl sestaven v anglickém jazyce a pro vyhodnocení byly odpovědi přeloženy do českého jazyka. Dotazník sestavený pro účely subjektivního hodnocení tepelného komfortu v čistých prostorách laserového centra je v Příloze č. 1.

Pro analýzu jednotlivých místností a porovnání výsledků s výsledky měření tepelného komfortu bylo nutné hned na začátek dotazníku zařadit otázku týkající se umístění pracovního místa respondenta. Odpovědi umožňovaly výběr ze všech užívaných laboratoří a místností čistých prostor. Z důvodu porovnání výsledků s měřením tepelného komfortu bylo přistoupeno ke sloučení místností L1 a L2 do jedné odpovědi.

V otázkách 2–5 byly uživatelé dotazováni na jejich obecné vnímání tepelně-vlhkostního prostředí, stupeň pracovní aktivity a použité pracovní oblečení. Volba odpovědí na otázku 4 týkající se vnímání teploty na pracovišti byla rozdělena do sedmibodové stupnice tak, aby vyhodnocení umožnilo interpretaci podle ukazatele PMV dle ČSN EN ISO 7730. Jednotlivé odpovědi byly ohodnoceny následujícím způsobem [28]:

3	2	1	0	-1	-2	-3
Hot	Warm	Slightly Warm	Neutral	Slightly Cool	Cool	Cold
Horko	Teplo	Mírně teplo	Neutrální	Mírně chladno	Chladno	Zima

Výsledná hodnota PMV umožňuje výpočet předpokládaného procenta nespokojených (PPD) podle již dříve uvedeného vzorce (9) [28]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0{,}03353 \cdot PMV^4 - 0{,}2179 \cdot PMV^2)} \quad [\%] \qquad (9)$$

Stejné hodnocení je použito i pro analýzu vnímání vlhkosti v jednotlivých místnostech a odpovědi z dotazníku byly číselně ohodnoceny tímto způsobem:

3	2	1	0	-1	-2	-3
Very Dry	Dry	Slightly Dry	Neutral	Slightly Humid	Humid	Very Humid
Velmi sucho	Sucho	Mírně sucho	Neutrální	Mírně vlhko	Vlhko	Velmi vlhko

Cílem otázek 6–9 bylo zachycení případného sníženého komfortu osob, jeho možného zdroje, časového výskytu a případně nutnost uživatelů přizpůsobit se vnitřnímu prostředí. Přizpůsobení se aktuálnímu stavu prostředí bývá v budovách jednou z možností snížení potřeby energií a poslouží jako rychlé řešení pro dosažení vyššího tepelného komfortu. Tam, kde jsou tepelně-vlhkostní podmínky prioritně udržovány podle požadavků instalovaných technologií, může být přizpůsobení se prostředí jedinou možností, jak v takovém prostředí zajistit pocit pohody.

V otázkách 10 a 11 byli uživatelé dotázání, zda je pro ně stávající tepelně-vlhkostní prostředí vyhovující či by ho chtěli změnit. Předpokladem je, že odpovědi na tyto otázky by měly odpovídat odpovědím na otázky 4 a 5.

Vzhledem k tomu, že vnímání vnitřního prostředí je závislé např. na aktivitě, věku, pohlaví nebo psychickém stavu jedince, do dotazníku byly zařazeny otázky týkající se psychické a fyzické náročnosti práce a také demografické otázky věku a pohlaví uživatelů laboratoře. Při malému počtu respondentů jsou tyto otázky spíše informativního charakteru a vyhodnocení podle těchto parametrů není relevantní.

Součástí dotazníku záměrně nebyla otázka na délku pobytu v čistém prostoru, protože každý uživatel laboratoře je povinen udělat bezpečnostní přestávku nejpozději po 2 hodinách práce. Zároveň v dotazníku nebyly otázky, které by zjišťovaly, zda uživatelé laboratoře si mohou nastavit hodnoty teploty nebo relativní vlhkosti v místnosti, protože řídící systém vzduchotechniky toto neumožňuje a v místnostech nejsou umístěny žádné regulátory teploty a vlhkosti pro uživatele.

Dotazník byl pro snazší distribuci mezi respondenty vytvořen pomocí online nástroje Google Forms, který umožňuje vyplnění dotazníku a sběr odpovědí. Dotazník byl rozeslán všem uživatelům laboratoří (cca 28 osob) ve stejném týdnu, kdy probíhalo měření tepelného komfortu, aby bylo možné porovnat výsledky získané z dotazníků i z měření.

2.7.3.3 Vyhodnocení dotazníků a diskuze

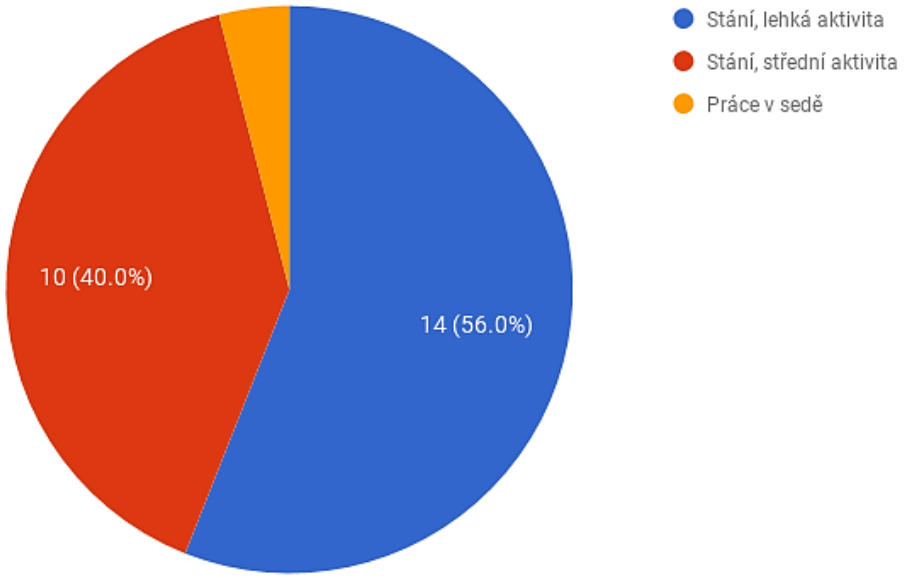
Dotazníky vyplnilo celkem 25 (89,3 %) uživatelů čistých prostor z celkového počtu 28 oslovených osob. Zbylé osoby nevyplnily dotazníky převážně z toho důvodu, že v čistých prostorách již nepracují nebo jen velmi zřídka. Z celkového počtu respondentů 20 osob obvykle pracuje v místnosti L1 nebo L2, 4 osoby pracují v místnosti L3 a jedna osoba uvedla, že pracuje v prostoru čistého skladu L4. Žádná osoba neuvedla, že by pracovala primárně v místnosti metrologie. Tyto výsledky odpovídají skutečnému provozu, kdy nejvíce osob pracuje v laserových laboratořích L1 a L2 a dále potom v laboratoři L3. Naopak místnost L4 je využívána pouze malým počtem osob i s ohledem na plánovanou rekonstrukci pracoviště a přesunu některých přístrojů a materiálů na nové místo. Místnost metrologie je podle pozorování a informací získaných během návštěv centra využívána pouze příležitostně v souvislosti s pobytem v laboratořích L1 a L2.

Nerovnoměrné rozložení počtu respondentů v jednotlivých místnostech znemožňuje objektivní porovnání místností mezi sebou. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k vyhodnocení jednotlivých otázek pro celý čistý prostor kromě otázek 4 a 5, kde výsledky

jednotlivých místností slouží ke srovnání s výsledky měření tepelného komfortu. Nicméně u všech otázek bylo sledováno, zda je rozložení odpovědí v jednotlivých místnostech podobného charakteru a zda významně nepřevažují v jednom prostoru jiné odpovědi než u ostatních místností. Z důvodu absence respondentů z místnosti metrologie nebylo možné v této místnosti provést vyhodnocení subjektivního hodnocení tepelného komfortu.

Většina respondentů na otázku č. 2 odpověděla, že pod pracovní kombinézou nosí kombinaci kalhot s tričkem či košilí s dlouhým (28 %) nebo krátkým rukávem (60 %). Pouze 8 % uživatelů uvedlo, že má na sobě teplejší oblečení (např. svetr) a 4 % obléká pouze tričko/košili s krátkým rukávem a šortky. Z těchto výsledků je možné říci, že většina uživatelů obléká malý počet vrstev oblečení a další snížení počtu vrstev z důvodu vyšší teploty není příliš možné. Nošení šortek není zejména v zimním období předpokládáno a u žen nošení sukní není vzhledem k pracovní kombinéze příliš použitelné. Řešením samozřejmě může být i převlékání se v šatnách do lehčího oblečení před vstupem do čistého prostoru. Na druhou stranu právě vrstva oblečení významně napomáhá k zachycení velkého množství částic, které se uvolňují z lidské pokožky a nahrazení např. kalhot šortkami by mohlo negativně ovlivnit výši koncentrace částic v čistém prostoru [2]. Z vyhodnocení otázky č. 3 v Graf 7 vyplývá, že 96 % osob při práci stojí a vykonává lehkou (56 %) či střední aktivitu (40 %).

Graf 7 – Rozložení odpovědí na otázku č. 3



Odpovědi na 4. otázku o vnímání teploty byly rozděleny podle místností a číselně ohodnoceny dle výše zmíněné sedmibodové stupnice a ze získaných hodnot byl spočítán

aritmetický průměr. Výsledkem je hodnota ukazatele PMV, která představuje průměrný tepelný pocit člověka v analyzovaném prostoru. Následně byl vypočítán ukazatel PPD a příklad výpočtu PPD pro PMV = 1 je uveden níže.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0{,}03353 \cdot PMV^4 - 0{,}2179 \cdot PMV^2)} \quad [\%]$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0{,}03353 \cdot 1^4 - 0{,}2179 \cdot 1^2)} \quad [\%]$$

$$PPD = 26{,}11\ \%$$

Stejný postup vyhodnocení byl opakován i u otázky č.5 o vnímání vlhkosti v pracovním prostředí. Tento postup použití výpočtů PMV a PPD pro hodnocení vlhkosti není v souladu s ČSN EN ISO 7730, nicméně sedmibodová stupnice vhodně poslouží k vyhodnocení průměrného vnímání vlhkosti v místnosti. Výsledky hodnocení vnímání tepelně – vlhkostního prostředí pro všechny analyzované místnosti jsou uvedeny v Tabulce 28.

Výsledky ukazují, že ve všech místnostech je tepelné prostředí vnímáno jako mírně teplé a se stávajícím stavem tepelné pohody je nespokojených téměř čtvrtina uživatelů. Oproti tomu průměrné vnímání výše vlhkosti je v místnostech L3 a L4 neutrální a v místnosti L1/L2 je prostředí hodnoceno jako mírně suché. Procento nespokojených osob je velmi nízké. Z výsledků je navíc velmi dobře vidět, že při PMV = 0 je 5 % osob nespokojených [28].

Tabulka 28 – Výsledky vyhodnocení tepelně-vlhkostního prostředí v jednotlivých místnostech

Místnost	**PMV**	**PPD**	**PMV(vlhkost)**	**PPD(vlhkost)**
[-]	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
L1(a L2)	0,9	22,10 %	0,4	8,33 %
L3	1,0	26,12 %	0,0	5,00 %
L4	1,0	26,12 %	0,0	5,00 %
Metrologie	-	-	-	-

Největší příčinou sníženého komfortu uživatelů je dle výsledků příliš vysoká teplota, kterou označilo 11 respondentů. Mezi dalšími zdroji diskomfortu je nízká vlhkost a vysoká rychlost proudění vzduchu (každé označilo 6 osob). Zajímavé je, že pouze 4 osoby označily, že zdrojem diskomfortu je používání předepsaného oblečení = čistých kombinéz. Z hodnocení vyplývá, že zdroje nepohody jsou problémem spíše kontinuálního charakteru než výskytu ve specifickém časovém období. Může to být dáno zejména tím, že vnitřní prostředí je celoročně udržováno téměř konstantní.

Více než polovina (56 %) respondentů uvedla, že před vstupem do čistého prostoru nebo po jeho opuštění má zvýšený příjem tekutin oproti běžnému stavu. Právě pocit žíznivosti či sucha v ústní dutině je jedním z důsledků nízké hodnoty relativní vlhkosti v prostoru. Nutnost zvýšeného doplňování tekutin může být způsobena i nedostatkem tekutin při práci v čistém prostoru.

Jak již bylo zmíněno, dle provozního řádu pro uživatele laboratoří jsou pracovníci povinni minimálně každé dvě hodiny udělat povinnou přestávku a čistý prostor opustit. Trochu překvapivé je, že 40 % respondentů odpovědělo, že snížený pocit pohody vede k opuštění pracoviště a absolvování přestávky dříve než podle nařízení. Téměř třetina (28 %) uživatelů laboratoří je nucena odložit vrstvu oblečení, aby u nich byl dosažen pocit tepelné pohody. Zajímavé je, že 4 osoby uvedly zvýšenou nemocnost způsobenou prací v čistém prostoru. Tuto souvislost samozřejmě není možné bez dalšího ověření potvrdit, nicméně je možné, že na některých pracovištích vysoká výměna vzduchu způsobuje pocit průvanu a u citlivějších jedinců může vést i k nachlazení. Zároveň nižší relativní vlhkost v prostoru vede k vysoušení ústní dutiny, očí nebo sliznic a je možné, že se tím pravděpodobnost nachlazení vlivem tohoto oslabení organismu zvyšuje. Čtyři osoby také uvedly, že nutnost používání ochranných brýlí snižuje jejich pocit spokojenosti, ať už z důvodu zhoršení vizuálních podmínek či vyšší náchylnosti ke zvýšené podrážděnosti očí.

Největší nevýhodou práce v čistém prostoru byl určen nedostatek denního světla a kontakt s okolním prostředím, který uvedlo 52 % dotázaných. Vzhledem k tomu, že psychický stav člověka má podstatný vliv na celkové vnímání prostředí, může být nedostatek denního světla či kontaktu s okolním prostředím stěžejní příčinou nespokojenosti osob a i vnímání např. tepelného komfortu tímto může být negativně ovlivněno. Téměř třetina uživatelů uvedla, že největší nevýhodou pobytu v čistém prostředí je nižší tepelný komfort (32 %) a závislost nastavení teploty a vlhkosti na použitých technologiích, a ne podle potřeby pracovníků (28 %).

Pozoruhodné je, že pouze tři osoby uvedly jako hlavní z příčin nespokojenosti nutnost užívání čistého pracovního oděvu, který může být pro mnohé značně omezujícím faktorem. Stejný počet osob také uvedl, že negativně vnímají udržování stejné teploty a vlhkosti v průběhu celého roku bez závislosti na venkovních podmínkách. Právě toto může být naopak výhodou pobytu v čistých prostorách, protože např. v běžných kancelářích i přes snahy o dodržování správných zásad navrhování může být prostor častěji přehříván

nebo nevytápěn na požadovanou vnitřní teplotu. Příliš vysoký rozdíl teploty v pobytových místnostech vzhledem k venkovním podmínkám však může mít negativní dopad na zdraví člověka.

Polovina (52 %) dotázaných uvedla, že by ráda snížila teplotu na nižší hodnotu, než mají nyní. Polovina uživatelů také považuje stávající úroveň relativní vlhkosti za nízkou, ale její zvýšení požaduje pouze 20 % dotázaných. Uživatelé jsou si pravděpodobně dobře vědomi, že zvýšená vlhkost může mít negativní dopad na procesy v laserových laboratořích, při kterých je nutné eliminovat riziko kondenzace.

Rozdíly v hodnocení a vnímání prostředí mezi uživateli jsou nejlépe vidět u odpovědí na otázky 12 a 13. I když je možné říci, že všichni pracovníci provádí podobné úkony a tedy by měli být zatíženi podobnou fyzickou i psychickou náročností, výsledky ukazují na odlišnosti v hodnocení. Zatímco 48 % uživatelů vnímá práci v čistém prostoru jako fyzicky náročnou, 52 % ji považuje naopak jako fyzicky nenáročnou a hodnocení práce jako psychicky náročné uvedlo již jen 36 % osob.

Při vyhodnocování dotazníku nebyly zaznamenány výrazné odlišnosti v odpovědích v jednotlivých místnostech. Rozdíly mezi vnitřním prostředím v jednotlivých místnostech není možné z výsledků příliš určit z důvodu malého počtu respondentů a jejich nerovnoměrnému rozdělení v místnostech.

2.7.3.4 Zhodnocení a porovnání výsledků s měřením tepelného komfortu

Z vyhodnocení dotazníků vyplývá, že většina pracovníků je nucena přizpůsobit své chování stávajícímu vnitřnímu prostředí. Mezi největší problémy, které uživatelé laboratoří pociťují, patří mírně vyšší teplota a nižší vlhkost. Právě teplotu vzduchu by nejraději snížila většina uživatelů laboratoře. Subjektivní hodnocení ukázalo, že i přes sníženou tepelnou pohodu je největší nevýhodou pobytu v čistých prostorách nedostatek denního světla a kontaktu s okolím.

Porovnání výsledků měření tepelného komfortu s výsledky vyhodnocení dotazníků není vzhledem k malému počtu respondentů úplně relevantní. Nicméně výsledky uvedené v Tabulce 29 ukazují, že i když ukazatelé PMV a PPD získané metodou subjektivního hodnocení pomocí dotazníků dosahují dvojnásobných hodnot než hodnoty získané měřením,

slovní hodnocení by pro oba výsledky zůstalo stejné a průměrný tepelný pocit uživatele prostoru (PMV) je mírně teplo.

Tabulka 29 – Porovnání ukazatelů PMV a PPD získaných z měření tep. komfortu a z dotazníků

	Měření tepelného komfortu			**Vyhodnocení pomocí dotazníků**		
Místnost	**PMV**	**PPD**	**Slovní vyhodnocení**	**PMV**	**PPD**	**Slovní vyhodnocení**
[-]	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
L1(a L2)	0,45	9,20 %	Mírně teplo	0,9	22,10 %	Mírně teplo
L3	0,51	10,40 %	Mírně teplo	1,0	26,12 %	Mírně teplo
L4	0,33	7,20 %	Mírně teplo	1,0	26,12 %	Mírně teplo
Metrologie	0,19	5,80 %	Mírně teplo	-	-	-

Průzkum pomocí dotazníků oproti naměřeným hodnotám přinesl detailnější informace o výskytu a možných zdrojích místního diskomfortu a nutnosti adaptace uživatelů na vnitřní prostředí. Nevýhodou subjektivního hodnocení je jeho závislost na odpovědích dotazovaných a jejich psychickým a fyzickým stavem, pohlavím nebo věkem. Kombinace objektivního a subjektivního hodnocení se tak stává v mnoha případech nejlepším řešením analyzování vnitřního prostředí.

2.8 Vyhodnocení stávajícího stavu

Analýza současného stavu ukázala, že všechny prostory splňují podmínky třídy čistoty ISO 7. Koncentrace částic zejména v místnosti L4 a metrologie dosahují tak nízkých hodnot v porovnání s limitními, že by pravděpodobně mohly splnit i požadavky pro vyšší třídu čistoty ISO 6 bez nutnosti instalace nového vzduchotechnického systému za předpokladu dodržování doporučených provozních podmínek čistého prostoru. Stávající vzduchotechnická jednotka udržuje vyšší teplotu a nižší relativní vlhkost, než by bylo pro pobyt osob optimální. Je to dáno tím, že místnosti byly původně navrženy pouze jako pomocné prostory hlavní laserové haly, ale v současnosti se používají i jako laboratoře, kde jsou instalovány laserové technologie, které produkují značný zisk. Zároveň je z důvodu těchto technologií a přítomnosti neizolovaných pomocných systémů např. chlazení nutné minimalizovat riziko kondenzace právě udržováním relativní vlhkosti na nižších hodnotách než 55 % v závislosti na teplotě v místnosti.

3 Koncepce návrhu přeměny

3.1 Cíl koncepce

Cílem koncepce je navržení několika možností řešení přeměny skladu v čisté prostředí optické laboratoře s následným zhodnocením a výběrem nejoptimálnější varianty, která by měla splňovat požadavky na čistotu prostředí, ale i tepelně-vlhkostní podmínky pro instalované technologie a pobyt uživatelů. Součástí koncepce je i navržení doporučení pro pobyt uživatelů a údržbu prostoru, která povedou k úspěšnému provozu nového prostoru. Koncepce by měla sloužit jako podklad pro rozhodnutí laserového centra o nejvhodnější možnosti řešení.

3.2 Definování podmínek návrhu

3.2.1 Charakteristika nového provozu

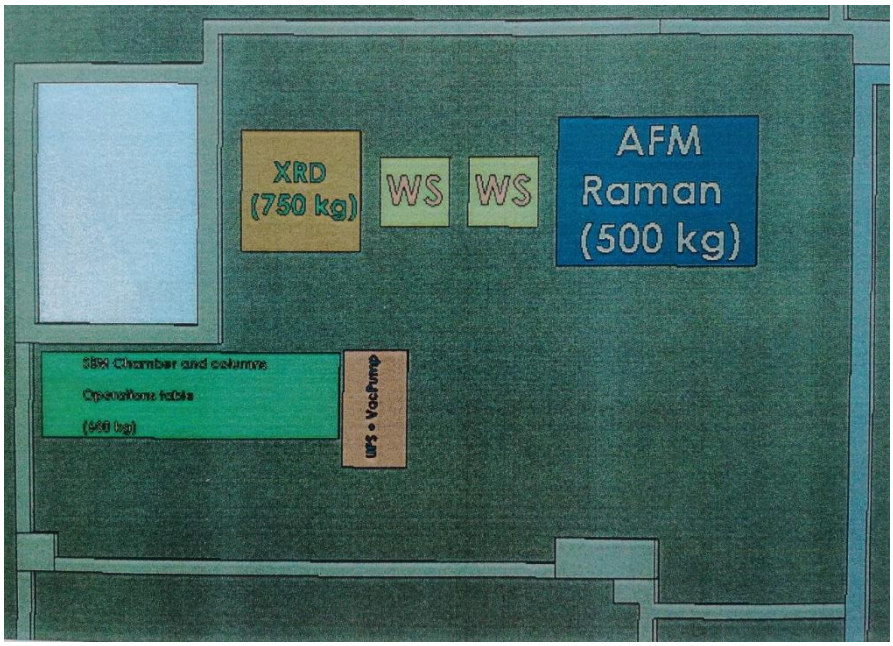
3.2.1.1 Využití

Cílem přeměny je v místnosti L4, která je nyní využívaná jako čistý sklad a občas jako laserová laboratoř, vytvořit takové podmínky, aby místnost mohla být používána jako optická laboratoř. Místnost bude využívána v době od 8:00 do 22:00 stejně jako ostatní části objektu. V optické laboratoři budou instalovány tři přístroje, které pro svůj provoz vyžadují udržování určitého tepelně-vlhkostního prostředí. Tyto přístroje budou blíže popsány níže v další kapitole. Je očekáváno, že u každého přístroje budou pracovat 1-2 lidé, a tedy celkový počet uživatelů laboratoře může být současně až 6 pracovníků. Dále byl zadán požadavek na zvýšení třídy čistoty ze současné třídy ISO 7 na ISO 6.

3.2.1.2 Instalované přístroje

V místnosti budou pravděpodobně instalovány tři následující přístroje: XRD, SEM a AFM RAMAN. Uvedené přístroje mají různé požadavky na udržování tepelně-vlhkostního prostředí pro zajištění jejich správné funkčnosti, a proto je nutné stanovit takové návrhové vnitřní podmínky, aby vyhověly všem přístrojům. Informace o jednotlivých přístrojích byly

poskytnuty laserovým centrem HiLASE stejně jako schéma možného rozmístění přístrojů, které je na Obrázku 27.



Obrázek 27 – Schéma možného rozmístění přístrojů (podklady HiLASE)

A) XRD

Přístroj má pod maximálním zatížením celkový příkon 2,5 kW a skládá se z technologie o příkonu 1 kW a počítače s příkonem 1,5 kW. Přístroj vyžaduje udržování relativní vlhkosti v místnosti do 70 % a teploty v rozmezí 10–25 °C. Teplota v místnosti by měla být udržována s přesností ±2 °C (12 ±2 °C – 23 ±2 °C). Dále je požadováno instalování rozvodu vody s tlakem 0,25 – 0,34 MPa o teplotě <25 °C a určité požadované kvalitě.

B) SEM

Celkový příkon systému je 1,1 kW. Teplota v místnosti by měla být udržována v rozmezí 17–24 °C se stabilitou ±1 °C a relativní vlhkost by měla být do 80 %. Systém vyžaduje dodávku stlačeného vzduchu o tlaku 600–800 kPa a dusíku o tlaku 150–500 kPa.

C) AFM RAMAN

Celkový příkon systému je 3 kW. Požadavkem je udržovat teplotu prostoru v rozmezí 15–25 °C s přesností ±1 °C a relativní vlhkost do 80 %.

Všechny přístroje mají zvýšené požadavky na omezení vibrací, elektromagnetické a elektrostatické pole a před jejich umístěním je nezbytné provést příslušná měření. Z důvodu vysoké hmotnosti přístrojů je dále nutné posoudit únosnost podlahy a případně

instalovat roznášecí desku. Návrh řešení pomocných rozvodů chlazení, vody a plynů není předmětem této práce, na tyto systémy nebyly stanoveny požadavky a budou řešeny samostatným projektem. Předpokladem je, že instalovaný systém chlazení v ostatních laboratořích bude rozšířen i do místnosti L4. Všem přístrojům je nutné zajistit přívod elektrické energie podle požadavků. Vzhledem k charakteru provozu laboratoře lze pro návrh předpokládat, že přístroje budou mít vysoký koeficient současnosti kolem 0,7 - 0,8.

Výše uvedené parametry jednotlivých přístrojů se mohou lišit podle výrobce přístroje a slouží pouze jako orientační podklad pro definování podmínek pro návrh řešení, protože výrobce nebyl v době zpracování práce znám. V případě skutečného návrhu je nutné přesně znát instalovaný typ přístroje a jeho parametry.

3.2.1.3 Třída čistoty

Podstatnou změnou při přeměně čistého skladu je zvýšení třídy čistoty ze současné třídy ISO 7 na třídu ISO 6 dle ČSN EN 14644-1, která je požadována laserovým centrem. Pro provoz optické laboratoře není vyšší třída čistoty podle informací výrobců nezbytně nutná, nicméně vyšší třída čistoty může napomoci dosáhnutí lepších výsledků při výzkumu.

3.2.2 Vnitřní prostředí (Tepelně-vlhkostní prostředí)

3.2.2.1 Teplota

Požadovaná teplota v místnosti by z důvodu instalovaných technologií měla být udržována v rozmezí 17–24 °C se stabilitou ±1 °C. Vzhledem k tomu, že rozmezí teplot vhodných pro provoz technologií je velké, bude návrhová teplota přizpůsobena požadavkům pro pobyt osob. Podle výsledků z průzkumu, který poukázal na požadavek udržování nižší teploty v místnostech než současných 22 °C, a zároveň podle požadavků třídy práce IIa zohledňující aktivitu a užívaný oděv osob by měla být teplota udržována na 20 °C.

3.2.2.2 Vlhkost

Relativní vlhkost by podle požadavků instalovaných přístrojů neměla přesáhnout 70 %, nicméně z důvodu rizika kondenzace na součástkách nebo pomocných systémech jako např. chlazení o teplotě přívodního chladiva 11 °C je nutné vlhkost udržovat mnohem nižší,

maximálně do 50–55 % v závislosti na teplotě v místnosti, aby se zamezilo riziku kondenzace. Přístroje nepožadují přesné udržování vlhkosti, pouze by změna vlhkosti neměla v kratším časovém období překročit 10 %. Jako ideální je v tomto případě považováno dosažení relativní vlhkosti kolem 45 %. Z důvodu nutného zvlhčování v zimním a odvlhčování v letním období je povolené rozmezí relativní vlhkosti stanoveno na 40–55 %.

3.2.2.3 Výpočet tepelných zisků pro návrh VZT jednotky

Pro výpočet tepelného zisku nebyly uvažovány tepelné zisky z vnějšího prostředí, protože místnost není v kontaktu s vnějším prostředím a v přilehlých místnostech je teplota udržovaná na stejné nebo velmi podobné hodnotě.

A) Od osob

Místnost bude podle předpokladu využívat maximálně 6 osob, převážně mužů. Práce v laboratoři je zařazena do kategorie IIa, pro kterou je předpokládán pro jednu osobu metabolický výdej 93 W/m^2 a při 20 °C je produkce citelného tepla 96 W a produkce vodní páry 95 g/h [40].

B) Od svítidel

V místnosti je dle informací z centra HiLASE a vlastního pozorování instalován celkem 5 zářivkových svítidel délky 1200 mm s dvěma LED trubicemi o příkonu 22 W/trubici. Pro výpočet tepelného zisku lze uvažovat, že se celý příkon svítidel mění v teplo. Z důvodu absence postupného spínání osvětlení a umístění odvodních prvků vzduchotechniky není možné hodnotu příkonu pro výpočet snížit. V případě zvýšených nároků na intenzitu osvětlení v optické laboratoři bude nutné zvýšit počet stropních svítidel nebo zajistit instalování lokálních svítidel dle požadavků.

C) Od technologií

V místnosti je uvažováno umístění výše zmíněných tří přístrojů o předpokládaném celkovém maximálním příkonu 6,6 kW. S ohledem na charakter provozu, kdy je předpokládána vysoká současnost užívání přístrojů, lze uvažovat koeficient současnosti roven 0,80. Neočekává se, že přístroje budou v provozu často na maximální výkon, a proto je možné snížit příkon součinitelem zatížení technologie 0,70, který uvažuje

výkonové zatížení technologie z 70 %. Není předpokládáno, že pro jednotlivá zařízení bude instalováno lokální odsávání, které by dále snížilo tepelný zisk v prostoru.

D) Od elektronického vybavení

Je možné, že k instalovaným technologiím přibydou v místnosti ještě zdroje tepla v podobě malých přenosných počítačů, které uživatelé používají při práci. Vzhledem k počtu tří přístrojů byla uvažována přítomnost celkem tří počítačů. Provoz počítačů bude vázaný na provoz optických technologií a pro výpočet byly použity stejné koeficienty současnosti a zatížení.

Tabulka 30 – Výpočet tepelných zisků z vnitřních zdrojů

Tepelný zisk	**Zdroj**	**Jednotkový zisk**	**Počet ks**	**Celkový zisk**
[-]	**[-]**	**[W]**	**[-]**	**[W]**
Od osob	**Osoba**	96	6	**576**
Od svítidel	**Svítidlo**	2 x 22	5	**220**
Od technologií	**XRD**	2500	1	2500
	SEM	1100	1	1100
	AFM RAMAN	3000	1	3000
	Zohlednění současnosti a zatížení technologie	0,8 x 0,7		**3696**
Od elektronického vybavení	**Počítač**	75	3	225
	Zohlednění současnosti a zatížení vybavení	0,8 x 0,7		**126**
Celkový tepelný zisk z vnitřních zdrojů				**4618**

Tepelné zisky analyzovaného prostoru se v průběhu roku nemění s ročním obdobím a jejich hodnota je závislá na tepelném zisku z vnitřních zdrojů, tedy na obsazenosti místnosti a technologiích, které jsou zrovna v provozu.

3.2.2.4 Výpočet tepelných ztrát pro návrh VZT jednotky

Tepelné ztráty místností byly vzhledem k nezměněným podmínkám převzaty z poskytnuté projektové dokumentace a shodují se s hodnotami, které jsou uvedené v kapitole 2.5.3. Hodnoty tepelné ztráty jsou v porovnání s celoročními tepelnými zisky prostoru téměř zanedbatelné a pro návrh bude rozhodující letní stav.

3.2.3 Vstupní podmínky návrhu

V následující Tabulce 31 jsou shrnuty vstupní podmínky pro návrh optické laboratoře. Je pravděpodobné, že v zimním období bude relativní vlhkost udržována spíše na nižší hranici uvedeného rozmezí a v letním období naopak. Relativní vlhkost je nutné udržovat tak, aby nedocházelo ke kondenzaci na přístrojích a pomocných systémech. Počet výměn vzduchu byl stanoven podle vlastního uvážení na základě výsledků průzkumu a informací získaných z odborné literatury. Návrh řešení by v ideálním případě neměl příliš ohrozit provoz čistých prostor, protože omezení provozu by vedlo ke zpoždění výzkumu a případné finanční ztrátě.

Tabulka 31 – Vstupní podmínky návrhu optické laboratoře

Parametr	**Požadovaná hodnota**
[-]	**[-]**
Třída čistoty	ISO 6
Výměna vzduchu	30–40 h^{-1}
Teplota	20 °C ±1 °C
Relativní vlhkost	40–50 % (max. 55 %, dle teploty)
Přetlak k nižší třídě čistoty	min. 10 Pa
Tepelná zátěž	4,618 kW
Tepelná ztráta	0,6 kW
Maximální rychlost proudění v pobytovém prostoru	0,2 m/s
Maximální množství cirkulačního vzduchu	85 %
Počet uživatelů	6
Množství čerstvého vzduchu na osobu	25–50 m^3/h

3.3 Možné varianty řešení

3.3.1 Varianta 0

Cílem této varianty je navrhnout takové řešení, které by vyžadovalo co nejméně zásahů do stávajících systémů, a tak zásadně neomezilo provoz čistého prostoru. Vzhledem k výsledkům měření koncentrace částic, které ukázaly potenciální možnost splnění požadavků pro třídu čistoty ISO 6, bylo pro tuto variantu řešení rozhodnuto, že splnění požadované třídy čistoty bude dosaženo bez úpravy vzduchotechnického systému, která by značně omezila provoz laboratoří. Požadované třídy čistoty je tak nutné dosáhnout pomocí

následujícího souboru opatření, které by měly pomoci snížit stávající koncentraci částic v prostoru a zmenšit riziko kontaminace laboratoře nečistotami.

V prostoru budoucí optické laboratoře jsou nyní skladovány nejrůznější materiály a přístroje v otevřených policích i na podlaze, které mohou být značným zdrojem nečistot, a proto by měly být z prostoru odstraněny a přesunuty do vhodnější místnosti nebo by jejich způsob skladování měl být upraven. Možným řešením je např. skladování materiálů v uzavíratelných skříních.

Dalším podstatným bodem je zvýšení frekvence úklidu místnosti, který by měl být prováděn ideálně 4–5 x týdně. Častější úklid i u ostatních místností by zvýšil čistotu celého čistého prostoru, protože vzhledem k tlakové kaskádě se nečistoty mohou dostávat z jedné místnosti do druhé. Zároveň by v místnosti L4 mělo docházet k otírání ploch stěn a stropu častěji než jednou za půl roku, tato frekvence by mohla být cca 1 x za 2–3 měsíce.

Všechny použité přístroje, zařízení a technologie musí být před vstupem do čistého prostoru řádně očištěny a všechny osoby vstupující do čistého prostoru musí použít předepsaný oděv a projít vakuovou sprchou. Za zvážení stojí požadavek na užívání roušky přes obličej, která by snížila množství částic, které jsou produkovány člověkem. Dále navrhuji, aby uživatelé čistých laboratoří používali pracovní obuv, která bude používána pouze v čistém prostoru a případně bude opatřena ještě jednorázovými návleky. Čisté kombinézy musí být v pravidelném intervalu dezinfikovány a případně nahrazeny novými. Samozřejmostí by mělo být, aby uživatelé čistého prostoru nepoužívali jakékoliv přípravky, které by zvyšovaly odlučování částic z povrchu těla. Uživatelé by měli být povinni užívat prostor pouze ve stavu způsobilém k práci a bez onemocnění, která by ohrozila kvalitu čistoty laboratoří. Zvýšená fyzická aktivita by měla být omezena na minimum a je doporučeno, aby pracovníci omezili i komunikaci. I z důvodu nutnosti komunikace je výše navrženo užívání jednorázových roušek.

Stávající vzduchotechnický systém bude v místnosti ponechán beze změn, pouze je doporučena výměna filtrů v koncových čistých nástavcích, které dosud nebyly měněny a mohly by znatelně přispět ke zvýšení čistoty prostoru. Ponechání současného množství přiváděného i odváděného vzduchu a stejných tlakových poměrů zajišťuje, že systém není nutné znovu vyregulovat a ani nedojde k ovlivnění tlakových poměrů v přilehlých prostorách. Stávající nastavení systému využívá maximálně 85 % cirkulačního vzduchu, a tedy minimálně musí být do místnosti přivedeno 15 % čerstvého vzduchu. I toto minimální

množství čerstvého vzduchu zajistí přivedení požadovaného množství čerstvého vzduchu pro pobyt osob (28,425 ≥ 25 m^3/h/os).

Požadované tepelně-vlhkostní prostředí není možné stanoveným průtokem vzduchu zajistit, protože tepelná zátěž prostoru je příliš vysoká a k jejímu odvedení z prostoru by bylo nutné přivádět vzduch s teplotou o cca 12 °C nižší, která je z hlediska tepelné pohody uživatelů nepřípustná. Zároveň by stoupající teplota v místnosti vlivem narůstající tepelné zátěže podle technologií v provozu nevyhověla požadované tepelné stabilitě místnosti. Pravděpodobně není možné nijak snížit tepelné zisky od přístrojů, které tvoří největší procento tepelných zisků z vnitřních zdrojů. Jednou z možností by mohlo být instalování přímého chlazení zařízení, které by neumožnilo předávání tepla do prostoru nebo ho alespoň značně snížilo. Tato možnost je závislá na výrobci instalované technologie a není možné s ní v této fázi návrhu počítat. Udržování vlhkosti v rozmezí 40–55 % by stávajícím vzduchotechnickým systémem bylo zajištěno. V letním období při maximálních teplotách je nutné pro zajištění požadované vlhkosti používat směšovací poměr s vysokým procentem cirkulačního vzduchu.

Tato varianta řešení by vyžadovala instalování čidla teploty v místnosti L4 a upravení systému regulace tak, aby vzduchotechnická jednotka byla řízena podle teploty v místnosti L4. Zároveň by mělo být ošetřeno, že teplota v ostatních místnostech stejného vzduchotechnického systému bude v době nečinnosti v místnosti L4 (nízké tepelné zátěži a technologiích mimo provoz) řízena podle stávajícího váhového poměru místnosti L3 a metrologie.

Bez odvedení tepelných zisků přímými chladiči technologií nebo jejich výrazného poklesu, např. snížením počtu instalovaných přístrojů nebo změnou jejich typu, není tato varianta z výše zmíněných důvodů přijatelná.

3.3.2 Varianta 1

Z výše zmíněných důvodů bylo nutné navrhnout řešení, které by zajistilo požadovanou teplotu v místnosti a její stabilitu. Řešením pro tuto variantu je instalování cirkulační jednotky s chlazením do podhledu místnosti. Požadovaná čistota prostředí bude v této variantě dosažena jednak pomocí souboru opatření zmíněných ve Variantě 0, které by však

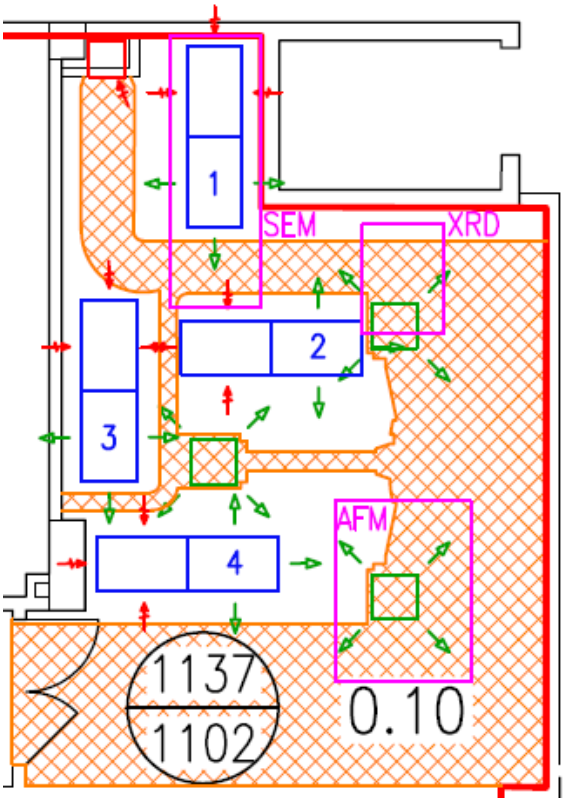
měly být standardními pro provoz čistého prostoru této třídy čistoty, a zároveň pomocí zvýšení výměny vzduchu cirkulační jednotkou a přívodem upraveného vzduchu přes filtraci.

Cirkulační jednotka v provedení pro čisté prostředí nasává vzduch z místnosti, ten prochází přes filtrační vložku třídy M5, následně je chlazen vodním chladičem na požadovanou teplotu, nasáván ventilátorem s EC motorem a přes filtr třídy H13 je přiváděn zpět do místnosti. Chlazení vzduchu musí být zajištěno pomocí bezkondenzačního chlazení, proto je chladič vybaven směšovacím uzlem. Regulace se provádí pomocí čidla teploty rosného bodu, čidla teploty vzduchu v místnosti a kondenzačního čidla [41].

Tepelná zátěž prostoru odvedená stávajícím systémem vzduchotechniky je 1148 W (pro 1137 m^3/h, Δt = 3 °C) a pro celkový tepelný zisk 4618 W je nutné upravit cirkulační jednotkou 3435 m^3/h vzduchu na teplotu o 3 °C nižší než je teplota v místnosti a tím zajistit odvod zbývající zátěže o velikosti 3470 W. Návrhová teplota přívodního vzduchu 17 °C bude stejná pro cirkulační i stávající jednotku.

Vzhledem k vysokému množství cirkulačního vzduchu v porovnání s množstvím přiváděného vzduchu stávajícím systémem a umístění přívodu a odvodu vzduchu v cirkulační jednotce vedle sebe dojde k výraznému ovlivnění proudění vzduchu v místnosti. Instalací jednotky může dojít ke zvíření částic v prostoru, a proto je nutné jednotku umístit tak, aby víření vzduchu bylo co nejvíce eliminováno. Umístění jednotky do podhledu je podstatně omezeno stávajícím vzduchotechnickým systémem a pro přesné umístění je nutné provést průzkum skutečného provedení instalace. Předběžné možnosti umístění cirkulační VZT jednotky byly navrženy podle poskytnuté projektové dokumentace a jsou zobrazeny na Obrázku 28. Šrafou je vyznačena zóna, kde není možné umístění jednotky v podhledu. Dále je na obrázku vyznačeno přibližné předpokládané umístění optických technologií.

Jako nejoptimálnější se jeví umístění na čtvrté pozici, kde je nasávání vzduchu orientováno směrem ke dveřím, tedy dostatečně daleko od pracovní zóny s technologiemi, a přívod vzduchu je umístěn směrem do prostoru, kde jsou lokalizovány dva největší zdroje tepla. Nevýhodou této pozice je, že při umístění nasávání v blízkosti dveří by vlivem přetlaku z chodby do místnosti jednotka mohla nasávat více vzduchu z chodby přes netěsnosti kolem dveří a tím i případné nečistoty.



Obrázek 28 – Čtyři možnosti umístění cirkulační jednotky v podhledu

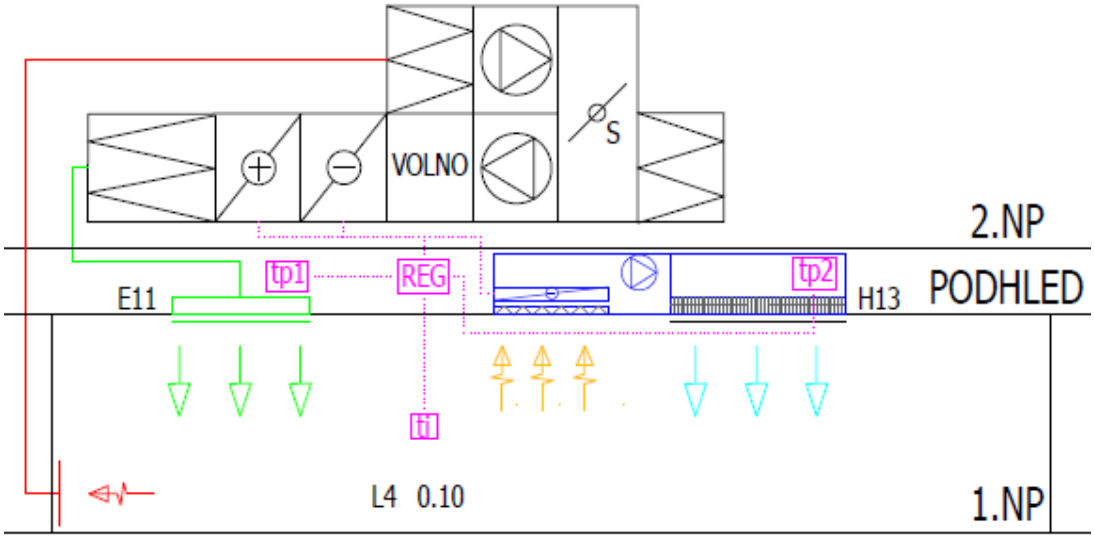
Jednotka může být samozřejmě instalována i pod podhled, nicméně toto umístění by ještě více ovlivnilo proudění vzduchu v místnosti a také by se vytvořila místa, která by byla nedostatečně vymývána proudícím vzduchem a obtížně čistitelná při úklidu. Pro zvolení umístění jednotky doporučuji provést simulaci proudění vzduchu a podle výsledků vybrat variantu, která by na proudění měla nejmenší negativní dopad.

Použitá cirkulační jednotka je výrobkem, který se speciálně navrhuje podle požadavků projektu čistého prostoru. Výška celé jednotky je udávána jako 550 mm, takže při světlé výšce podhledu 550 mm by bylo umístění jednotky do podhledu nerealizovatelné, ale výšku jednotky je podle informací pravděpodobně možné snížit podle požadavků. Šířka základní jednotky je 600 mm, délka pole sání je 1000 mm a délka přívodní části s filtrem je 1000–2100 mm dle požadavků. Zároveň je možné napojit více jednotek vedle sebe a zvýšit tak výkon jednotky podle nutnosti. Jedna jednotka umožňuje úpravu maximálně 8000 m^3/h vzduchu, ale je nutné splnit požadovanou výstupní rychlost vzduchu. [41] Výkon chladiče nebyl výrobcem jednotky poskytnut, protože je chladič opět individuálně navrhován podle potřeby. Požadované průtočné množství chladící kapaliny v chladiči při výše uvedeném

množství vzduchu a rozdílu mezi teplotou přívodu a zpátečky 2 °C je 0,4 l/s. V ideálním případě by byl chladič napojen na stávající rozvody chlazení v blízkosti místnosti L4.

Při množství cirkulačního vzduchu 3435 m^3/h by výstupní rychlost z přívodního pole o velikosti 1000 x 600 mm a děrovaném plechu s volnou plochou 40 % z celkové plochy byla skoro 4 m/s. Tato rychlost je pro udržení vhodných vnitřních podmínek nepřípustná a bylo nutné ji podstatně snížit nejlépe na hodnotu podobnou výstupní rychlosti ze stávajících přívodních vyústek (=1,1m/s). Při prodloužení výstupního pole na 2000 mm je výstupní rychlost proudění 1,9 m/s a jednotku by bylo možné kvůli rozměrům umístit pouze na pozici č. 4. Druhou variantou je zvýšit šířku jednotky na dvojnásobek a prodloužit délku přívodního pole na 1,5 m a tím dosáhnout výstupní rychlosti přiváděného vzduchu 1,325 m/s, která se v porovnání se současnou rychlostí jeví jako vhodnější. Jednotku by bylo možné umístit opět pouze na pozici č. 4.

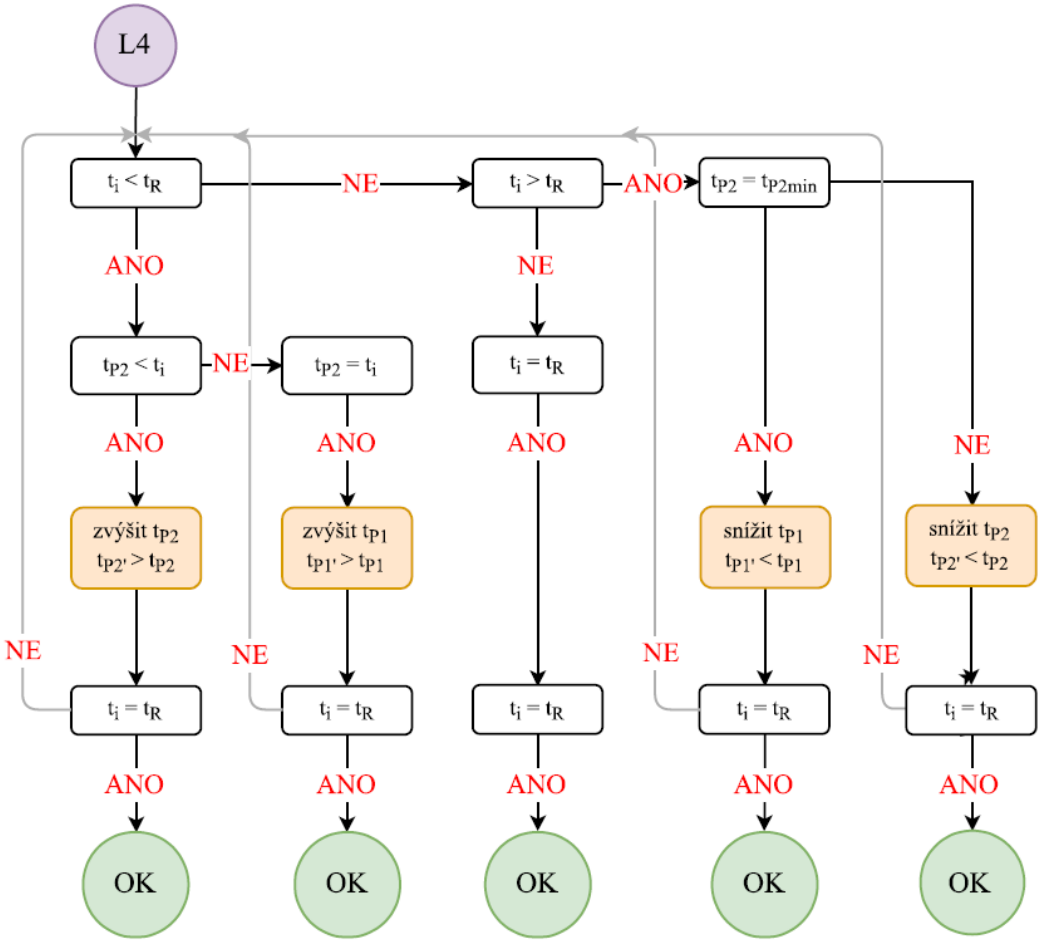
Vzhledem k tomu, že po přeměně budou vnitřní prostředí zajišťovat dvě jednotky, je nutné podle toho upravit systém regulace tak, aby nedocházelo např. k protichůdným režimům jednotek, které by vedly k neekonomickém provozu a rozdílnému vnitřnímu prostředí v prostoru. Požadavek na tepelnou stabilitu prostředí vyžaduje, aby byl celý systém řízen podle teploty v místnosti L4. V případě, že instalované technologie v době nečinnosti nepožadují tak vysokou stabilitu teploty, je možné v čase jejich nepoužívání řídit teplotu v místnostech podle stávajícího váhového rozložení teploty v místnosti L3 a metrologie. Na Obrázku 29 je zobrazeno schéma vzduchotechnického systému a schéma možné regulace teploty v místnosti a tím chodu jednotek je na Obrázku 30.



Obrázek 29 – Schéma vzduchotechnického systému pro Variantu 1

V případě, že je teplota v místnosti L4 (t_i) menší než požadovaná (t_r) a zároveň je teplota přívodního vzduchu z centrální jednotky (t_{p2}) menší než teplota v místnosti neboli cirkulační jednotka je v režimu chlazení, systém regulace vydá pokyn ke snížení chlazení na takovou hodnotu, aby byla dosažena požadovaná vnitřní teplota. Jestliže teplota přívodního vzduchu není menší (je rovna) než teplota v místnosti, cirkulační jednotka není v režimu chlazení a je nutné zvýšit teplotu přiváděného vzduchu ze stávající jednotky (t_{p1}). Tímto krokem bude samozřejmě zvýšena i teplota v ostatních místnostech, které jsou obsluhovány touto jednotkou.

Ve chvíli, kdy teplota v místnosti je větší než požadovaná a zároveň cirkulační jednotka je v provozu na maximální výkon ($t_{p2} = t_{p2min}$), je nutné snížit teplotu přiváděného vzduchu stávající jednotkou na takovou teplotu, aby bylo dosaženo požadované teploty v místnosti. Tímto pokynem ovšem dojde ke snížení teploty i v ostatních místnostech. V případě, že cirkulační jednotka nepracuje v režimu maximálního chlazení, systém vydá pokyn ke snížení teploty přívodního vzduchu z cirkulační jednotky.



Obrázek 30 – Schéma možného řešení regulace teploty v místnosti

Vzhledem k tomu, že nová regulace systému vzduchotechniky je podle požadavků místnosti L4, je nutné brát v potaz riziko příliš vysoké nebo příliš nízké teploty v ostatních pomocných místnostech. V případě opakovaného výskytu příliš vysokých nebo nízkých teplot v těchto místnostech, bude možná nutné snížit nebo zvýšit teplotu v místnosti L4 tak, aby byly stále splněny požadavky technologií a zároveň bylo zajištěno vhodnější tepelné prostředí pro pobyt osob. Z důvodu nutnosti bezkondenzačního chlazení je systém nutné vybavit čidlem rosného bodu a začlenit ho do systému regulace.

Tato varianta řešení by zajistila požadované parametry vnitřního prostředí, nicméně jsou zde také nevýhody v podobě vyšší ceny nebo ovlivnění proudění vzduchu, které je nutné zvážit. Výhodou této varianty je ponechání stávajícího vzduchotechnického systému včetně tlakových poměrů a množství přiváděného vzduchu bez nutnosti nového zaregulování a neomezení provozu v ostatních místnostech.

3.3.3 Varianta 2

Tato varianta uvažuje se zvýšením množství přiváděného vzduchu do místnosti L4 o 20 % tak, aby nedošlo k navýšení rychlosti vzduchu v potrubí nad doporučené hodnoty. Výměna vzduchu tak bude v místnosti zvýšena z 9,6 h^{-1} na 11,5 h^{-1} a tím by společně se souborem opatření doporučených ve Variantě 0 měla být zajištěna požadovaná třída čistoty ISO 6. Zároveň varianta pracuje se změnou tlakových poměrů tak, aby místnost L4 byla udržována v přetlaku o min. 10 Pa vzhledem k prostorám s nižší třídou čistoty dle požadavků ČSN EN 14641-1. Nový přetlak bude 36 Pa a tato změna ovlivní tlakové poměry v ostatních místnostech. V případě, že v těchto místnostech bude požadováno udržení stávajících tlakových poměrů, bude nutné upravit množství odváděného vzduchu podle Tabulky 32. Instalované regulátory průtoku vzduchu by měly bez problémů tento krok umožnit. Nové průtoky vzduchu potrubím pro tuto variantu jsou v Příloze č. 3.

Zvýšení množství přiváděného (i odváděného vzduchu) v místnosti L4 samozřejmě ovlivní i provoz centrální jednotky a jednotka musí zvýšit množství přiváděného vzduchu o 2 %. Vzhledem k instalovaným ventilátorům s frekvenčními měniči a jejich stávajícímu využití na cca 65 % by zvýšení nemělo být problém. Ve chvíli maximální tepelné zátěže ve všech prostorách bude nutné mírně zvýšit průtok chladící kapaliny výměníkem. Stávající zdroj tepla je naddimenzován s minimálně 10 % rezervou a opět by zvýšení průtoku nemělo způsobit potíže.

Tabulka 32 – Bilance množství vzduchu po navýšení průtoku v místnosti L4

		Vypočtený stav	
Číslo místnosti	**Název místnosti**	**Přívod vzduchu**	**Odvod vzduchu**
[-]	**[-]**	**[m³/h]**	**[m³/h]**
0.10	**Čistý sklad L4**	1370	1118
0.11	**Laserová laboratoř L3**	2081	2196
0.12	**R filtr**	399	0
0.26+0.26b	**Chodba**	4199	4195
0.28	**Metrologie**	3326	3558
0.30a	**Materiálová propusť**	801	700
Celkem zař. 6		**12176**	**11767**
Odvod vzduchu pře 0.15 a 0.16		**0**	**394**

Zvýšení přiváděného množství vzduchu zajistí odvod větší tepelné zátěže, ale pro dosažení požadovaného tepelného prostředí je nutné instalovat další systém zajišťující chlazení. V této variantě bylo zvoleno instalování chladících stropů, které by požadovaného prostředí měly dosáhnout. Výhodou stropního chlazení, resp. vytápění je dosažení téměř konstantní teploty po výšce místnosti a zamezení vzniku výrazného proudění vzduchu [42]. Velkou nevýhodou je ale riziko kondenzace na povrchu stropu, kterému je třeba zabránit vhodně zvolenými teplotami přívodu chladící vody a instalováním čidla rosného bodu. Systém se skládá se sádrokartonové desky tl. 15 mm, ve které jsou drážky pro vedení potrubí PEX tl. 8 mm a vrstvy 30 mm izolace z materiálu EPS (Obrázek 31) [42].

Obrázek 31 – Chladící panel [42]

Vzhledem k vysoké tepelné zátěži prostoru a poměrně nízkému chladícímu výkonu stropů bylo nutné nejdříve provést analýzu tepelné zátěže odváděné stávající

vzduchotechnickou jednotkou podle požadované teploty v místnosti a stanovení potřebného měrného instalovaného výkonu chladícího stropu (Tabulka 33).

Tabulka 33 – Rozložení odváděné tepelné zátěže v závislosti na požadované teplotě vnitřního prostředí

Parametr	**Jednotka**	**Teplota v místnosti**				
		20 °C	**21 °C**	**22 °C**	**23 °C**	**24 °C**
Tepelná zátěž odvedená stávající VZT jednotkou	[W]	1383,7	1844,9	2306,1	2767,4	3228,6
Zbývající tepelná zátěž	[W]	3234,3	2773,1	2311,9	1850,6	1389,4
Potřebný instalovaný výkon chladících panelů	[W/m^2]	104,7	89,8	74,9	59,9	45,0

Měrné chladící výkony jsou již spočítány pro 80 % využitelné plochy stropu, kde bude možné panely instalovat. Tato hodnota byla zvolena podle stávajícího stavu prostoru a poznatků z literatury ([42], [43], [44]) a v případě reálného návrhu by procento možného využití stropu mělo být spočítáno. Při návrhové vnitřní teplotě 20 °C je požadovaný výkon chladících panelů 104,7 W/m^2, který není možný chladícími stropy zajistit. Maximální chladící výkony stropů jsou kolem 80 W/m^2 v závislosti na použité technologii a teplotním rozdílu mezi teplotou v místnosti a střední teplotou chladící vody [42; 44]. Z tohoto důvodu je nutné zvýšit návrhovou teplotu v místnosti minimálně na 22 °C, aby bylo možné tepelnou zátěž chladícími stropy odvést.

Výpočet chladícího výkonu byl proveden podle následujícího výpočtu (10-16) [43]. Součinitel *C* a *n* byl zvolen pro sádrokartonový strop o tl. 15 mm. Součinitel tepelné zátěže K_{tz} je z důvodu absence tepelné zátěže z vnějších zdrojů roven 1. Součinitel konvekce K_k byl zvolen pro stropní vyústky jako 1,10 a poměrné obložení stropu bylo uvažováno jako 0,8.

$$q_n = C \cdot \Delta t^n \quad [W/m^2] \tag{10}$$

$$\Delta t = t_i - \frac{t_{w1}+t_{w2}}{2} \quad [°C] \tag{11}$$

$$q_{skut} = K_p \cdot q_n \quad [W/m^2] \tag{12}$$

$$K_p = K_{tz} \cdot K_v \cdot K_k \cdot K_{os} \quad [-] \tag{14}$$

$$K_v = 1{,}117 - 0{,}045 \cdot H \quad [-] \tag{15}$$

$$K_{os} = 1{,}21 - 0{,}3 \cdot a \quad [-] \tag{16}$$

Pro návrh chladících stropů se doporučuje volit teplotu přívodní vody minimálně o 1 °C vyšší, než je teplota rosného bodu, aby se zabránilo riziku kondenzace [44]. Dále také bývá

v některých zdrojích uváděno, že teplota přívodní vody by měla být nejméně 16 °C, ale toto doporučení je uváděno v souvislosti s maximální vnitřní teplotou 26 °C, která není pro návrh v optické laboratoři vyhovující. Pro optickou laboratoř je vzhledem k požadavku na nízkou vnitřní teplotu v průběhu celého roku nutné přivádět chladící vodu o nízké teplotě, aby bylo vůbec možné chladící výkon zajistit. V níže uvedené tabulce jsou zobrazeny teploty rosného bodu pro různé relativní vlhkosti, z kterých je patrné, že s rostoucí relativní vlhkostí se zvyšuje teplota rosného bodu a tím i riziko vzniku kondenzace. Výpočet chladícího výkonu byl proveden pro dvě varianty vnitřní teploty a výsledky jsou uvedeny v Tabulce 34. Pro možnost A byla zvolena teplota chladící vody 11/13 °C, která by měla odpovídat rozvodu chlazení, který je v současné době instalován v blízkosti místnosti L4. Pro možnost B byla vzhledem k vyšší teplotě a tedy i vyššímu rosnému bodu zvolena vyšší teplota chladící vody, aby nedocházelo ke kondenzaci.

Tabulka 34 – Dvě možnosti návrhu chladících panelů

Navržené možnosti	**Vnitřní teplota**	**Potřebný instalovaný výkon panelů**	**Teplota chladící vody (t_{w1}/t_{w2})**	**Rozdíl Δt**	**Rosný bod pro relativní vlhkost**			**Skutečný výkon panelů**
[-]	[°C]	[W/m^2]	[°C]	[°C]	45 %	50 %	55 %	[W/m^2]
Možnost A	22 °C	74,9	11/13	10	9,45	11,04	12,5	75,276
Možnost B	23 °C	59,9	12/14	10	10,35	11,95	13,4	75,276

Obě výše uvedené možnosti splňují požadavek na výkon chladících panelů. Z důvodu možnosti využití stávajících rozvodů chlazení vody o teplotě 11/13 °C a zajištění nižší teploty v místnosti se jeví jako vhodnější možnost A. Z výše uvedené tabulky je zřetelné, že hodnota relativní vlhkosti by se měla pohybovat pod 50 %, aby nedocházelo k nežádoucí kondenzaci. Nicméně teplota povrchu stropu bude vlivem tepelného odporu sádrokartonové desky vyšší a problém s případnou kondenzací by se vyskytl až při vyšších hodnotách relativní vlhkosti. Při nárůstu relativní vlhkosti je nutné zvýšit teplotu přívodní vody instalovaným trojcestným směšovacím ventilem.

Možnost A lépe vyhovuje požadavkům stanoveným Nařízením vlády č. 361/2007 Sb. a teplota v místnosti bude udržována na stejné hodnotě jako je nyní. Bohužel v tomto případě není možné naplnit požadavek uživatelů a tím i Nařízení vlády pro třídu práce IIa, protože takto nízká teplota není chladícím systémem dosažitelná. V této variantě není uvažováno s instalací stěnových chladících panelů, které by si vyžádaly další stavební zásah a snížení vnitřních rozměrů místnosti.

Tato varianta vyžaduje demontáž stávající podhledové konstrukce a následné osazení chladících panelů. Chladící panely je nutné mezi sebou utěsnit, aby nedocházelo k úniku vzduchu z místnosti vlivem přetlaku. V případě, že by po ověření skutečného provedení vzduchotechnického potrubí bylo zjištěno, že konstrukci chladícího stropu není možné osadit tak, aby byla dodržena stávající světlá výška, je nutné světlou výšku snížit. Předpokládané snížení nebude více jak 100 mm a světlá výška po rekonstrukci by měla být minimálně 3000 mm. Vzhledem k tomu, že tato varianta počítá s kompletní výměnou podhledů, doporučuji změnit umístění světel podle umístění nových pracovních míst a s ohledem na instalaci chladících stropů tak, aby bylo možné využít nejméně 80 % plochy stropu pro instalaci panelu. V místech, kde nebude možné instalovat tzv. aktivní panely je nutné instalovat sádrokartonové panely bez chladící funkce. Umístění panelů je omezeno polohou stávajících přívodních vyústek vzduchotechniky.

I pro tuto variantu je nutné pro zajištění požadovaného tepelně-vlhkostního prostředí a ekonomického provozu systému vzduchotechniky a nově instalovaného chladícího stropu upravit systém regulace podobným způsobem, jako bylo navrženo pro Variantu 1. V případě požadavku je možné chladící panely použít i k vytápění, nicméně tato možnost není předpokládána, protože prostor vyžaduje z důvodu vysoké tepelné zátěže celoroční chlazení.

Jak již bylo zmíněno, i tato varianta má své nevýhody mezi které patří zejména riziko kondenzace, nutnost demontáže stropního podhledu a instalace nového a nutnost provedení chladících stropů tak, aby vyhověly požadavkům čistého prostoru. Zvýšení množství přiváděného a odváděného vzduchu a tlakových poměrů navíc vyžaduje nové vyregulování vzduchotechnického systému. Naopak mezi výhody patří kromě zajištění požadovaného prostředí i zachování stávajícího obrazce proudění a zajištění téměř konstantního rozložení teploty po výšce místnosti.

3.3.4 Varianta 3

Třetí varianta uvažuje s instalováním nového vzduchotechnického systému, který by zajišťoval požadované vnitřní prostředí pouze v místnosti L4. Výměna vzduchu v místnosti byla navržena na hodnotu 40 h^{-1} tak, aby byla zajištěna požadovaná třída čistoty ISO 6 a zároveň odvod tepelné zátěže z prostoru a udržování požadované teploty 20 °C. V optické laboratoři bude zvýšen přetlak na 36 Pa jako ve Variantě 2 a stejně tak bude nutné zaregulovat stávající systém vzduchotechniky podle požadovaného množství odváděného

vzduchu v jednotlivých místnostech (Tabulka 35). Zároveň dojde k zaslepení odbočky zajišťující distribuci vzduchu do/z místnosti L4 a sníží se množství upravovaného vzduchu stávající jednotkou o 10 %.

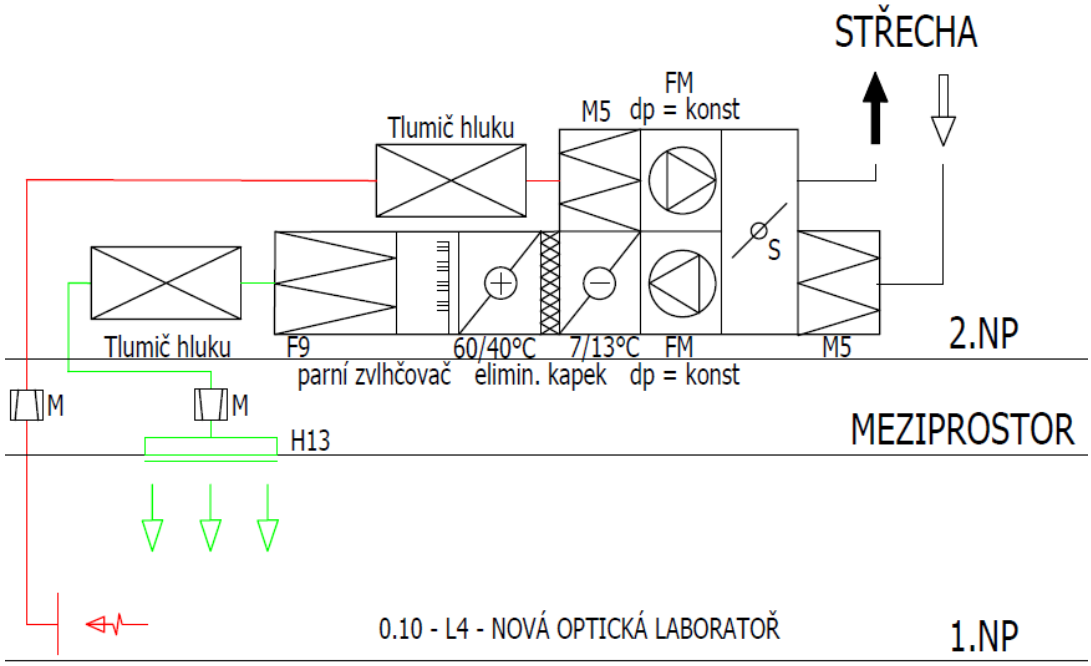
Tabulka 35 - Bilance množství vzduchu po navýšení přetlaku a průtoku v místnosti L4

		Vypočtený stav	
Číslo místnosti	**Název místnosti**	**Přívod vzduchu**	**Odvod vzduchu**
[-]	**[-]**	**[m^3/h]**	**[m^3/h]**
0.10	**Čistý sklad L4**	4800	4548
Celkem nové VZT zařízení		**4800**	**4548**
0.11	**Laserová laboratoř L3**	2081	2196
0.12	**R filtr**	399	0
0.26+0.26b	**Chodba**	4199	4195
0.28	**Metrologie**	3326	3558
0.30a	**Materiálová propusť**	801	700
Celkem zařízení VZT č. 6		**10806**	**10649**
Odvod vzduchu pře 0.15 a 0.16		**0**	**394**

Nová vzduchotechnická jednotka je sestavného typu a umožňuje směšování vzduchu, chlazení, ohřev, odvlhčování, parní zvlhčování a dvojnásobnou filtraci vzduchu filtry M5 a F9. Odvlhčování je zajištěno pomocí úpravy vzduchu chladičem a ohřívačem a jedná se o tzv. kondenzační odvlhčování, které se v tomto případě z důvodu požadovaných parametrů vzduchu a nižší ceny jeví jako lepší řešení než tzv. adsorpční odvlhčování [45]. Z důvodu předpokládané vyšší kvality směšovacího vzduchu oproti venkovnímu bylo zvoleno použití směšovací komory namísto zpětného získávání tepla. Uvažované procento směšování je 85 %. Celoroční vysoké vnitřní zisky požadují teplotu přívodního vzduchu o 3 °C nižší, a i při zimních návrhových podmínkách tak není nutné ohřívat vzduch o více než 2 °C na požadovanou teplotu (Obrázek 35). Z těchto důvodů se instalace zpětného získávání tepla již příliš nevyplatí.

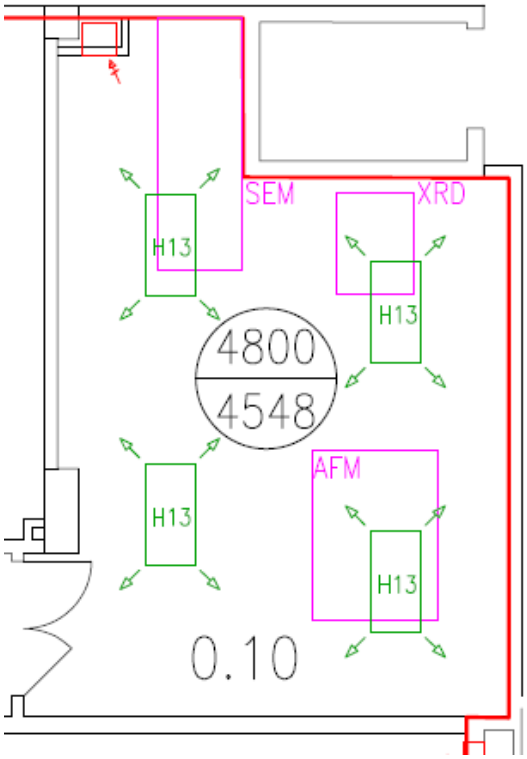
Jednotka bude umístěna ve volném prostoru stávající strojovny vzduchotechniky a výměníky budou napojeny na stávající zdroje tepla a chladu. Z toho důvodu byla teplota chladiče uvažována stejná jako v současnosti (7/13 °C). Při letních návrhových podmínkách je jednotka schopna zajistit vlhkost v prostoru laboratoře pod 53 % (Obrázek 36). Při návrhové teplotě v místnosti 20 °C by tato výše vlhkosti měla být bezpečná pro provoz

instalovaných technologií bez rizika kondenzace. Při požadavku na nižší hodnotu relativní vlhkosti by bylo nutné snížit teplotu chladiče a instalovat nový zdroj chladu s nižší teplotou přívodní vody. V zimním období je požadovaná relativní vlhkost dosažena parním zvlhčovačem o výkonu min. 4,5 kg/h. Pro letní návrhový stav bylo uvažováno ohřátí vzduchu v potrubí a vlivem ventilátoru o 2 °C (Obrázek 36, úpravy mezi body O-P, I-I2), ale ve skutečnosti by správným provedením a izolováním potrubí mělo být toto ohřátí nižší. Pro zimní návrhový stav nebylo toto ohřátí uvažováno. Požadovaný výkon chladiče je 22,25 kW a výkon ohřívače je 6,6 kW. Z důvodu snížení hluku budou za jednotkou umístěny tlumiče hluku. Schéma nové jednotky vzduchotechniky je uvedeno na Obrázku 32.



Obrázek 32 – Schéma nové jednotky vzduchotechniky

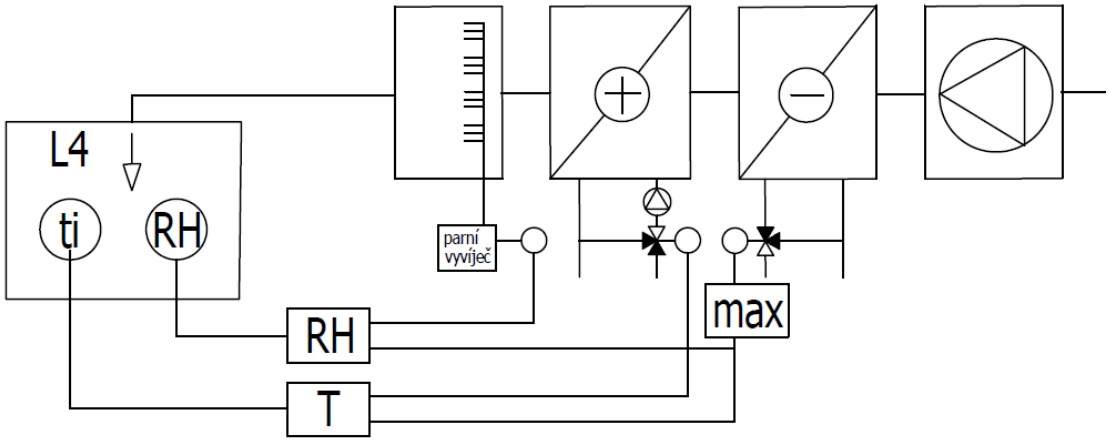
Nové rozvody potrubí budou umístěny v podhledu s ohledem na stávající umístění rozvodů. Jako přívodní prvky jsou zvoleny čtyři čisté nástavce s koncovou filtrací třídy H13 velikosti 1,2 x 0,6, které umožňují distribuci přívodního vzduchu s výstupní rychlostí 1,16 m/s (Obrázek 33). Stávající odvodní potrubí z místnosti do podhledu je nutné ponechat vzhledem ke stavebním omezením, ale odvodní vyústka bude zvětšena z 0,4 x 0,4 m na 0,4 x 0,8 m, aby lépe vyhověla zvýšenému množství odsávaného vzduchu a snížil se hluku v místnosti. Přesné umístění koncových prvků je nutné upravit podle pozice instalovaných přístrojů a jejich případných požadavků na proudění vzduchu nad technologiemi, které nebylo při zpracování této práce známo. Umístění samozřejmě ovlivní i skutečné provedení instalace stávajícího vzduchotechnického systému, nicméně návrh byl proveden podle poskytnuté dokumentace tak, aby navržené umístění prvků a vedení potrubí bylo možné. Řešení vzduchotechnického systému pro tuto variantu je v Příloze č. 4.



Obrázek 33 – Možné umístění přívodních prvků v optické laboratoři

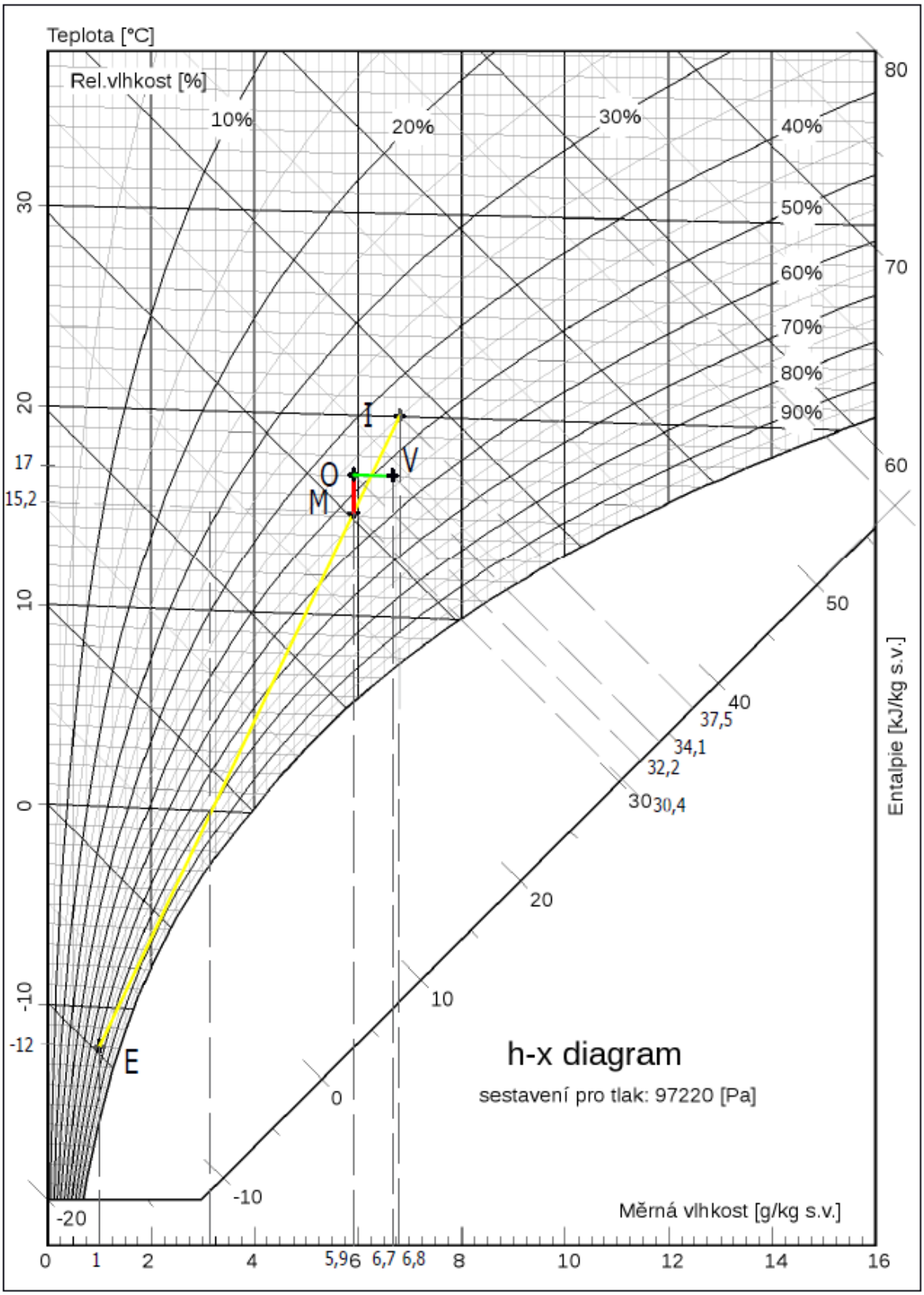
Vzhledem k udržování požadovaného přetlaku jsou v potrubí umístěny mechanické regulátory průtoku vzduchu a jednotka s ventilátory s frekvenčními měniči bude řízena podle konstantního tlaku v potrubí. Teplota a vlhkost v místnosti bude řízena pomocí tzv. přímé modulační regulace (Obrázek 34), která se využívá v prostorách, kde je žádoucí

dosažení přesné teploty a relativní vlhkosti. Tento způsob regulace vyžaduje instalování regulačního okruhu teploty s čidlem teploty a regulačního okruhu vlhkosti s čidlem relativní vlhkosti v místnosti. Regulátor teploty (T) ovládá ventil u ohřívače a chladiče a regulátor vlhkosti (RH) ovládá ventil parní zvlhčovač a chladič. Vzhledem k tomu, že chladič je ovládán dvěma regulátory, musí zde být umístěn volič priorit (max.), který přiřadí chladiči ten regulátor, který vysílá největší signál. Tato regulace může být dále doplněna například o regulaci minimální teploty přiváděného vzduchu. Výhodou instalování parního zvlhčování oproti vodnímu zvlhčování je ponechání téměř konstantní teploty při nárůstu vlhkosti. [46]

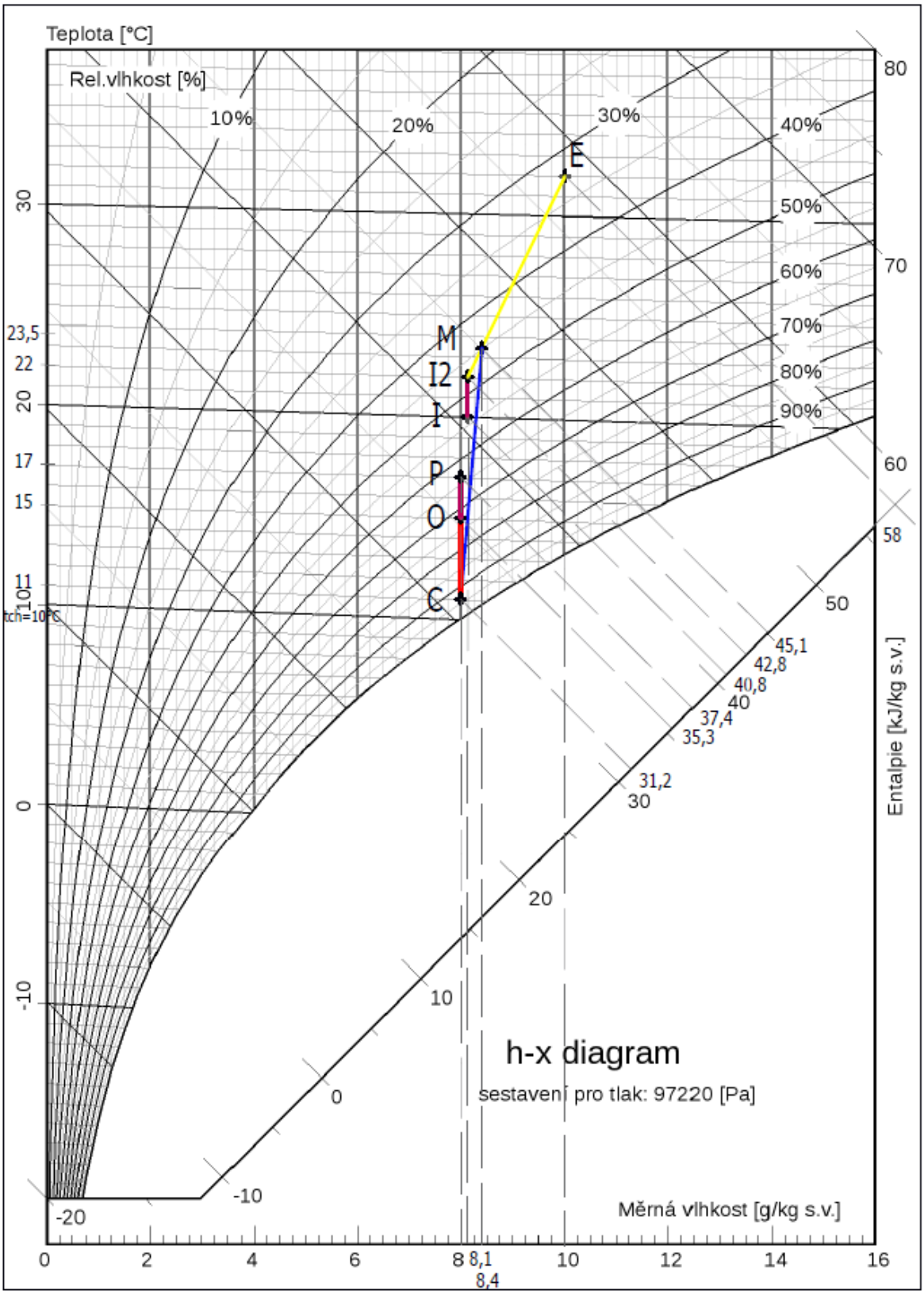


Obrázek 34 – Schéma přímé modulační regulace

Tato varianta řešení vyžaduje největší zásahy do stávajícího vzduchotechnického systému a způsobuje největší omezení provozu celého čistého prostoru. V případě plánované rekonstrukce týkající se přemístění všech vzduchotechnických jednotek na střechu objektu by bylo vhodné novou jednotku instalovat už na střechu objektu. Výhodou této varianty je zejména možnost udržování požadovaného vnitřního prostředí bez ohledu na provoz ostatních místností.



Obrázek 35 – Úpravy vzduchu pro zimní období znázorněné v h-x diagramu



Obrázek 36 – Úpravy vzduchu pro letní období znázorněné v h-x diagramu

3.4 Diskuze a zhodnocení

Všechny navržené varianty přeměny skladu na optickou laboratoř by měly splňovat požadavek na dosažení požadované třídy čistoty a požadavek na tepelně-vlhkostní prostředí podle instalovaných technologií. Nicméně požadovaná teplota podle třídy práce IIa není zajištěna ve Variantě 2, kde dosažení takto nízké teploty nebylo vzhledem k omezenému výkonu chladícího stropu možné. Z navržených variant je patrné, že stěžejní pro návrh řešení není ani tak požadovaná třída čistoty, která by mohla být teoreticky dosažena i bez větších změn vzduchotechnického systému, jako vysoká tepelná zátěž prostoru. Z tohoto důvodu je pro zajištění požadovaných podmínek nutné instalovat další systém chlazení v různých podobách. Všechny varianty tak budou požadovat napojení na rozvody chlazení a v ideálním případě se pro to využije již instalovaný rozvod v blízkosti místnosti L4. Zároveň všechny varianty vyžadují i změnu nebo instalování nového systému regulace. Finanční náklady nebylo možné přesněji stanovit, protože technologie jsou do takového prostoru vyráběny na míru, ale nejvyšší náklady budou pravděpodobně vyžadovány ve Variantě 3, která bude zároveň i nejnáročnější z hlediska montáže a omezení provozu ostatních prostor.

Každá z variant vyžaduje odlišný zásah do stávajícího systému vzduchotechniky a jiným způsobem omezuje provoz čistého prostoru. Právě vliv na provoz čistého prostoru bude pravděpodobně stěžejní při konečném rozhodování o nejvhodnější variantě. Posouzení navržených variant podle zvolených kritérií je zobrazeno v Tabulce 36.

Tabulka 36 – Posouzení navržených variant podle různých kritérií

Parametr	**Varianta**		
	1	**2**	**3**
Dosažení třídy čistoty ISO 6	ano	ano	ano
Zajištění vnitřních podmínek dle technologií	ano	ano	ano
Zajištění vnitřních podmínek pro třídu práce IIa dle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.	ano	ne	ano
Zvýšení přetlaku v L4	ne	ano	ano
Ovlivnění stávajícího systému vzduchotechniky	ne	ano	ano
Změna systému řízení stávajícího systému vzduchotechniky	ano	ano	Ne (ale nová VZT vyžaduje regulaci)
Nutnost dopojení na další systémy TZB	ano	ano	ano
Omezení provozu ostatních čistých prostor	ne	ne	ano
Náročnost montáže	nejnižší	vyšší	nejvyšší
Finanční náklady	vyšší	vyšší	nejvyšší

Po zhodnocení všech variant je možné říci, že Varianta 1 s cirkulační jednotkou nejméně zasáhne do provozu a instalací v ostatních místnostech a z tohoto důvodu se tato varianta jeví jako nejvhodnější možnost. Řešení ponechává stávající přetlak i množství přiváděného a odváděného vzduchu, a tak není nutné stávající vzduchotechnický systém znovu zaregulovat. Oproti Variantě 2 navíc splňuje požadovanou teplotu v prostoru, která by měla zajistit i vyšší komfort uživatelů. Přetlak z chodby s nižší třídou čistoty do optické laboratoře s sebou nese možné riziko kontaminace, které by však mohlo být sníženo dodržováním určitých zásad chování. Požadované tepelně-vlhkostní parametry budou zajištěny pomocí systému regulace, který zohlední teploty i v ostatních místnostech a přispěje ke správnému a ekonomickému provozu čistého prostoru. Při montáži jednotky je nutné dodržovat zásady čistého provozu a snížit riziko kontaminace i omezení provozu přilehlých prostor na minimum.

Zvolené řešení má své nevýhody v podobě vyšších finančních nákladů nebo ovlivnění stávajícího proudění vzduchu, ale požadované definované podmínky pro provoz optické laboratoře by měla být schopna zajistit. Za zvážení stojí snížit počet uživatelů místnosti z 6 na 4 osoby, protože vzhledem k instalovaným technologiím větších rozměrů nebude v místnosti příliš prostoru pro pohyb osob.

Kritéria posouzení jednotlivých variant by ve skutečnosti byla závislá na požadavcích laserového centra a výběr optimální varianty může být ovlivněn plánovanou rekonstrukcí, změnou v instalaci přístrojů nebo např. změnou požadavků na laserovou laboratoř.

Před provedením rozhodnutí doporučuji provést simulaci proudění vzduchu v místnosti včetně vymodelování nově instalovaných technologií, které poslouží pro výběr optimální varianty návrhu, resp. umístění jednotky nebo přívodních prvků. Zároveň doporučuji provést měření koncentrace částic v místnosti L4 podle požadavků třídy ISO 6 a případně podle výsledků upravit jednotlivé varianty a zvolit nejvhodnější.

Pro provoz budoucí optické laboratoře navrhuji v následující kapitole seznam doporučení, které by měly zajistit snížení koncentrace částic a tím přispět i k nižším provozním nákladům např. nižším zanášením filtrů zejména posledního stupně filtrace.

3.5 Doporučení pro provoz, údržbu a úklid

Následující seznam doporučení by podle získaných poznatků z literatury a vlastního pozorování měl zajistit snazší udržování požadované čistoty prostředí a měl by být standardním pro prostory s touto třídou čistoty.

- Odstranění skladovaných materiálů nebo jejich umístění do uzavíratelných skříní
- Zvýšení frekvence úklidu L4, resp. zvážit zvýšení frekvence úklidu i ostatních prostor
- Zvýšení frekvence většího úklidu v podobě otírání ploch stěn a stropu na 1 x za 2–3 měsíce
- Důkladné očištění všech použitých přístrojů a technologií před vstupem do čistého prostoru
- Nepoužívání běžného papíru, minimalizování množství přinesených předmětů do čistého prostoru
- Používání předepsaného oděvu a vstup osob do čistého prostoru pouze přes vakuovou sprchu
- Používání roušky přes obličej a obuvi pouze pro čisté prostory včetně návleků
- Dezinfekce kombinéz a jejich výměna v pravidelném intervalu
- Nepoužívání kosmetiky zvyšující odlučování částic z povrchu těla
- Užívání prostor pouze ve stavu způsobilém k práci a bez onemocnění, která by ohrozila kvalitu čistoty prostředí
- Zvážit vydání doporučení pro použitý oděv pod pracovní kombinézou
- Vstup návštěvníků pouze pod podmínkou dodržování stanovených pokynů a v předepsaném oděvu.
- Omezení fyzické aktivity, omezení komunikace na nezbytné minimum
- Výměna filtrů v koncových nástavcích každé 1–2 roky
- Plán montáže nových zařízení s ohledem na udržování čistoty prostor
- Izolace všech pomocných rozvodů v laboratořích z důvodu snížení rizika kondenzace
- Monitorování koncentrace částic v pravidelném intervalu

Závěr

Čisté prostory vyžadují velmi komplexní přístup k návrhu, který by měl zvážit i možnost potřeby přeměny prostoru v budoucnosti. Zásah do prostoru v podobě rekonstrukce většinou vede k nutnému omezení nebo úplnému odstavení provozu čistých prostor, který má kromě rizika zvýšené kontaminace nečistotami i negativní vliv např. na výrobu nebo zpoždění probíhajícího výzkumu a může vést až k finančním ztrátám.

Studie poukázala na problematiku návrhu takového prostoru, kde dochází ke střetu požadavků na vnitřní prostředí stanovených uživateli a instalovanými technologiemi a řešení může být dosaženo pomocí vhodného kompromisu. Cílem práce bylo zpracovat studii přeměny čistého skladu na optickou laboratoř s vyšší třídou čistoty tak, aby současně byly splněny specifické požadavky laboratoře a zajištěno vnitřní prostředí vhodné pro pobyt osob. Navržené varianty řešení ukazují možnosti přeměny čistého prostoru vedoucí k dosažení požadovaných podmínek. Porovnání jednotlivých variant bylo provedeno pomocí vybraných kritérií týkajících se splnění požadavků na optickou laboratoř a ovlivnění provozu přilehlých místností čistého prostoru. Právě kritérium omezení provozu bylo nakonec klasifikováno jako stěžejní pro výběr nejvhodnější varianty, kterou byla zvolena Varianta 1. Tato varianta navrhuje instalování cirkulační jednotky s chlazením, která zajistí požadovanou třídu čistoty i tepelně-vlhkostní prostředí a zároveň neomezí provoz v ostatních částech čistého prostoru. Pro novou optickou laboratoř byl navržen seznam doporučení pro provoz a údržbu, které je vhodné dodržovat za účelem snížení rizika kontaminace prostoru částicemi a bezproblémového provozu, s kterým jsou samozřejmě spjaty i případné nižší provozní náklady při pravidelné údržbě.

Před rozhodnutím laserového centra o výběru varianty doporučuji provést měření koncentrace částic dle třídy čistoty ISO 6 a simulaci proudění vzduchu v místnosti. Výsledky mohou napomoci k vybrání optimální varianty anebo posloužit k úpravě a vylepšení stávajících variant návrhu. V případě změn vstupních podmínek návrhu je nutné stávající varianty adekvátně upravit. Vzhledem k provedené podrobné analýze vnitřního prostředí čistých prostor je možné výsledky jednotlivých měření a zjištěné nedostatky využít pro zvážení případných úprav i v ostatních místnostech.

Použitá literatura

[1] USELLER, James. *Clean Room Technology*. Lewis Research Center, Cleveland, Ohio: National Aeronautics and Space Administration, 1969. NASA SP-5074.

[2] WHYTE, W. *Cleanroom technology: Fundamentals of design, Testing, and Operation*. New York: J. Wiley & Sons Ltd., 2001. ISBN 04-718-6842-6.

[3] *ČSN EN ISO 14644-1 (125301): Čisté prostory a příslušné řízené prostředí - Část 1: Klasifikace čistoty vzduchu podle koncentrace částic*. ÚNMZ, 2016.

[4] *Federal Standard 209E: Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones*. Mount Prospect, Illinois: Institute of Environmental Sciences, b.r.

[5] RUBINA, Aleš. *Vzduchotechnické systémy pro čisté prostory operačních sálů*. Praha: Společnost pro techniku prostředí - územní centrum Brno, 2008. Sešit projektanta - pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02065-3.

[6] *VYR-32 Pokyny pro správnou výrobní praxi - Doplněk 1, verze 1: Výroba sterilních léčivých přípravků*. In: . Státní úřad pro kontrolu léčiv, 2009. Dostupné také z: http://www.sukl.cz/leciva/vyr-32-dopl-1-verze-1

[7] Vyhláška č. 414/2017 Sb.: Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 84/2008 Sb., o správné lékárenské praxi, bližších podmínkách zacházení s léčivy v lékárnách, zdravotnických zařízeních a u dalších provozovatelů a zařízení vydávajících léčivé přípravky, ve znění vyhlášky č. 254/2013 Sb. In: *Sbírka zákonů ČR*. 2017, 146/2017.

[8] MONINEC, Jiří. Úvod do čistých prostorů. In: *Prokos: Sdružení výrobců, dovozců, vývozců a prodejců kosmetických prostředků a surovin pro jejich výrobu* [online]. b.r. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: www.sdrprokos.cz/akt_arch/13-seminar/cr01_v_kosmetika.ppt

[9] *ČSN EN ISO 14644-4 (125301): Čisté prostory a příslušné řízené prostředí - Část 4: Návrh, konstrukce a uvádění do provozu*. ÚNMZ, 2002.

[10] ZOON, W.A.C., S.A.M. V.D. HEIJKANT, J.L.M. HENSEN a M.G.L.C. LOOMANS. Assessment of the performance of the airflow in an operating theatre. In: *Proceedings of the SCANVAC Roomvent 2007 Conference, 13-15 June 2007*. Helsinki, b.r., s. 8.

[11] ASHRAE, . *HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics*. Second Edition. Atlanta, United States of America, 2013. ISBN 978-1-936504-39-8.

[12] KUŽEL, Jaroslav a Zuzana MATHAUSEROVÁ. Čisté prostory ve zdravotnictví. *VVI: Vytápění, větrání, instalace* [online]. Společnost pro techniku prostředí, 2003, (5), 225-227 [cit. 2018-05-08]. ISSN 1210-1389. Dostupné z: http://www.stpcr.cz/cz/cislo-5-2003

[13] *ČSN EN 1822-1 (125002): Vysoce účinné filtry vzduchu (HEPA a ULPA) - Část 1: Klasifikace, ověřování vlastností, označování*. ÚNMZ, 2010.

[14] Filtry a normy: Klasifikace vzduchových filtrů. *Air Filters* [online]. 2014 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://airfilters.cz/filtry/filtry-a-normy/

[15] Filtrační patrony KS KOPA s aktivním uhlím. In: *KS Klima-Service* [online]. c2002-2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: http://www.ksklimaservice.cz/cz/filtracni-patrony-ks-kopa-s-aktivnim-uhlim

[16] *ASHRAE HANDBOOK: HVAC Applications*. Atlanta, USA: ASHRAE, 2015. ISBN 978-1-936504-94-7.

[17] MURPHY, John. Temperature & Humidity Control In Surgery Rooms. *RX for Health-Care HVAC A supplement to ASHRAE Journal* [online]. b.r., **2006**(), 18-25 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: www.ashrae.org/File%20Library/docLib/Public/20091215_ashraed2830420060712.pdf

[18] KHODAKARAMI, Jamal a Nazanin NASROLLAHI. Thermal comfort in hospitals - A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier B.V., 2012, **16**(6), 4071-4077 [cit. 2018-05-09]. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.054. ISSN 1364-0321. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002377

[19] CG inlet pressure ceilings with laminar flow: Components for clean rooms. In: *KS Klima-Service* [online]. c2002-2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.ksklimaservice.com/en/details-for-loading

[20] *ČSN EN 12237 (120504): Větrání budov - Potrubí - Pevnost a těsnost kovového plechového potrubí kruhového průřezu*. ÚNMZ, 2003.

[21] *ČSN EN 1507 (120507): Větrání budov - Kovové plechové potrubí pravoúhlého průřezu - Požadavky na pevnost a těsnost*. ÚNMZ, 2006.

[22] FÖRSTER, Vladimír a Vladimír VAYHEL. Čisté prostory v průmyslu a zdravotnictví. *VVI: Vytápění, větrání, instalace* [online]. Společnost pro techniku prostředí, 2004, (1), 37-40 [cit. 2018-05-08]. ISSN 1210-1389. Dostupné z: http://www.stpcr.cz/cz/cislo-1-2004

[23] BS 8568:2013. *Cleanroom energy: Code of practice for improving energy efficiency in cleanrooms and clean air devices*. The British Standards Institutions, 2013.

[24] *ČSN EN ISO 14644-3 (125301): Čisté prostory a příslušné řízené prostředí - Část 3: Zkušební metody*. ÚNMZ, 2006.

[25] *ČSN EN ISO 14644-5 (125301): Čisté prostory a příslušné řízené prostředí - Část 3: Provozování*. ÚNMZ, 2005.

[26] *ČSN EN 12101-6 (389700): Zařízení pro usměrňování pohybu kouře a tepla - Část 6: Technické podmínky pro zařízení pracující na principu rozdílu tlaků - Sestavy*. ÚNMZ, 2006.

[27] ČESKÁ REPUBLIKA. *Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci*. In: . 2007. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361

[28] *ČSN EN ISO 7730 (833563): Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukzatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. 2. ÚNMZ, 2006.

[29] *ČSN EN 15251 (127028): Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky*. ÚNMZ, 2011.

[30] *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA 30329: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2013.

[31] FANGER, P. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. 1. New York: McGraw-Hill, 1970. ISBN 9780070199156.

[32] CIHELKA, Jaromír. *Vytápění a větrání*. 2. přeprac. a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1975, 697 s. Řada strojír. literatury.

[33] Metodický návod pro měření a hodnocení mikroklimatických podmínek na pracovišti a vnitřního prostředí staveb. *Věstník Ministerstva zdravotnictví České republiky* [online]. Ministerstvo financí České republiky, b.r., **2013**(8), 8-16 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/ska/autorizace/Metodika_MKL.pdf

[34] CHUNHUA, Liu, Zhou GUANG a Li HONGUYAN. Analysis of Thermal Environment in a Hospital Operating Room. In: *9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*. Procedia Engineering, 2015, s. 735 - 742. Volume 121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.021.

[35] ZMRHAL, Vladimír. Tepelný komfort 2.1. In: *Ústav techniky prostředí* [online]. Fakulta strojní ČVUT v Praze: Ústav techniky prostředí, b.r. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: http://utp.fs.cvut.cz/vyzkum/vyzkumny-zamer-2005-2011/software/

[36] HOYT, Tyler, Stefano SCHIAVON, Alberto PICCIOLI, Toby CHEUNG, Dustin MOON a Kyle STEINFELD. *CBE Thermal Comfort Tool* [online]. University of California Berkeley: Center for the Built Environment, 2017 [cit. 2018-04-01].

[37] Tepelný komfort - měřicí sada AHLBORN ALMEMO. *AHLBORN: Přesná německá měřící technika* [online]. b.r. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: https://www.ahlborn.cz/pristroje/tepelny-komfort/tepelny-komfort-merici-sada-ahlborn-almemo.html

[38] *ČSN EN 12831-1 (060206): Energetická náročnost budov - Výpočet tepelného výkonu - Část 1: Tepelný výkon pro vytápěný prostor, Modul M3-3*. ÚNMZ, 2018.

[39] *CIBSE guide A: Environmental design*. 8th. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 2016.

[40] *ČSN 73 0548 (730548): Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů*. ÚNMZ, 1986.

[41] Fresh Heaven MAXX/MAXX POWER: Projekční data. In: *Denco Happel: A Fläkt Group Brand* [online]. 2017 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: http://www.dencohappel.com/cs/products/air-treatment-systems/gea-clean-rooms/VZT-prvky-a-Filtrace/jednotky-laminární-proudění-vzduchu

[42] Sálavé systémy - Stropy, Technický manuál: Sádrokartony - Série GKC a GKCS. In: *Giacomini: Water E-motion* [online]. Giacomini, 2014 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.giacomini.cz/data/file/Stropy_GKC_manual.pdf

[43] ZMRHAL, Vladimír. Zkoušení a dimenzování chladících stropů. *VVI: Vytápění, větrání, instalace* [online]. Společnost pro techniku prostředí, 2007, **16**(2), 75-80 [cit. 2018-04-29]. ISSN 1210-1389. Dostupné z: http://www.stpcr.cz/cz/cislo-2-2007

[44] BAŠTA, Jiří. *Velkoplošné sálavé vytápění: podlahové, stěnové a stropní vytápění a chlazení*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3524-5.

[45] ANDRES, Petr. Odvlhčování pomocí adsorbční technologie DST Seibu Giken. *TZB info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Topinfo s.r.o., b.r. [cit. 2018-04-29]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: https://vetrani.tzb-info.cz/4918-odvlhcovani-pomoci-adsorbcni-technologie-dst-seibu-giken

[46] BAŠTA, Jiří. *Regulace v technice prostředí staveb*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-800-1054-550.

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Klasifikace dle ČSN EN 14644-1 [3] ..... - 12 -

Tabulka 2 – Klasifikace čistých prostor dle FS 209E [2; 4] ..... - 13 -

Tabulka 3 – Porovnání klasifikace třídy čistoty ve vybraných zemích [5]..... - 13 -

Tabulka 4 – Klasifikace pro jednotlivé třídy čistoty vzduchu podle počtu částic [7] - 14 -

Tabulka 5 – Doporučené parametry čistého prostoru [12]..... - 19 -

Tabulka 6 – Porovnání nového a původního značení vysoce účinných filtrů a jejich aplikace [14]..... - 20 -

Tabulka 7 – Výměna vzduchu v jednotlivých místnostech a přetlak k okolí podle validačního protokolu ..... - 29 -

Tabulka 8 – Vnější a vnitřní výpočtové údaje objektu HiLASE ..... - 33 -

Tabulka 9 – Vypočtené uvažované tepelné zátěže a tepelné ztráty pro jednotlivé místnosti..... - 34 -

Tabulka 10 – Hodnoty úniku vzduchu konstrukcemi podle ČSN EN 12101-6 [26] . - 35 -

Tabulka 11 – Množství přiváděného a odváděného vzduchu dle výpočtu a projektové dokumentace ..... - 35 -

Tabulka 12 – Četnost úklidu jednotlivých místností čistého prostoru..... - 41 -

Tabulka 13 – Stanovení počtu měřících bodů..... - 44 -

Tabulka 14 – Maximální povolené kum. koncentrace částic/m^3 dle ISO 14644-1 [3]- 46 -

Tabulka 15 – Výsledky měření v místnosti L3 (kumulativní hodnoty)..... - 47 -

Tabulka 16 - Výsledky měření v místnosti metrologie (kumulativní hodnoty)..... - 50 -

Tabulka 17 – Výsledky měření v chodbě (kumulativní hodnoty)..... - 52 -

Tabulka 18 – Výsledky měření v místnosti L4 (kumulativní hodnoty)..... - 55 -

Tabulka 19 – Porovnání průměrných výsledků měření mezi jednotlivými místnostmi ..... - 57 -

Tabulka 20 – Přípustné hodnoty nastavení mikroklimatických podmínek pro klimatizované pracoviště třídy I a IIa [27] ..... - 61 -

Tabulka 21 – Kategorie vnitřního prostředí dle ČSN EN ISO 7730 [28] ..... - 63 -

Tabulka 22 – Zvýšení koncentrace CO_2 nad koncentraci ve venkovním ovzduší [29] ..... - 65 -

Tabulka 23 – Průměrné naměřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivá pracovní místa ..... - 71 -

Tabulka 24 – Průměrné hodnoty měřených veličin pro jednotlivé místnosti ..... - 72 -

Tabulka 25 – Zatřídění místností do kategorie prostředí dle ČSN EN ISO 7730 ..... - 73 -

Tabulka 26 – Vyhodnocení analyzovaných místností dle ČSN EN 15251 ..... - 73 -

Tabulka 27 – Vyhodnocení analyzovaných místností dle Nařízení vlády č.361/2007 Sb., ČSN EN ISO 7730 a ČSN EN 15251 ..... - 74 -

Tabulka 28 – Výsledky vyhodnocení tepelně-vlhkostního prostředí v jednotlivých místnostech ..... - 79 -

Tabulka 29 – Porovnání ukazatelů PMV a PPD získaných z měření tep. komfortu a z dotazníků ..... - 82 -

Tabulka 30 – Výpočet tepelných zisků z vnitřních zdrojů ..... - 87 -

Tabulka 31 – Vstupní podmínky návrhu optické laboratoře ..... - 88 -

Tabulka 32 – Bilance množství vzduchu po navýšení průtoku v místnosti L4 ..... - 96 -

Tabulka 33 – Rozložení odváděné tepelné zátěže v závislosti na požadované teplotě vnitřního prostředí ..... - 97 -

Tabulka 34 – Dvě možnosti návrhu chladících panelů ..... - 98 -

Tabulka 35 - Bilance množství vzduchu po navýšení přetlaku a průtoku v místnosti L4 ..... - 100 -

Tabulka 36 – Posouzení navržených variant podle různých kritérií ..... - 106 -

Seznam obrázků

Obrázek 1 - CFD modelování proudění vzduchu na operačním sále (Vlastní tvorba) ..... - 16 -

Obrázek 2 – Řešení usměrněného proudění [9] ..... - 17 -

Obrázek 3 – Řešení neusměrněného proudění [9] ..... - 17 -

Obrázek 4 – Řešení smíšeného proudění [9] ..... - 18 -

Obrázek 5 – Vliv teploty přívodního vzduchu na proudění vzduchu [10] ..... - 18 -

Obrázek 6 – Laminární strop [19] ..... - 22 -

Obrázek 7 – Uvolňování částic z lidského organismu v závislosti na provozované aktivitě [2] ..... - 25 -

Obrázek 8 – Umístění čistého prostoru v 1.NP ..... - 27 -

Obrázek 9 – Schéma tlakového obrazce čistých prostor ..... - 30 -

Obrázek 10 – Barevné rozdělení čistého prostoru na dva vzduchotechnické systémy ..... - 31 -

Obrázek 11 – Schéma koncových prvků VZT a navržení množství odváděného a přiváděného vzduchu pro jednotlivé místnosti ..... - 36 -

Obrázek 12 – Schéma VZT jednotky ..... - 37 -

Obrázek 13 – Přenosný čítač částic ..... - 45 -

Obrázek 14 – Schéma umístění měřících bodů v místnosti L3 ..... - 46 -

Obrázek 15 – Grafické rozložení koncentrace částic ≥0,3 μm v měřících bodech v L3 ..... - 49 -

Obrázek 16 - Schéma umístění měřících bodů v místnosti metrologie ..... - 49 -

Obrázek 17 – Grafické rozložení koncentrace částic ≥0,3 μm v měřících bodech v metrologii ..... - 51 -

Obrázek 18 – Schéma umístění měřících bodů v chodbě ..... - 52 -

Obrázek 19 - Schéma umístění měřících bodů v místnosti L4 ..... - 54 -

Obrázek 20 – Sklad materiálu v místnosti L4 ..... - 56 -

Obrázek 21 – Grafické rozložení koncentrace částic ≥0,3 μm v měřících bodech v L4 ..... - 57 -

Obrázek 22 – Měřící souprava ..... - 67 -

Obrázek 23 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti L1 ..... - 68 -

Obrázek 24 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti L3 ..... - 69 -

Obrázek 25 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti L4 ..... - 69 -

Obrázek 26 – Schéma umístění měřících bodů na jednotlivých pracovních pozicích v místnosti metrologie ..... - 70 -

Obrázek 27 – Schéma možného rozmístění přístrojů (podklady HiLASE) ..... - 84 -

Obrázek 28 – Čtyři možnosti umístění cirkulační jednotky v podhledu ..... - 92 -

Obrázek 29 – Schéma vzduchotechnického systému pro Variantu 1 ..... - 93 -

Obrázek 30 – Schéma možného řešení regulace teploty v místnosti ..... - 94 -

Obrázek 31 – Chladící panel [42] ..... - 96 -

Obrázek 32 – Schéma nové jednotky vzduchotechniky ..... - 101 -

Obrázek 33 – Možné umístění přívodních prvků v optické laboratoři ..... - 102 -

Obrázek 34 – Schéma přímé modulační regulace ..... - 103 -

Obrázek 35 – Úpravy vzduchu pro zimní období znázorněné v h-x diagramu ..... - 104 -

Obrázek 36 – Úpravy vzduchu pro letní období znázorněné v h-x diagramu ..... - 105 -

Seznam grafů

Graf 1 – Průběh teploty a relativní vlhkosti v místnosti L4 získaný z dlouhodobého monitorování ..... - 40 -

Graf 2 - Koncentrace částic ≥0,3 μm v měřících bodech v chodbě ..... - 54 -

Graf 3 – Naměřené kumulativní koncentrace částic ≥0,3 μm..... - 58 -

Graf 4 - Naměřené kumulativní koncentrace částic ≥5,0 μm ..... - 59 -

Graf 5 – Předpokládané procento nespokojených (PPD, %) jako funkce PMV [28] - 63 -

Graf 6 – Porovnání některých naměřených veličin na jednotlivých pracovištích v místnosti L3 ..... - 72 -

Graf 7 – Rozložení odpovědí na otázku č. 3 ..... - 78 -

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Thermal Comfort Questionnaire

Příloha č. 2 – Půdorys VZT 1.NP (1:150)

Příloha č. 3 – Varianta 2 VZT 1.NP (1:125)

Příloha č. 4 – Varianta 3 VZT 1.NP (1:125)