

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**VYUŽITÍ TERMOVIZE V TECHNICE
PROSTŘEDÍ BUDOV**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Romanu Vavříčkovi, Ph.D. za jeho rady a ochotu odpovídat na moje dotazy, za jeho pomoc při měření samotném i při jeho vyhodnocování a za celkové vedení mé práce. Dále bych rád poděkoval všem svým blízkým za podporu během celého mého studia.

SOUHRN

Cílem práce bylo vyhodnotit vliv vzdálenosti bezkontaktního měřicího přístroje od měřeného objektu na měřenou povrchovou teplotu. Experimentálně byly ověřovány pyrometry i termovizní kamery, měřeným objektem bylo černé těleso s definovanou emisivitou a s možností nastavení proměnné povrchové teploty.

Druhým cílem bylo získaná data ověřit na reálném příkladu z praxe. K měření byl zvolen areál Revmatologického ústavu (Na Slupi 450/4, 128 00 Praha). Úkolem bylo vyhodnotit tepelný stav fasády budov a zároveň ověřit vliv dalších okrajových podmínek pro nastavení bezkontaktního měření povrchových teplot v exteriéru na výsledky měření. Zejména se jednalo o vliv zadání relativní vlhkosti vzduchu, vzdálenosti od měřicího objektu, teploty okolního vzduchu a tzv. „zdánlivě odrážející teploty“, neboli teplotní pozadí teplotního pole termovizní kamery. Samostatně byl zkoumán také vliv emisivity.

SUMMARY

The aim of the work was a study of distance of contactless thermometer from the measured object and its influence to measured surface temperature. Both pyrometers and thermographic cameras were investigating experimentally – the measured object was the black body with defined emissivity and with a possibility to change surface temperature.

The second part of this work was about checking the data in real practical measurement. Areal of the Institute of Rheumatology (Na Slupi 450/4, 128 00 Prague) was selected for this purpose. The aim was to evaluate the thermal condition of building facade and to check the influence of boundary conditions for contactless thermal measurement settings in exterior to the measured results. The main focus was put on setting relative air humidity, distance from measured object, air temperature and reflected temperature (thermal background of thermographic camera). The influence of emissivity was studied independently.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Využití termovize v technice prostředí budov“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Romana Vavříčky, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 11. 6. 2017

Jan Zelingr

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK	8
1. ÚVOD	9
2. TEORIE	9
2.1 Planckův zákon	9
2.2 Wienův zákon.....	10
2.3 Stefan-Bolzmannův zákon	10
2.4 Kirchhoffův zákon.....	11
2.5 Emisivita	11
2.6 Optické rozlišení	12
2.7 Odražená teplota	12
3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ BEZKONTAKTNÍCH TEPLOMĚŘŮ.....	13
3.1 Cíl měření.....	13
3.2 Popis experimentu.....	13
3.2.1 Měřicí místa	13
3.2.2 Schéma místa	13
3.2.3 Černé těleso.....	14
3.3 Použité přístroje	14
3.3.1 Bezkontaktní teploměr Proscan 530	14
3.3.2 Bezkontaktní teploměr Testo QuickTemp 860-T2	15
3.3.3 Bezkontaktní teploměr IAN 271160.....	16
3.3.4 Bezkontaktní teploměr Minolta Land Cyclops Mini View	16
3.3.5 Termovizní kamera Flir i7	17
3.3.6 Termovizní kamera Flir T460.....	18
3.3.7 Termovizní kamera Flir S65	18
3.4 Podmínky v laboratoři.....	19

3.5	Popis měření.....	19
3.6	Tabulka D:S	19
4.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ (KAPITOLY 3).....	21
4.1	Vyhodnocení optických vlastností kamer	21
4.2	Vyhodnocení přesnosti elektroniky kamer.....	25
4.3	Vyhodnocení tolerancí udávaných výrobcem	27
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ OBÁLKY BUDOV	29
5.1	Cíl měření	29
5.2	Popis místa.....	29
5.2.1	Fara	30
5.2.2	Nová budova	30
5.2.3	Stará budova	30
5.2.4	Vytápění budov.....	30
5.3	Použité přístroje	30
5.4	Podmínky měření.....	30
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ (KAPITOLY 5).....	31
6.1	Vliv změn okrajových podmínek.....	31
6.1.1	Změna vzdálenosti a vlhkosti	31
6.1.2	Změna teploty okolního vzduchu	33
6.1.3	Změna emisivity	34
6.1.4	Změna odražené teploty.....	35
6.2	Tepelný stav budovy	36
6.2.1	Exteriér.....	37
6.2.2	Interiér.....	41
7	ZÁVĚR	42
7.3	Vyhodnocení měření bezkontaktními přístroji – experiment.....	42
7.4	Vyhodnocení měření obálky budovy	42

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

c	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	- rychlost světla ve vakuu ($c = 2,9979\cdot 10^8$)
h	$[\text{J}\cdot\text{s}]$	- Planckova konstanta ($h = 6,6256\cdot 10^{-34}$)
I_0	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}]$	- intenzita vyzařování
I_{ξ}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	- celkový zářivý výkon
I_{α}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	- zářivý výkon tělesem pohlcený
I_{ρ}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	- zářivý výkon tělesem odražený
I_{τ}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	- zářivý výkon tělesem prošlý
k_B	$[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}]$	- Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,3805\cdot 10^{-23}$)
L	$[\text{mm}]$	- vzdálenost měřicího přístroje od měřeného objektu
T	$[\text{K}]$	- absolutní povrchová teplota zdroje
T_e	$[\text{K}]$	- venkovní teplota
T_{ob}	$[\text{K}]$	- teplota oblohy
α	$[-]$	- součinitel pohltivosti
ε	$[-]$	- emisivita
λ	$[\text{m}]$	- vlnová délka vyzařování
ρ	$[-]$	- součinitel odrazivosti
σ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	- Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67\cdot 10^{-8}$)
τ	$[-]$	- součinitel propustnosti
φ_i	$[\%]$	- relativní vlhkost vzduchu

1. ÚVOD

Tato práce se zabývá především vlivem vzdálenosti měřicího přístroje od měřeného objektu a posouzení spolehlivosti měření jednotlivými přístroji v závislosti na tomto parametru. Kapitola 6 se poté věnuje i dalším okrajovým podmínkám, které se nastavují při použití termovizního systému měření povrchových teplot.

Nedílnou součástí práce jsou základní principy funkce bezkontaktního měření teploty. Největší část práce je ale tvořena výsledky experimentálního měření, které mapují relativní nejistotu měření různých typů termovizních kamer a bezdotykových přístrojů (viz kapitola 3.3). Experimentální práce probíhala v laboratořích ČVUT v Praze, Fakulty strojní, Ú 12 116. Všechny měřicí přístroje jsou součástí vybavení Ú 12 116.

2. TEORIE

Bezkontaktní měření povrchových teplot je založeno na měření elektromagnetického záření, které každý měřený objekt vysílá. Podmínkou vyzařování těles je, že jejich povrchová teplota musí být větší než absolutní nula ($-273,15\text{ °C}$).

K měření se využívají buď bezdotykové teploměry (přístroje, které snímají energii vyzařovanou objektem pouze bodově) nebo termografické kamery. Termografické (nebo také termovizní) kamery mají výsledkem měření termogram, tj. teplotní mapu objektu v rozsahu optických vlastností čočky a detektoru termovize.

Z pohledu teorie bezkontaktního měření povrchových teplot je pro měření z celého spektra elektromagnetického záření důležitá jen infračervená část, která má vlnové délky v rozmezí $0,75\text{ }\mu\text{m}$ až 1 mm . Tento rozsah za standardních podmínek obvykle pokrývá teploty od -40 °C do $+10000\text{ °C}$ [1].

2.1 Planckův zákon

„Planckův vyzařovací zákon se týká spektrální měrné zářivosti, což je výkon generovaný z jednotky plochy povrchu zdroje na dané vlnové délce do jednotkového prostorového úhlu. Pro ideální zdroj (tj. absolutně černé těleso) při absolutní teplotě zdroje [K] lze tento zákon napsat v energetickém tvaru“ [citováno z [1]]

$$I_0(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^2} \cdot \left[e^{\left(\frac{c \cdot h}{k_B \cdot \lambda \cdot T} \right)} - 1 \right]^{-1} \quad (1),$$

kde

- I_0 - intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$],
- λ - vlnová délka vyzařování [m],
- c - rychlost světla ve vakuu ($c = 2,9979 \cdot 10^8$) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- h - Planckova konstanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$) [$\text{J} \cdot \text{s}$],
- k_B - Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23}$) [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$],
- T - absolutní povrchová teplota zdroje [K].

2.2 Wienův zákon

„Udává závislost vlnové délky maxima vyzařování na termodynamické teplotě T“
[citováno z [2]].

$$\frac{\partial I_\zeta(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \gg \lambda_{max} \cdot T = 2898 \quad (2),$$

kde

- I_ζ - celkový zářivý výkon [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Z Wienova zákona posuvu je vidět, že maximum spektrální intenzity se mění v závislosti na teplotě a to tak, že s rostoucí teplotou se posouvá ke kratším vlnovým délkám [1], [3].

2.3 Stefan-Bolzmannův zákon

Stefan-Bolzmannův zákon udává intenzitu vyzařování černého tělesa při termodynamické teplotě T v celém rozsahu vlnových délek [2],[3].

$$I_\zeta(T) = \int_0^\infty I_\zeta(\lambda, T) \cdot d\lambda = \int_0^\infty \pi \cdot I_0(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k_B^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (3),$$

kde

- σ - Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

„Tento Stefan-Boltzmannův vzorec (podle Josefa Stefana a Ludwiga Boltzmannna) tedy říká, že výsledný vyzařovaný výkon černého tělesa je úměrný čtvrté mocnině jeho absolutní teploty“ [citováno z [1]].

2.4 Kirchhoffův zákon

Kirchhoffův zákon je zákonem zachování energie. Zákon říká, že intenzita vyzařování na těleso dopadající je rovna součtu toku záření tělesem pohlceným, toku tělesem odraženým a toku tělesem prošlým [1].

$$I_{\xi}(\lambda, T) = I_{\alpha}(\lambda, T) + I_{\rho}(\lambda, T) + I_{\tau}(\lambda, T) \quad (4),$$

kde

- I_{α} - zářivý výkon tělesem pohlcený,
- I_{ρ} - zářivý výkon tělesem odražený,
- I_{τ} - zářivý výkon tělesem prošlý.

„Pokud rovnici (4) vydělíme celkovou intenzitou vyzařování $I_{\xi}(\lambda, T)$, obdržíme definici tří základních součinitelů, které popisují vlastnosti těles ozářených radiačním tokem“ [citováno z [1]].

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (5),$$

kde

- α - součinitel pohltivosti (absorpce) [-],
- ρ - součinitel odrazivosti (reflexe) [-],
- τ - součinitel propustnosti (transmise) [-].

2.5 Emisivita

Emisivita je vlastnost těles, která je dána jejich schopností emitovat infračervené záření. Emisivita je poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při téže teplotě [3].

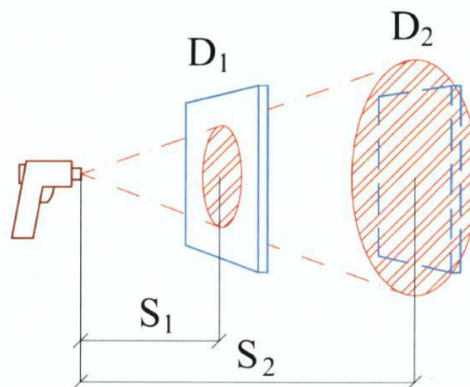
$$\varepsilon = \frac{I_i(\lambda, T)}{I_{\xi}(\lambda, T)} \quad (6),$$

kde

ε - emisivita [-].

2.6 Optické rozlišení

Optické rozlišení je nejčastěji zadané poměrem $D:S$, viz obr. 1. Tento poměr je velmi důležitý, protože většina přístrojů nesnímá povrch bodově, ale v ploše ve tvaru kruhu. Aby výsledná naměřená teplota nebyla ovlivněna teplotou okolí (infračerveným zářením objektů v pozadí) je nutné snímat pouze plochu měřeného tělesa [1].



Obrázek 1 – Znázornění velikosti snímané plochy [1]

2.7 Odražená teplota

Odražená teplota je důležitým faktorem při nastavení okrajových podmínek. Pokud budeme měřit v exteriéru, jedná se o teplotu oblohy a je možné ji stanovit ze vztahu [1]

$$T_{ob} = [9,36 \cdot 10^{-6} \cdot (T_e)^6]^{0,25} \quad (7),$$

kde

T_{ob} - teplota oblohy [K],

T_e - venkovní teplota [K].

Pokud měříme v interiéru, můžeme nastavit odraženou teplotu stejnou jako střední radiační teplotu. To platí v případě, že v místnosti není významný zdroj tepla (osvětlení, otopná tělesa, ...). Při měření obálky budov je dobré měřit v zimních měsících nebo při zatažené obloze a nižších teplotách, aby bylo měření přesnější [1].

3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ BEZKONTAKTNÍCH TEPLOMĚRŮ

3.1 Cíl měření

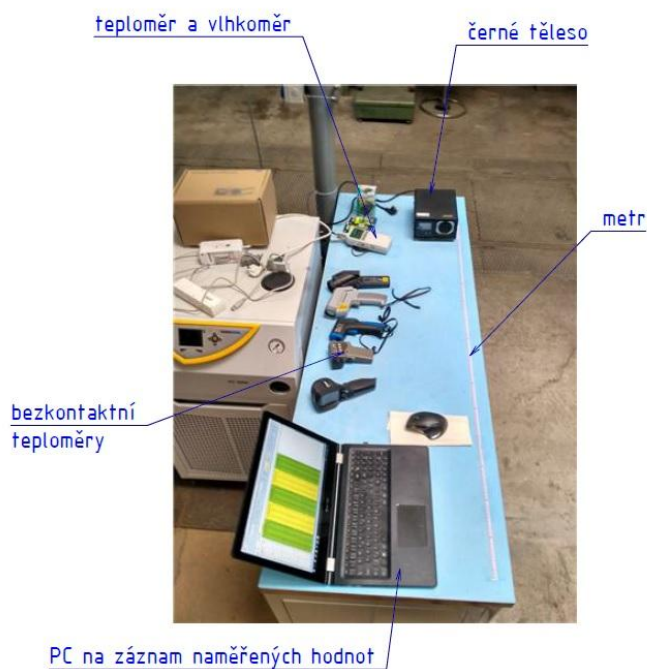
Cílem měření je experimentálně zjistit relativní nejistotu měření povrchové teploty v závislosti na vzdálenosti bezkontaktního teploměru od měřeného objektu.

3.2 Popis experimentu

3.2.1 Měřicí místa

Měření probíhalo v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí, které se nachází v areálu ČVUT v Dejvicích. V laboratoři byl na měření vyhrazen stůl, na kterém celé měření probíhalo. Na stole byla vyznačena délková stupnice pro stanovení vzdálenosti přístroje od měřeného objektu. Jako měřicí objekt bylo použito tzv. černé těleso BB500 s možností proměnlivého nastavení povrchové teploty měřicího terčíku.

3.2.2 Schéma místa



Obrázek 2 – Schéma měření (stůl)

3.2.3 Černé těleso

Rozsah:	50 °C až 500 °C
Přesnost:	50 °C až 100 °C → ± 0,1 °C 101 °C až 350 °C → ± 0,2 °C 351 °C až 500 °C → ± 0,4 °C
Emisivita:	0,95
Měřená plocha:	kruh Ø 57 mm



Obrázek 3 – Černé těleso BB500 [4]

3.3 Použité přístroje

Experiment byl proveden na celkem čtyřech bezkontaktních teploměrech a třech termovizních kamerách. Jejich přesné parametry jsou uvedeny v následujících kapitolách. U každého přístroje je zároveň obrázek, který zobrazuje optickou charakteristiku D:S.

3.3.1 Bezkontaktní teploměr Proscan 530

Rozsah:	- 35 °C až +900 °C
Přesnost:	-35 až 900 °C → ±0,75 °C nebo 0,75 % z naměřené hodnoty
Spektrální rozsah:	8 až 14 μm
Optická charakteristika:	75:1 nebo 4:1



Obrázek 4 – Proscan 530 [5]

3.3.2 Bezkontaktní teploměr Testo QuickTemp 860-T2

Rozsah:	-30 °C až +900 °C
Přesnost:	-30 až -5 °C → ± (2 °C) -4,9 až 74,9 °C → ± (0,75 °C) 75 až 900 °C → ± (0,75 % z naměřené hodnoty)
Spektrální rozsah:	8 až 14 μm
Optická charakteristika:	45:1



Obrázek 5 – Testo QuickTemp 860-T2[6]

3.3.3 Bezkontaktní teploměr IAN 271160

Rozsah:	-50 °C až +380 °C
Přesnost:	-50 °C až 0 °C → ± 3 %, resp. 3 °C z naměřené hodnoty 0 °C až 380 °C → ± 1,5 %, resp. 1,5 °C z naměřené hodnoty
Optická charakteristika:	12:1
Poznámka:	Nelze nastavit emisivita.



Obrázek 6 – IAN 271160 [7]

3.3.4 Bezkontaktní teploměr Minolta Land Cyclops Mini View

Rozsah:	-50 °C až +500 °C
Přesnost:	-50 až 0 °C → ±5 °C 0 až 200 °C → ± (2 °C ± 1 digit) 200 až 500 °C → ± (1 % z naměřené hodnoty ± 1 digit)
Spektrální rozsah:	8 až 14 μm
Optická charakteristika:	40:1



Obrázek 7 – Minolta Land Cyclops Mini View [8]

3.3.5 Termovizní kamera Flir i7

Rozsah:	-20 °C až 250 °C
Přesnost:	± 2 % nebo 2 °C
Spektrální rozsah:	7,5 až 13 μm
Zorné pole:	29 ° x 29 °
IR rozlišení:	140 x 140 pixelů



Obrázek 8 – Flir i7 [9]

3.3.6 Termovizní kamera Flir T460

Rozsah:	-20 °C až 1500 °C
Přesnost:	± 1 % nebo 1 °C ± 2 % nebo 2 °C pro teploty větší než 25 °C
Zorné pole:	25 ° x 19 °
IR rozlišení:	320 x 240 pixelů



Obrázek 9 – Flir T460 [10]

3.3.7 Termovizní kamera Flir S65

Rozsah:	-40 °C až 1500 °C
Přesnost:	±2 °C
Zorné pole:	20 ° x 15 °
IR rozlišení:	320 x 240 pixelů



Obrázek 10 – Flir S65 [11]

3.4 Podmínky v laboratoři

V laboratoři se po celou dobu měření teplota vzduchu pohybovala okolo 22 °C a relativní vlhkost byla cca 40 %. Při vyhodnocování termografů v softwaru ThermaCAM Researcher Pro 2.10 jsou coby okrajové podmínky použity tyto dvě hodnoty. V průběhu experimentu nebyl v laboratoři provozován žádný výrazný zdroj proudění vzduchu nebo zdroj tepla, což by měření přímo mohlo ovlivnit.

3.5 Popis měření

V první fázi bylo nutné nastavit požadovanou povrchovou teplotu terčíku černého tělesa. Dále bylo provedeno měření přístroji ze zvolené vzdálenosti. Jednalo se o měřicí místa 100, 200, 300, 400, 500, 600, 1000, 1500, 2000 a 2500 mm od černého tělesa. Měření v každém bodě bylo opakováno 3 krát a do vyhodnocení je uvažováno s průměrnou hodnotou. Teplotní krok byl nastaven na 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 a 450 °C. Termovizní kamery byly umístěny na stativu, měření bezdotykovými teploměry bylo provedeno ručně.

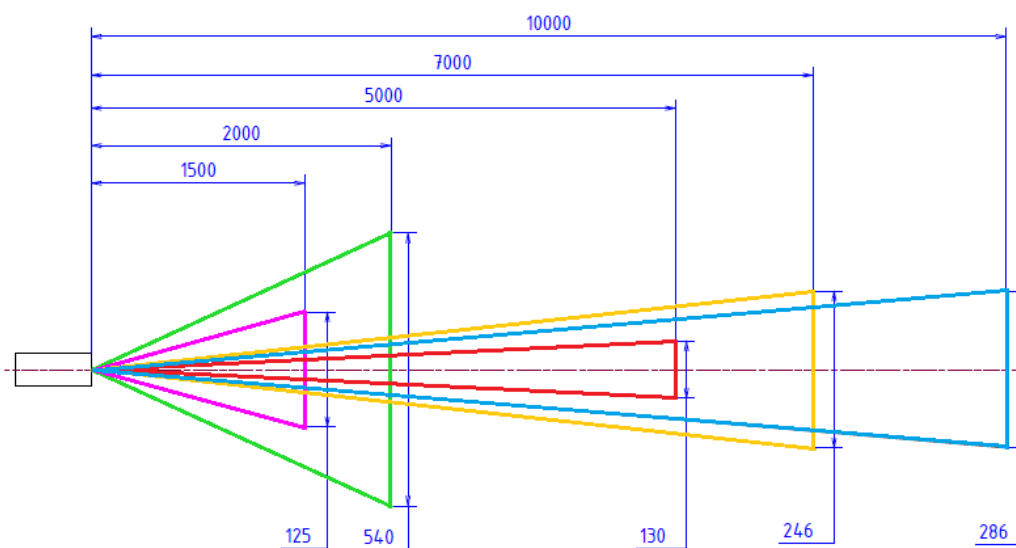
3.6 Tabulka D:S

V následující tabulce 1 je shrnutí poměru D:S pro konkrétní přístroje. Plocha černého tělesa má průměr 57 mm. Hodnoty větší než 55 mm jsou proto v tabulce 1 zvýrazněny červeně. V těchto vzdálenostech totiž přístroje snímaly plochu větší a tudíž

je jasné, že naměřená hodnota bude ovlivněna i teplotou pozadí (např. obálky černého tělesa, zdí, atd.).

Tabulka 1 – Poměr $D:S$

D [mm]	S [mm]				
	Proscan 530 úzký	Proscan 530 široký	Testo QuickTemp 860-T2	IAN 271160	Land Cyclops Mini View
100	19,7	11,6	24,5	8,3	31,0
200	19,3	39,4	24,0	16,7	31,9
300	19,0	67,2	23,4	25,0	32,9
400	18,7	95,0	22,9	33,3	33,8
500	18,3	122,9	22,4	41,7	34,8
600	18,0	150,7	21,9	50,0	35,7
1000	16,7	262,0	19,8	83,3	39,5
1500	35,0	401,1	22,0	125,0	44,3
2000	40,0	540,2	40,0	166,7	49,0
2500	55,0	679,4	58,0	208,3	68,5



Obrázek 11 – Znázornění poměru $D:S$

Na obrázku 11 jsou přístroje zobrazeny následně:

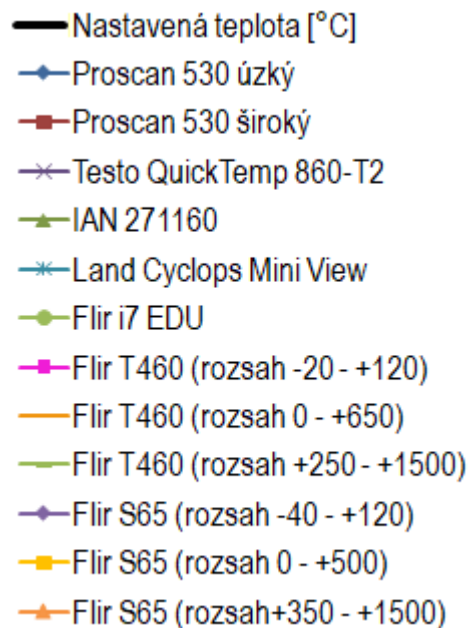
- IAN 271160 – fialově,
- Proscan 530 široký – zeleně,
- Proscan 530 úzký – červeně,
- Land Cyclop Mini View – žlutě,
- Testo QuickTemp 860-T2 – modře.

4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ (KAPITOLY 3)

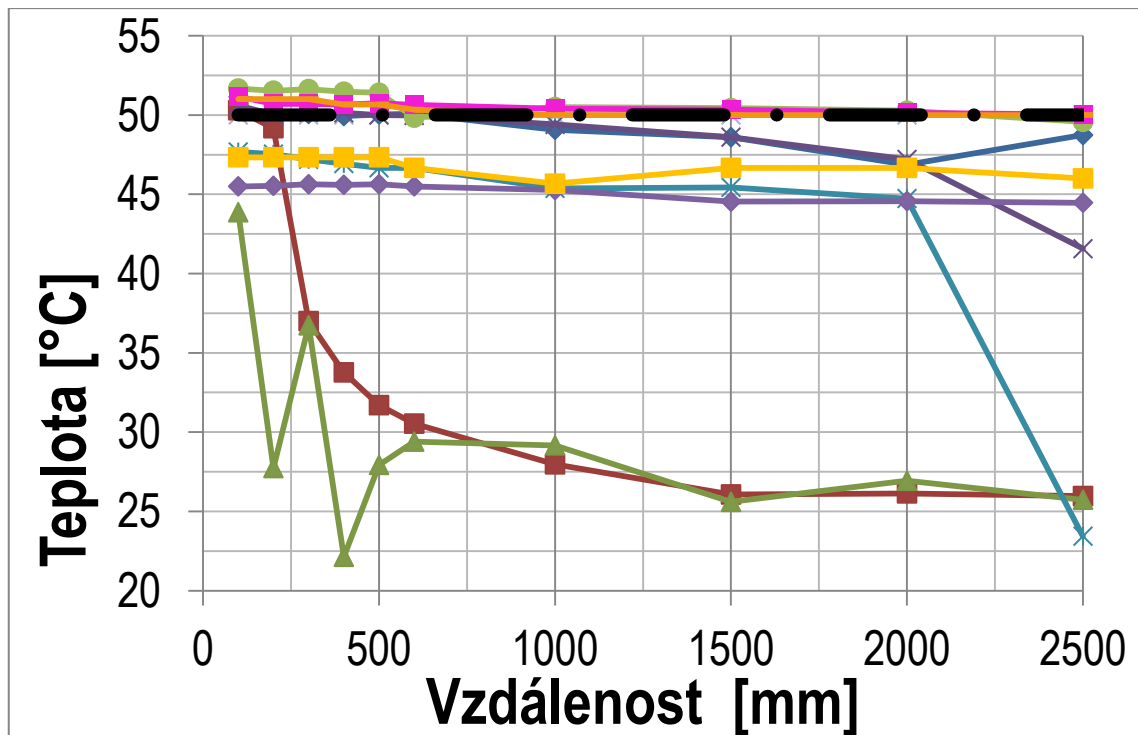
Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulce (Tabulka 6), která je na přiloženém CD. Tabulka je velmi rozsáhlá a tudíž v následujících kapitolách 4.1, 4.2 a 4.3 jsou vždy jen 3 grafy, které nejlépe prezentují výsledky.

4.1 Vyhodnocení optických vlastností kamer

Z důvodu opakující se legendy v následujících grafech je legenda vyjmuta a samostatně uvedena na obr. 13.

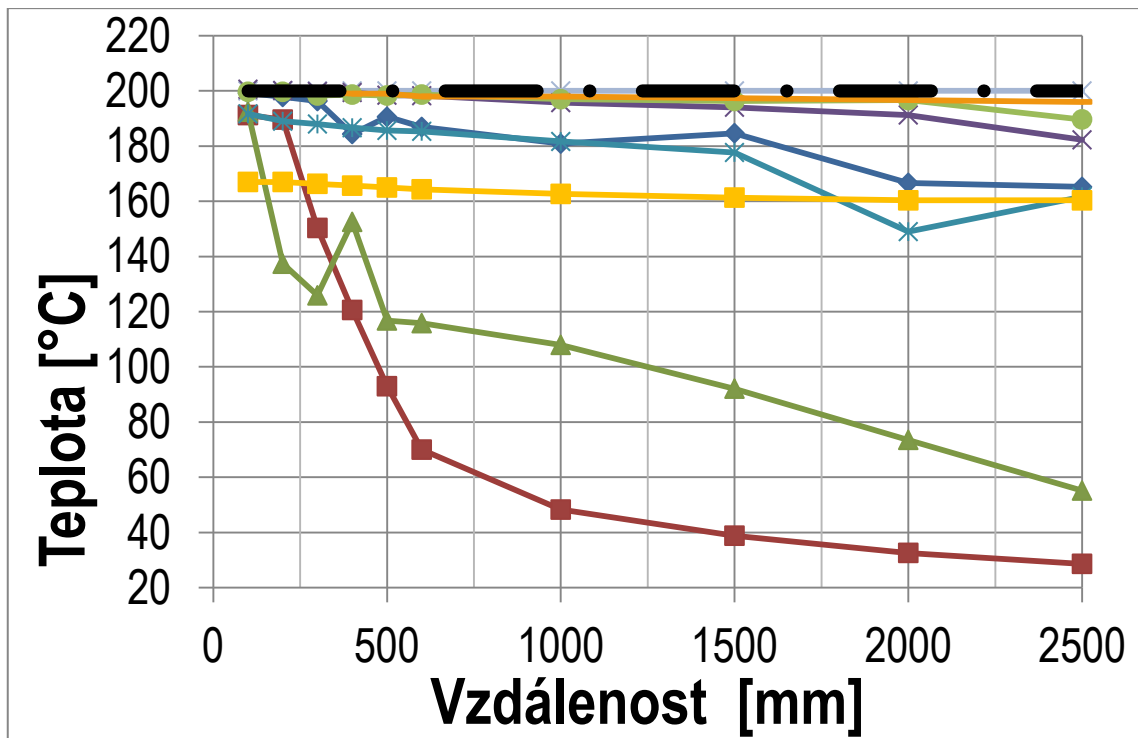


Obrázek 12 – Legenda k obrázkům (grafům) 14, 15 a 16



Obrázek 13 – Graf pro $T = 50^{\circ}\text{C}$

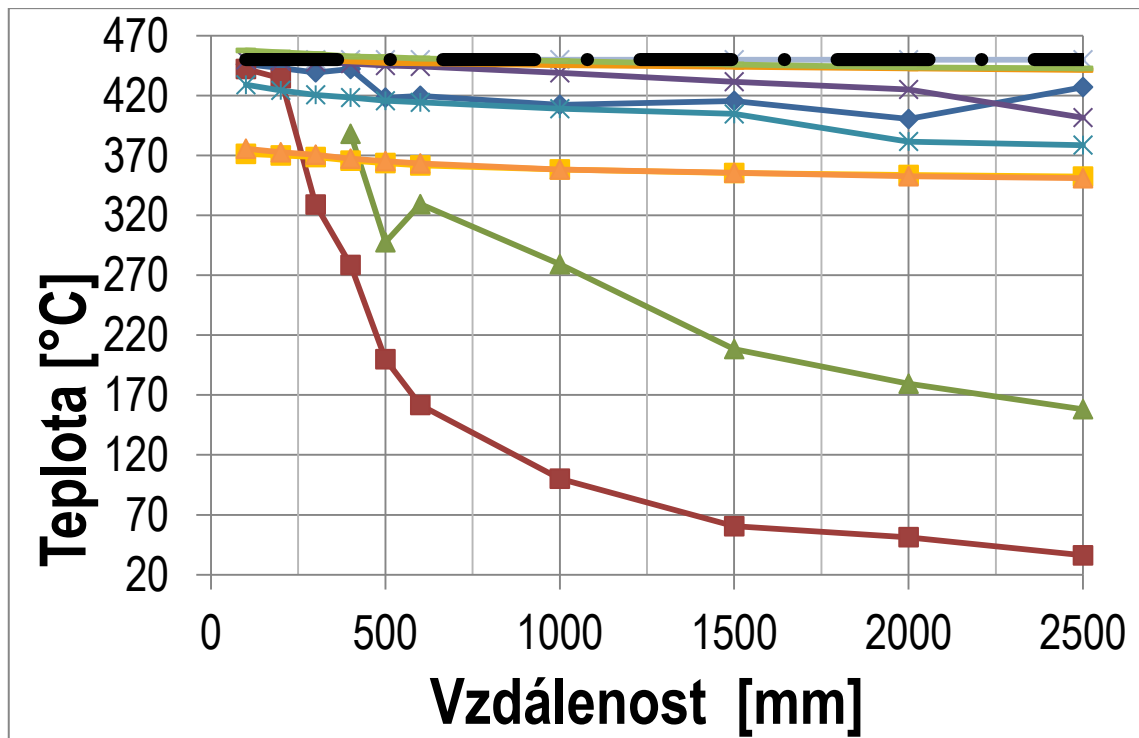
Z grafu na obr. 14 je velmi dobře vidět, že nestále měří přístroj IAN 271160, který je velmi nespolehlivý. Na křivkách pro přístroje Minolta Land Cyclops Mini View a Proscan 530, který byl nastavený na široké snímání (D:S je 4:1), je vidět, že naměřené hodnoty jsou ovlivněny teplotou pozadí a nesnímaly jen teplotu černého tělesa, to souhlasí s očekáváním (v tabulce 1 červené hodnoty). Dalším přístrojem, který neměří zcela přesně, je kamera Flir S65, která, jak se později ukázalo, má zcela vadný detektor. To se více projevilo při měření vyšších teplot, kde jsou rozdíly naměřené teploty od teploty nastavené na terčiku černého tělesa mnohem výraznější.



Obrázek 14 – Graf pro $T = 200^{\circ}\text{C}$

Obr. 15 představuje měření pro povrchovou teplotu 200°C . Na tomto grafu je opět vidět nespolehlivost přístroje IAN 271160 a nevhodnost použití nastavení širokého poměru D:S u přístroje Proscan 530. U kamery Flir S65 je dobře patrné, že měří s výraznou chybou. Protože je ale tato nejistota konstantní, je zřejmé, že se jedná o vadu detektoru / infračerveného snímače). Křivka nastavené teploty a naměřené teploty je proto téměř „rovnoběžná.“

Obecně lze z měření konstatovat, že bezkontaktní teploměry jsou s rostoucí vzdáleností od měřeného objektu méně přesné než termokamery.

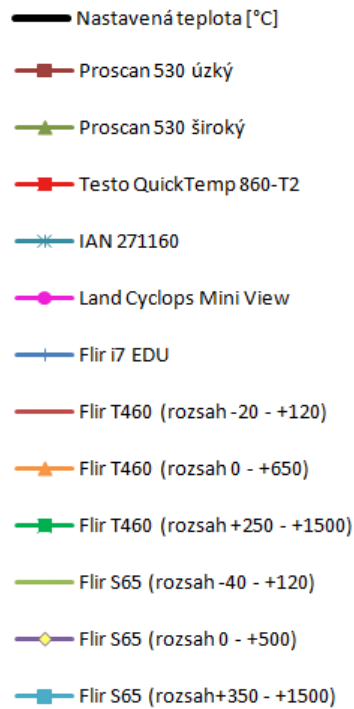


Obrázek 15 – Graf pro $T = 450^{\circ}\text{C}$

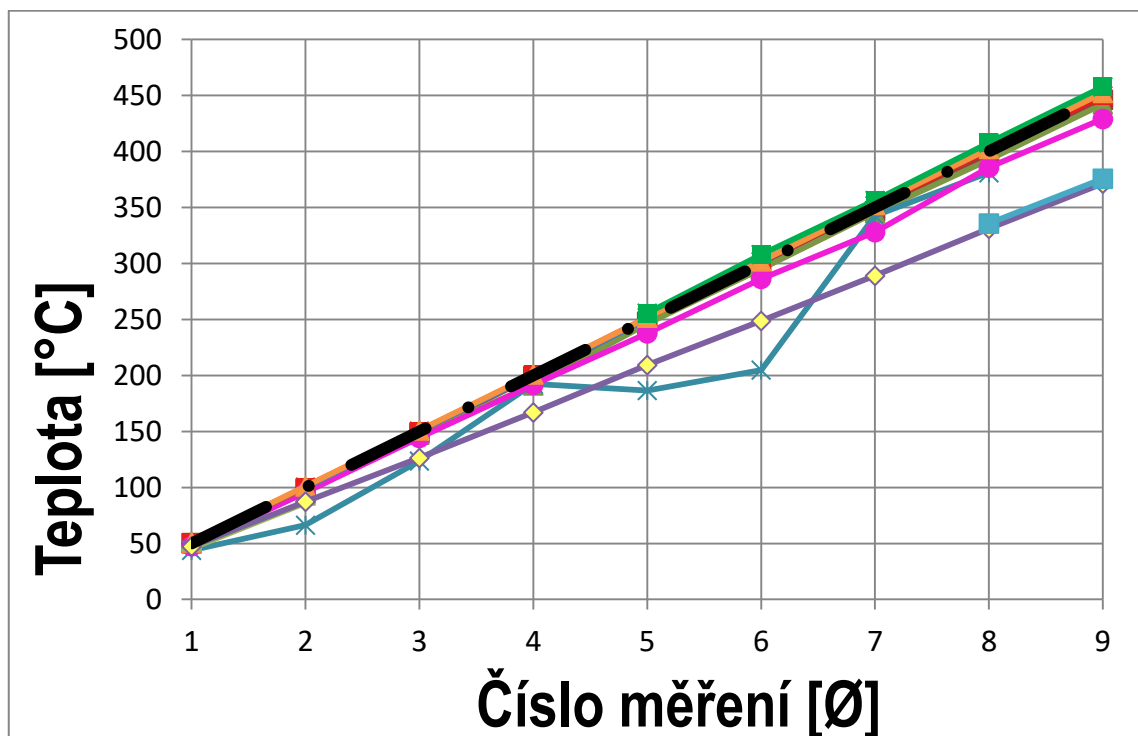
Z grafu na obr. 16 lze odečíst opět ty stejné závěry jako u předchozích dvou grafů. Termokamera Flir T460 je nejpřesnější zařízení, které bylo použito. Jako nejlepší z bezkontaktních teploměrů lze doporučit Testo QuickTemp 860-T2.

4.2 Vyhodnocení přesnosti elektroniky kamer

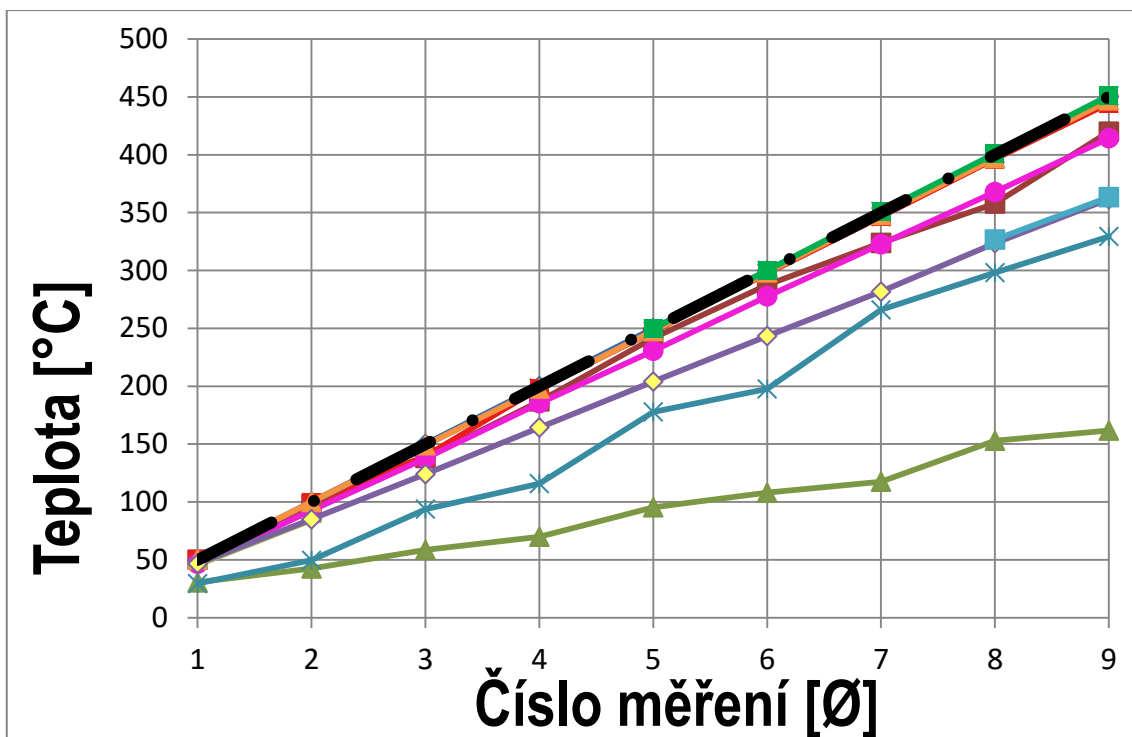
Legenda na obr. 17 je pro přehlednost následujících grafů opět společná.



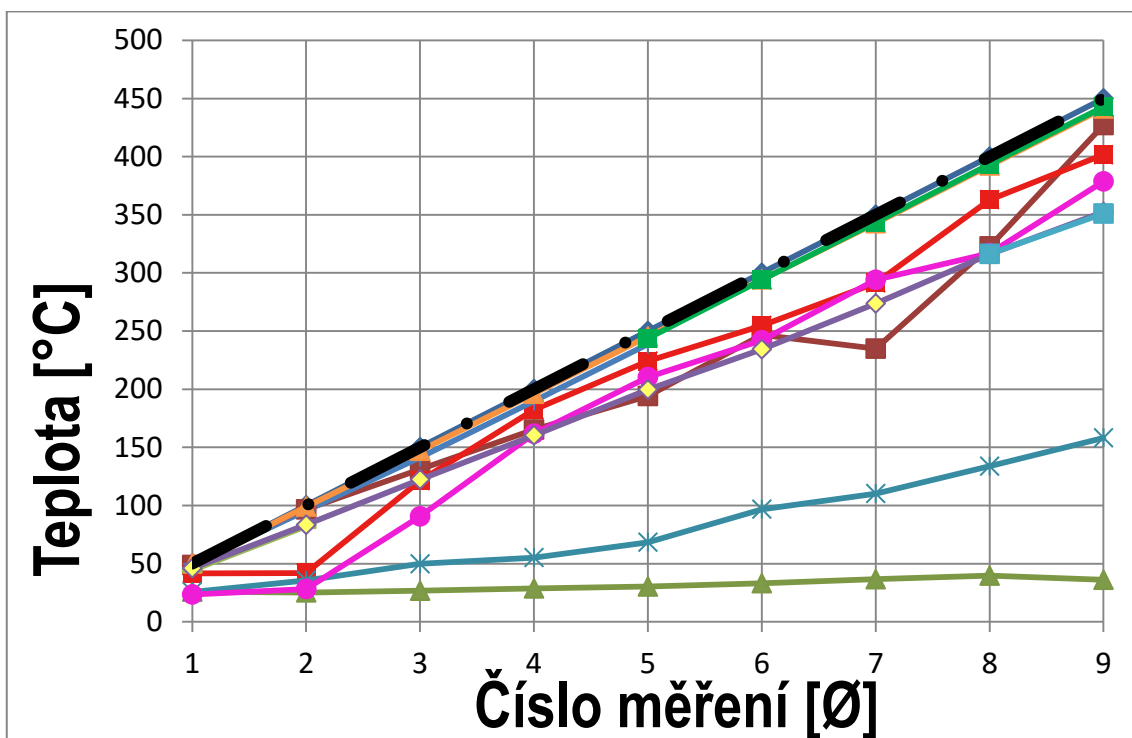
Obrázek 16 – Legenda k obrázkům (grafům) 18, 19 a 20



Obrázek 17 – Graf pro $L = 100 \text{ mm}$



Obrázek 18 – Graf pro $L = 600 \text{ mm}$

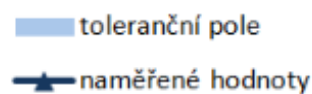


Obrázek 19 – Graf pro $L = 2500 \text{ mm}$

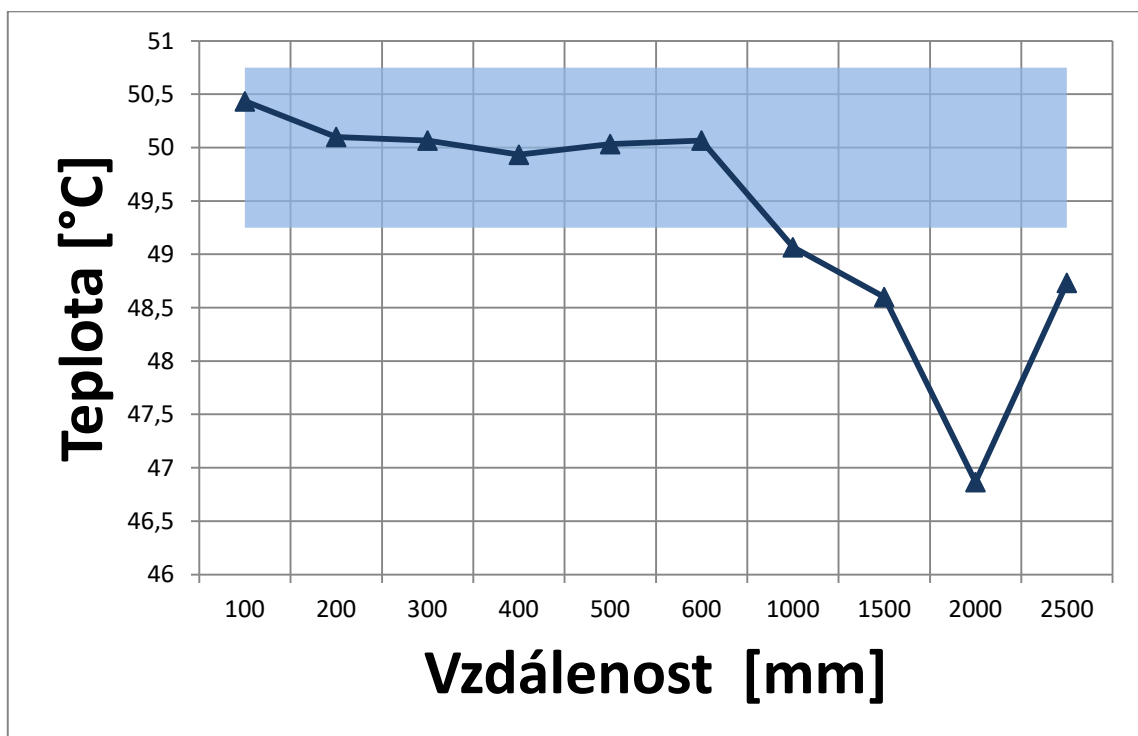
Pokud se podíváme na všechny grafy na obr. 18 až 20, vidíme, že s rostoucí vzdáleností roste i nejistota měření. Opět vidíme, že bezdotykový teploměr Proscan 530 s nastavením tzv. „do široka“ není vhodný k měření tak malé plochy jako mělo černé těleso.

4.3 Vyhodnocení tolerancí udávaných výrobcem

Z použitých přístrojů jsem vybral 3 zástupce a pro každý z nich jsem udělal graf pro měření při 50°C. V tabulce 6 na příloženém CD jsou tyto grafy i pro jiné teploty.

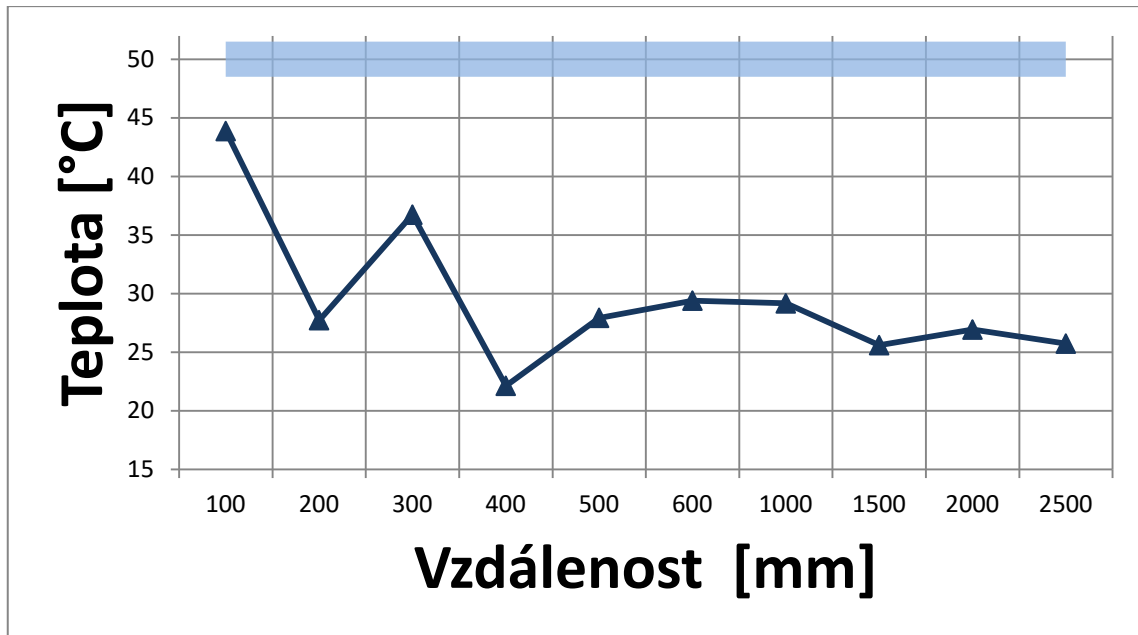


Obrázek 20 – Legenda k obrázkům (grafům) 22, 23 a 24



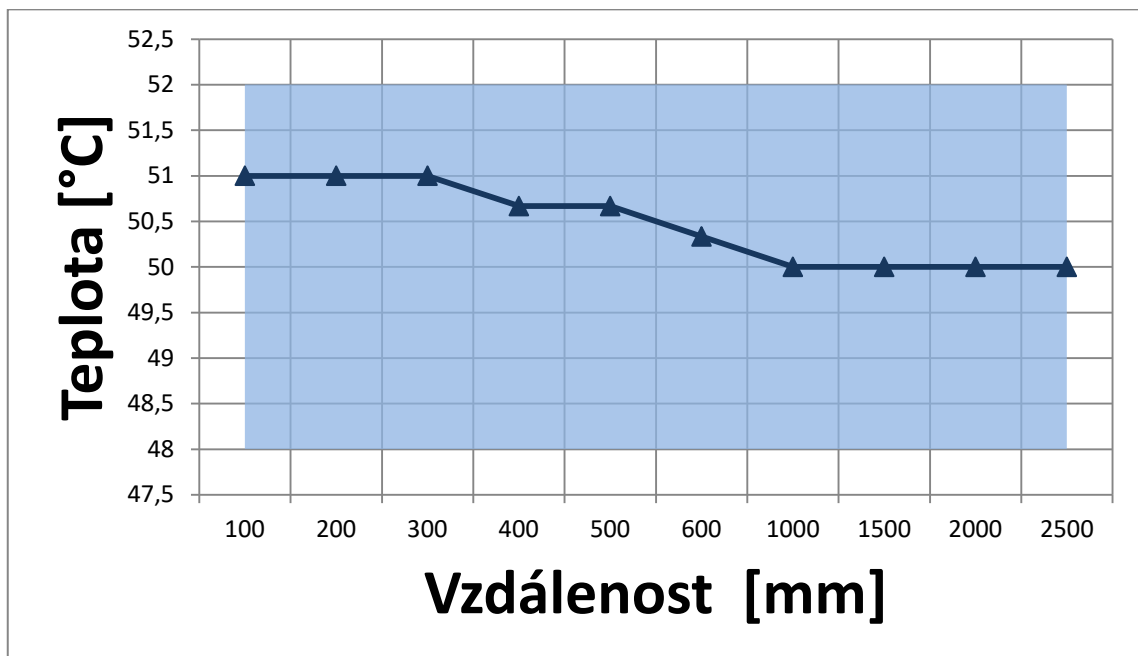
Obrázek 21 – Toleranční pole Proscan 530 – 50°C

Je vidět, že pyrometr Proscan 530 měří v tolerančním pásmu do vzdálenosti 1 metr. Tato hodnota se však s rostoucí nastavenou teplotou měnila. S rostoucí vzdáleností přesnost měření klesá.



Obrázek 22 – Toleranční pole IAN 271160 – 50°C

Bezkontaktní teploměr IAN 271160 nedodržel ani při jednom měření toleranci, kterou výrobce udal. Přístroj hodnotím jako vysoce nespolehlivý.



Obrázek 23 – Toleranční pole Flir T460 – 50°C

Z obrázku 24 je patrné, že termovizní kamera Flir T460 měří v tolerančním poli přístroje, který výrobce udává, a to bez ohledu na vzdálenost od měřeného objektu.

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ OBÁLKY BUDOV

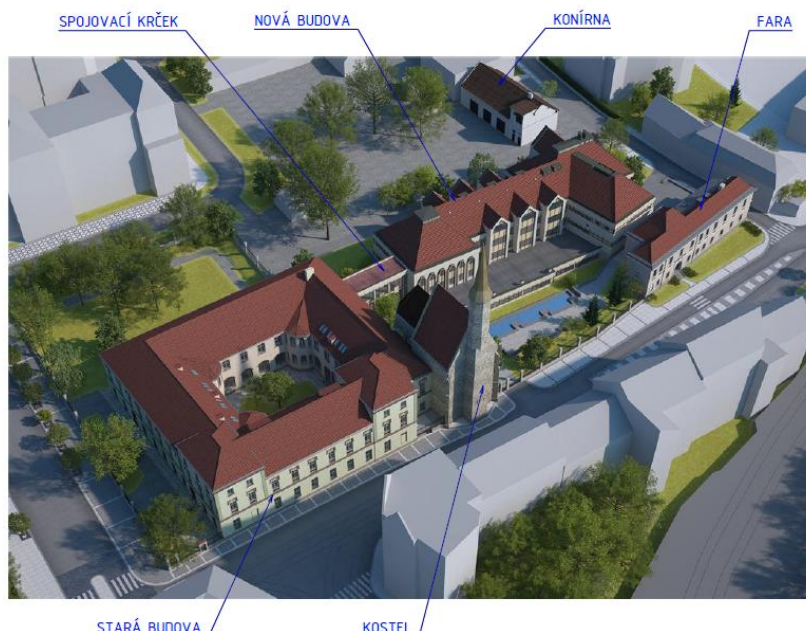
Následující kapitola shrnuje měření vnějšího a vnitřního opláštění budovy.

5.1 Cíl měření

Úkolem bylo posoudit tepelný stav obálky budov. Součástí zadání je i posouzení vlivu okrajových podmínek na měření.

5.2 Popis místa

Předmětem měření byl Revmatologický ústav (stará budova, nová budova a fara) v ulici Na Slupi 450/4, 128 00 Praha. Jedná se o soubor pěti budov. Na jihu je menší historická budova označovaná jako administrativní budova („fara“), ve které je lékárna a přednáškové prostory. Vedle je hlavní budova („nová budova“) s většinou novějších vyšetřoven, laboratoří atd. K ní je ze severu spojovacím krčkem napojena stará budova s lůžkovým oddělením, dalšími vyšetřovnami a zázemím. Přilehlý kostel a „konírna“ nebyly součástí měření.



Obrázek 24 – 3D model Revmatologického ústavu [12]

5.2.1 Fara

Vznik stavby se datuje do 16. století, ale v 90-tých letech minulého století stavba prošla rozsáhlou rekonstrukcí. [13]

5.2.2 Nová budova

Objekt je čtyřpodlažní, s jedním podzemním podlažím pod celým objektem (stejně jako stará budova). Vznik stavby se datuje do 80. let 20. století [14].

5.2.3 Stará budova

Jedná se o bývalou budovu kláštera. Stavba vznikla v cca 16. století [15].

5.2.4 Vytápění budov

Vytápění hlavní budovy, administrativní budovy a spodního patra spojovacího krčku zajišťuje střešní plynová kotelna v hlavní budově se čtyřmi kotli De Dietrich DTG 350 – 00, celkem o cca 720 kW. Stará budova a horního patra spojovacího krčku je vytápěno střešní kotelnou ve staré budově, která má dva kotle De Dietrich DTG 330 – 14 Eco.NoX o celkovém výkonu 468 kW [16].

5.3 Použité přístroje

Měření bylo prováděno bezkontaktním teploměrem Flir i7 a termokamerou Flir T460. Oba přístroje jsou více popsány v kapitolách 3.3.5 a 3.3.6.

5.4 Podmínky měření

Měření proběhlo 23. března 2017. Pro následující externí podmínky:

- Teplota vzduchu: $t_e = 10,3 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Relativní vlhkost vzduchu: $\varphi_e = 63 \text{ } \%$,
- Obloha byla zatažená
- Emisivita: $\varepsilon_e = 0,85$ (nebyla měřena)
- Odražená teplota: $t_{ob} = -9,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (vypočítáno vztahem (7))

A dále pro podmínky v interiéru:

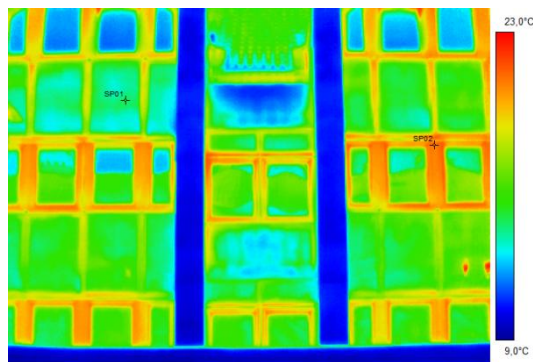
- Teplota vzduchu: $t_i = 24 \text{ °C}$
- Relativní vlhkost vzduchu: $\varphi_i = 30 \text{ %}$
- Emisivita: $\varepsilon_e = 0,85$
- Odražená teplota – střední radiační teplota: $t_r = 23 \text{ °C}$

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ (KAPITOLY 5)

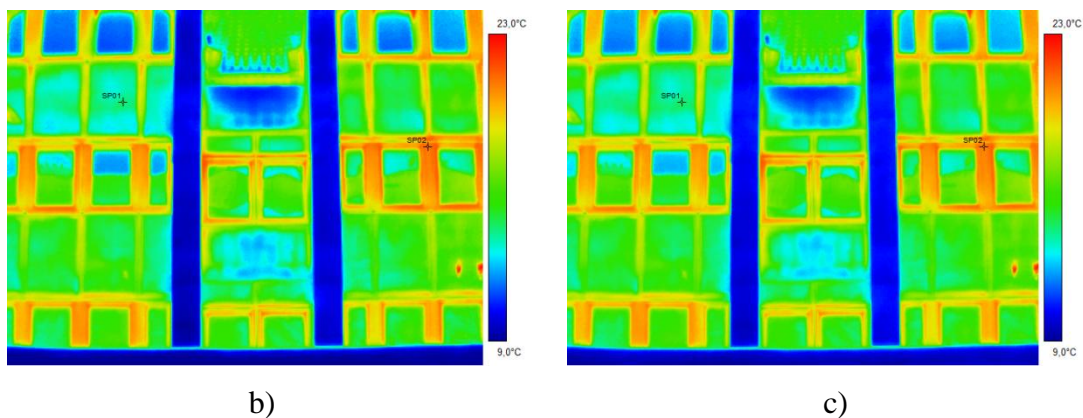
6.1 Vliv změn okrajových podmínek

Nyní se budeme blíže zabývat zkoumáním vlivu okrajových podmínek. Postupně budou měněny: vzdálenost kamery a měřeného objektu, vlhkost, teplota okolního vzduchu, emisivita a odražená teplota. V následujících podkapitolách je uveden vždy jeden termogram z měření Revmatologického ústavu a k němu další dva, které jsou upravené v programu ThermaCAM Researcher Pro 2.10. U nich jsou měněné některé okrajové podmínky. Termografy jsou z kamery Flir T460, kde je výrobcem udávaná nejistota měření $\pm 2 \text{ %}$ nebo 2 °C pro teploty větší než 25 °C .

6.1.1 Změna vzdálenosti a vlhkosti



a)



Obrázek 25 – Termogram fasády budovy

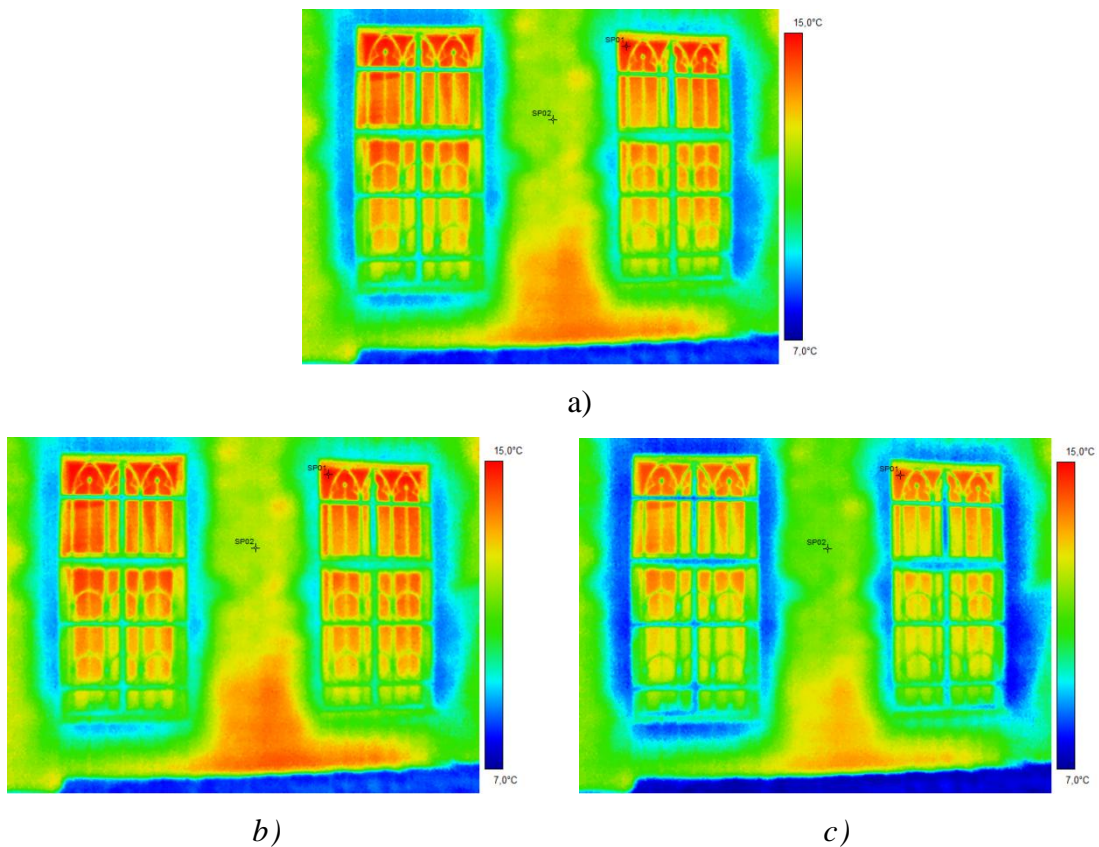
- a) Změna relativní vlhkosti na 20 %
- b) Změna vzdálenosti na 500 m
- c) Změna relativní vlhkosti na 99 %

Tabulka 2 – Změny sledované při změně relativní vlhkosti a vzdálenosti dle obrázků

Parametry	Relativní vlhkost 20 %, vzdálenost 15 m	Relativní vlhkost 63 %, vzdálenost 300 m	Relativní vlhkost 98 %, vzdálenost 15 m
Maximální teplota termogramu [°C]	21,3	22	21,4
Minimální teplota termogramu [°C]	9,0	8,6	9,0
Teplota v bodě SP01 [°C]	12,2	12,2	12,2
Teplota v bodě SP02 [°C]	15,6	15,7	15,6

Jak je vidět na termogramech, tak změny jsou na nich nepatrné. Přesné údaje jsou v tabulce. Výsledky ukazují, že špatné nastavení relativní vlhkosti neznamená v měření významnou chybu, která by byla větší než tolerance udávaná výrobcem. Pokud ale nastavíme špatně vzdálenost, tak už chyba bude větší skoro o 4 %. Zkoumání vlivu vzdálenosti se ale více věnuje kapitola 3 [1].

6.1.2 Změna teploty okolního vzduchu



Obrázek 26 – Termogram fasády budovy

- a) Zadání při skutečné teplotě
- b) Změna teploty na $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- c) Změna teploty na $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$

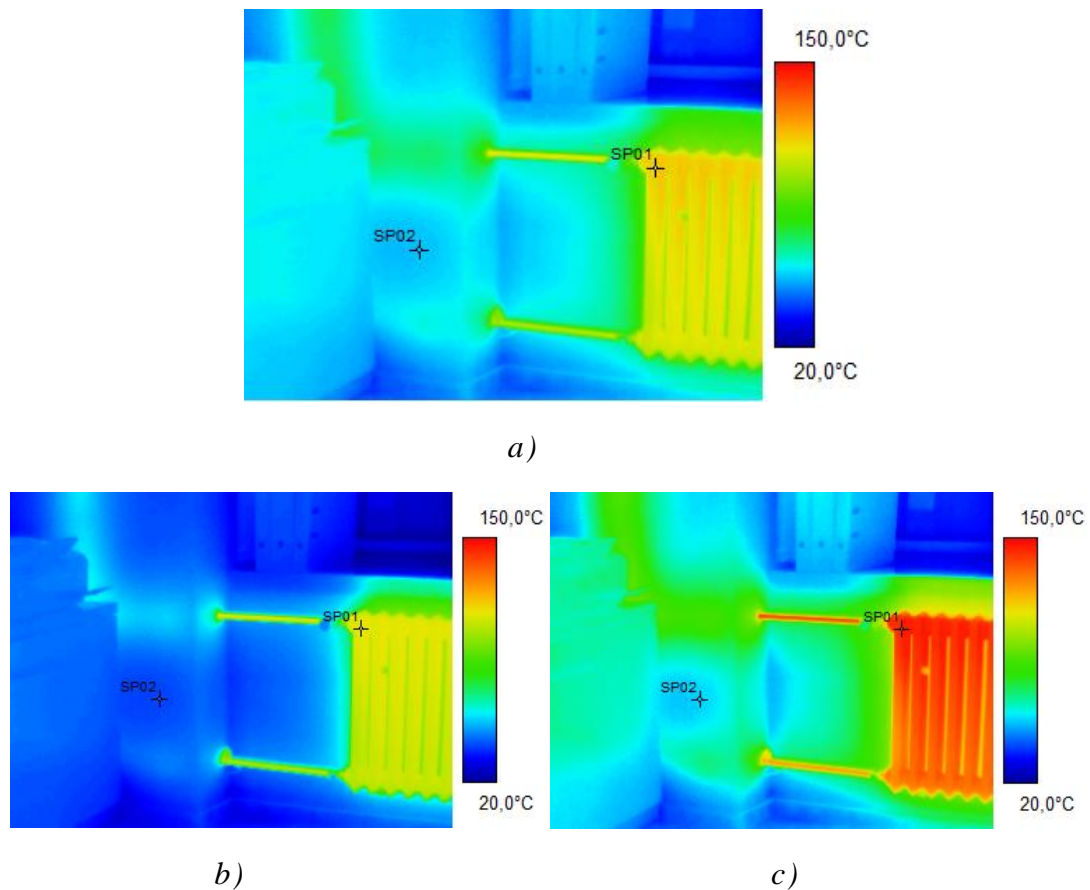
Tabulka 3 – Změny sledované při změně teploty vzduchu dle obrázků

Parametry	Teplota vzduchu $10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$	Teplota vzduchu $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$	Teplota vzduchu $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$
Maximální teplota termogramu [$^{\circ}\text{C}$]	14,6	14,9	12,3
Minimální teplota termogramu [$^{\circ}\text{C}$]	9,6	10,0	7,1
Teplota v bodě SP01 [$^{\circ}\text{C}$]	14,4	14,7	12,1
Teplota v bodě SP02 [$^{\circ}\text{C}$]	12,2	12,5	9,8

Pře změně teploty okolního vzduchu se již změny projevily i na termogramech. Na obrázku 27c je vidět, že stěna mezi okny vypadá chladnější. Pokud teplotu vzduchu

zadáme chybně, ale nižší než je skutečná teplota, tak se chyba neprojeví v tak velkém rozsahu, jako když teplotu nastavíme vyšší. Ačkoli se pohybujeme v malých teplotách (10,3 °C), tak je rozdíl teplot veliký, v našem případě 15,7 % (při venkovní teplotě +50 °C) [1].

6.1.3 Změna emisivity



Obrázek 27 – Termogram interiéru budovy

a) Zadání při skutečné emisivitě

b) Změna emisivity na $\varepsilon = 0,99$

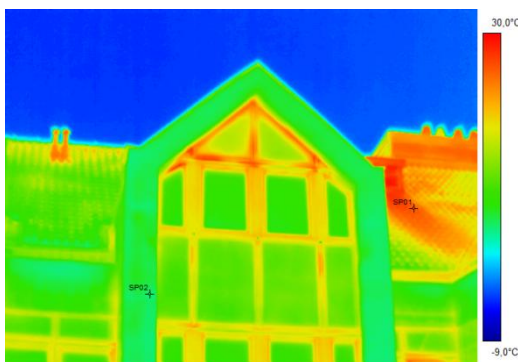
c) Změna emisivity na $\varepsilon = 0,2$

Tabulka 4 – Změny sledované při změně emisivity dle obrázků

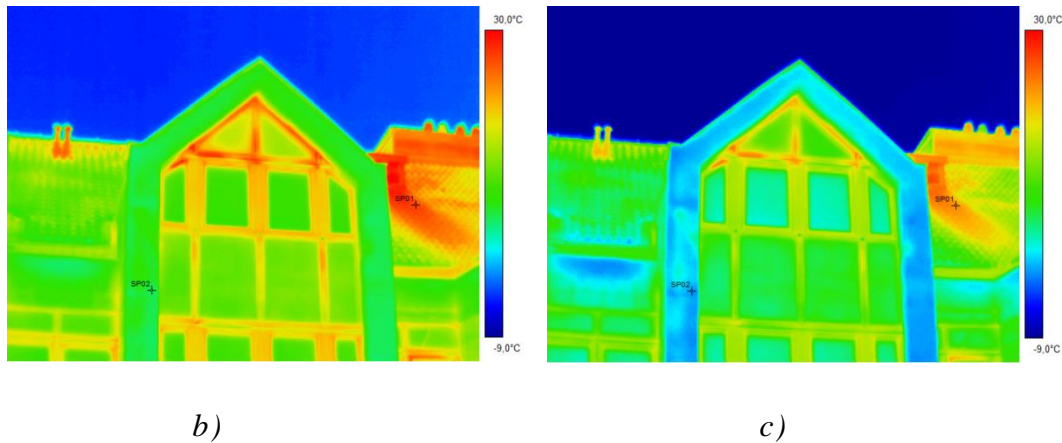
Parametry	Emisivita 0,85	Emisivita 0,99	Emisivita 0,2
Maximální teplota termogramu [°C]	53,3	47,7	146,3
Minimální teplota termogramu [°C]	20,9	19,0	57,7
Teplota v bodě SP01 [°C]	25,9	47,4	145,3
Teplota v bodě SP02 [°C]	27,0	24,4	75,9

Při špatném nastavení emisivity jsou rozdíly teplot největší. Proto je emisivita nejdůležitější okrajovou podmínkou. Z tabulky 4 vidíme, že už při změně emisivity jen o 16 % se výsledná teplota změnila v řádu desítek stupňů Kelvina. Pokud emisivitu snížíme, teplota měřeného objektu roste. V našem případě měření obálky budovy je nutné říci, že každý materiál má jinou emisivitu, a tak by pro přesné vyhodnocení teploty bylo potřeba měřit jednotlivé části budovy zvlášť nebo pro nastavenou hodnotu emisivity vyhodnocovat jen určitou oblast termografu (např. zvolit emisivitu omítky a vyhodnocovat jen omítnuté části budovy) [1].

6.1.4 Změna odražené teploty



a)



Obrázek 28 – Termogram fasády budovy

- a) Zadání při skutečné odražené teplotě
- b) Změna odražené teploty na -50 °C
- c) Změna odražené teploty na $+50\text{ °C}$

Tabulka 5 – Změny sledované při změně odražené teploty dle obrázků

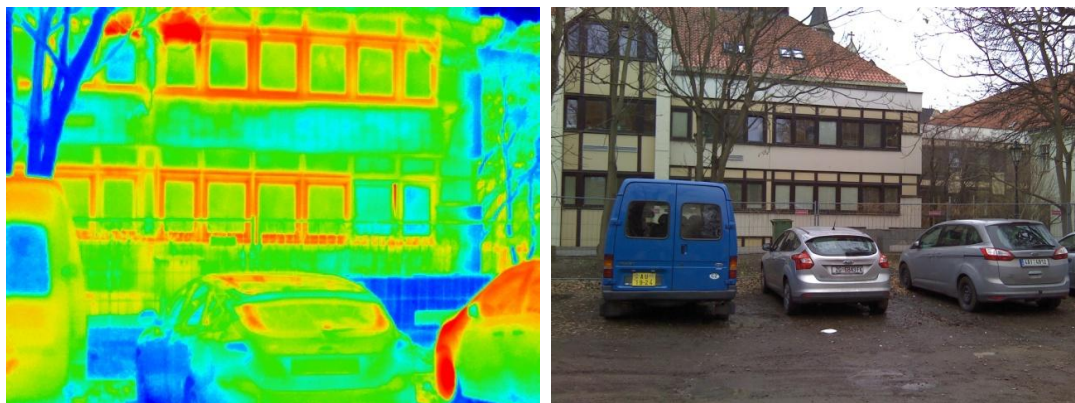
Parametry	Odražená teplota $-9,2\text{ °C}$	Odražená teplota -50 °C	Odražená teplota $+50\text{ °C}$
Maximální teplota termogramu [$^{\circ}\text{C}$]	27,3	30,8	17
Minimální teplota termogramu [$^{\circ}\text{C}$]	4	8,5	-9,5
Teplota v bodě SP01 [$^{\circ}\text{C}$]	20,4	24,2	9,3
Teplota v bodě SP02 [$^{\circ}\text{C}$]	10,2	14,4	-2,3

Odražená teplota je v našem případě (měření exteriéru) teplotou oblohy. Při pohledu na termografy je patrné, že pokud nastavíme odraženou teplotu vyšší, zobrazovaná povrchová teplota významně klesne [1]. Změny jsou na obrázku 29c patrné hlavně proto, že je odražená teplota změněna o více než 600 %.

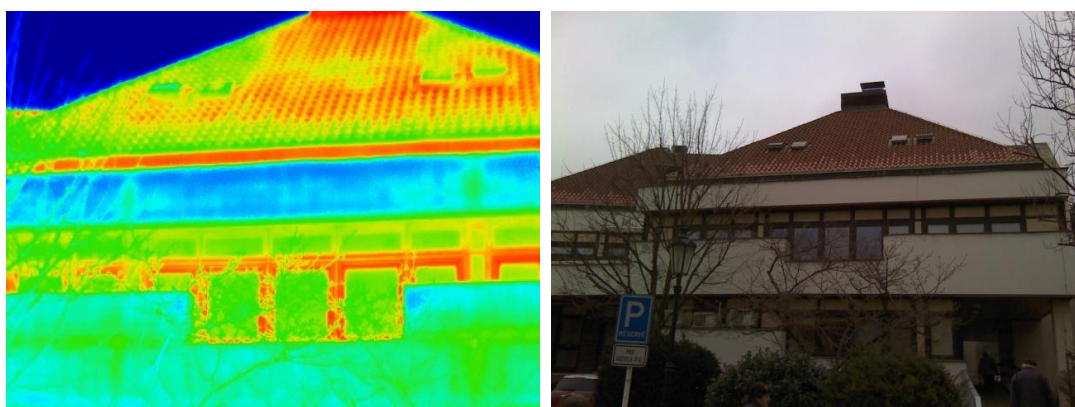
6.2 Tepelný stav budovy

U všech termogramů jsou nastaveny okrajové podmínky uvedené v kapitole 5.4.1 a 5.4.2. Vzdálenost od měřeného objektu jsem volil podle odečtu z map a některé odhadem. Následující termogramy ale slouží především ke vzájemnému srovnání, a tak mají všechny stejnou teplotní stupnici, a to v rozsahu 5 °C až 17 °C (obrázky exteriéru). Všechny termogramy jsou doplněny o fotografii části budovy, která byla měřena.

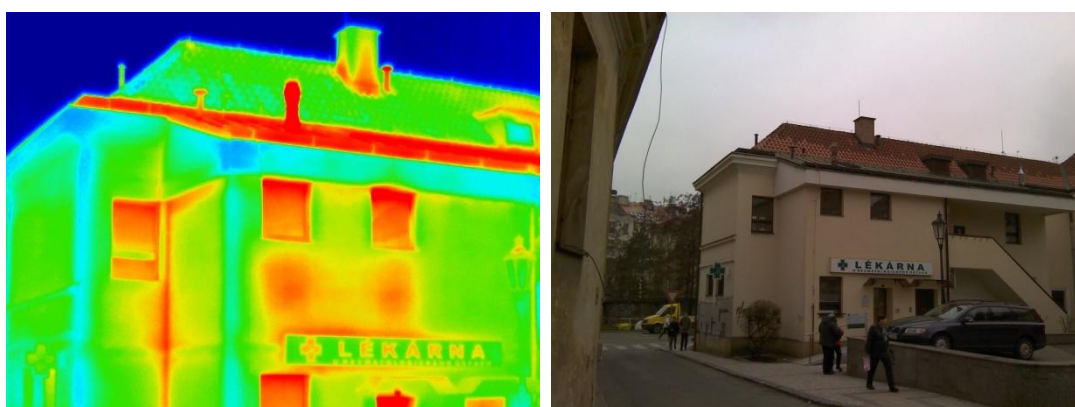
6.2.1 Exteriér



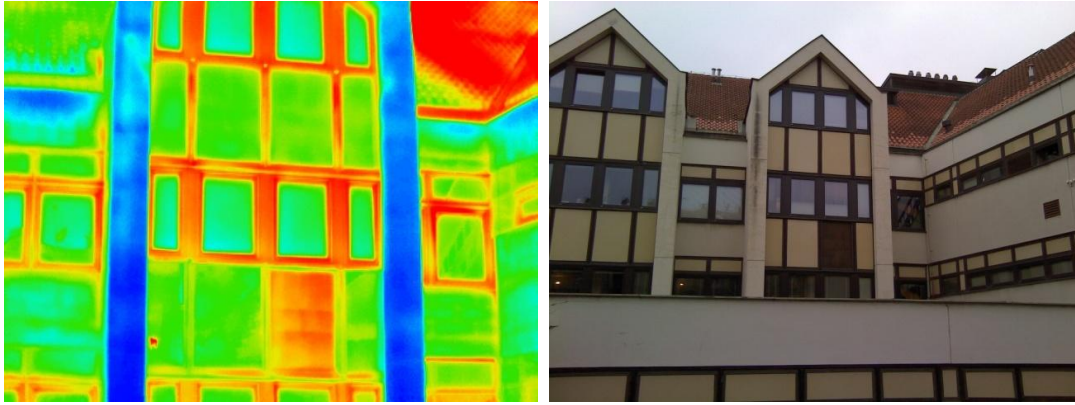
Obrázek 29 – Východní strana nové budovy



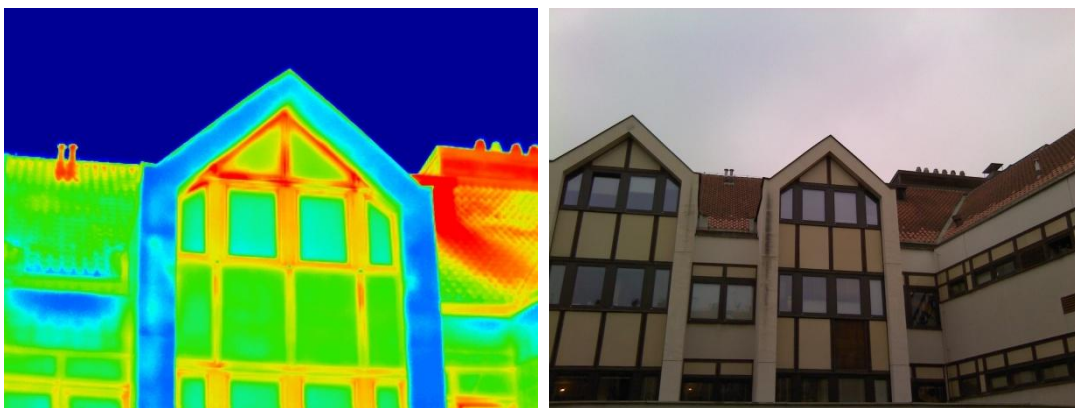
Obrázek 30 – Jižní strana nové budovy, pohled z ulice Horská



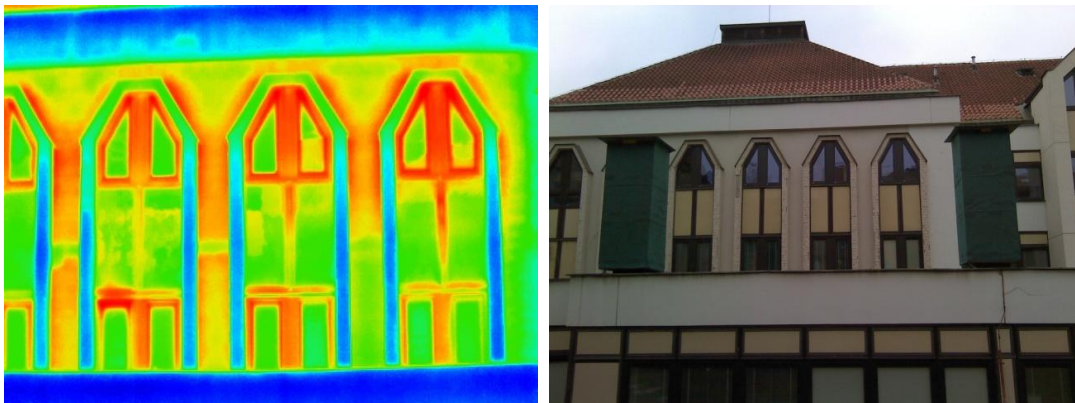
Obrázek 31 – Východní strana fary (lékárna)



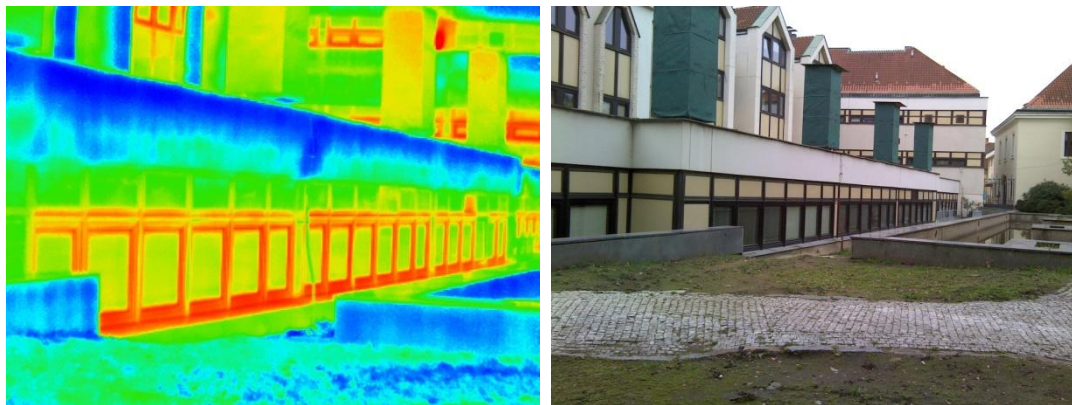
Obrázek 32 – Západní fasáda (část blíže k ulici Horská)



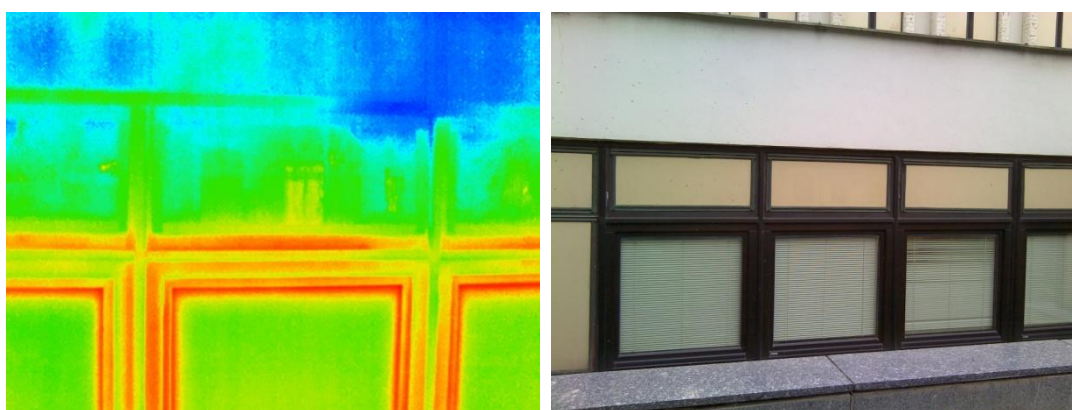
Obrázek 33 – Detail špičky stavební konstrukce



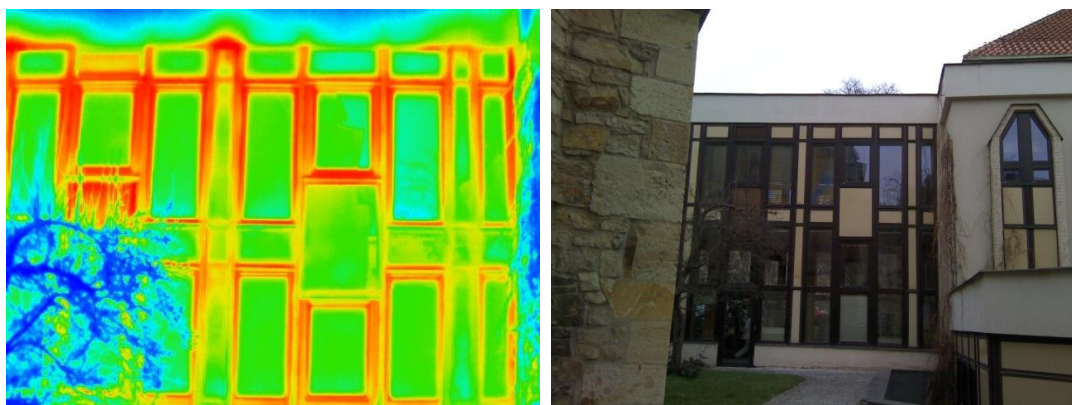
Obrázek 34 – Západní fasáda nové budovy (část blíže ke staré budově)



Obrázek 35 – První patro nové budovy

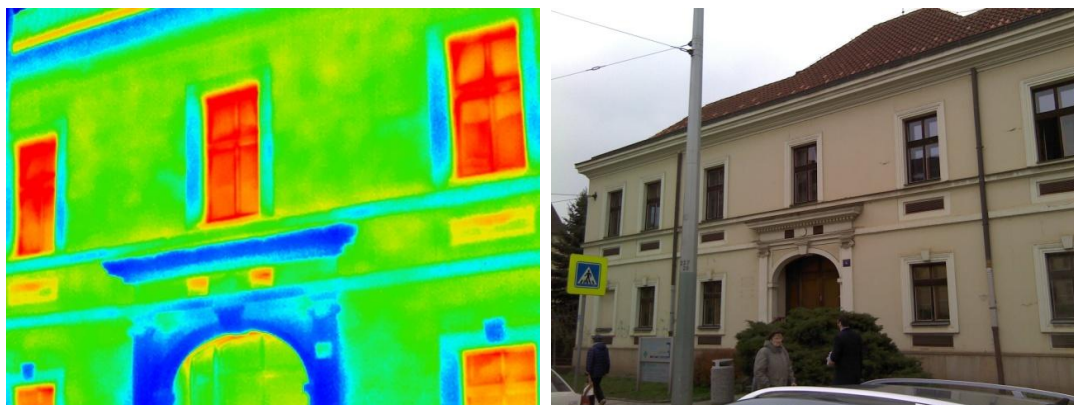


Obrázek 36 – Detail okenního ránu v prvním patře nové budovy



Obrázek 37 – Spojovací krček mezi starou a novou budovou

V současném stavu jsou ve spojovacím krčku dřevěná okna (cca 70 mm rámy) s dvojsklem $U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Obrázek 38 – Budova fary (měřeno z ulice Na Slupi)

V administrativní budově jsou nyní okna špaletová dřevěná, vnitřní křídla s užším izolačním dvojsklem. Pod okny zazděné bývalé větrací otvory.



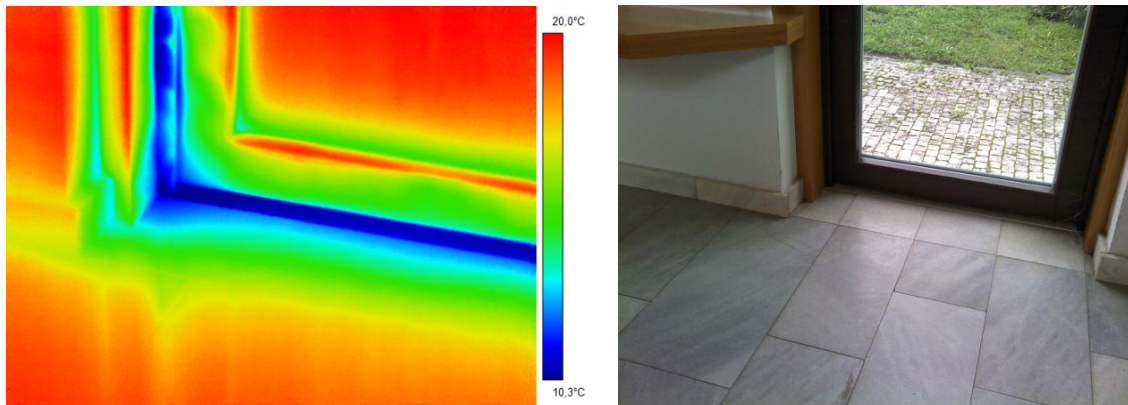
Obrázek 39 – Severní fasáda staré budovy

Vnější fasády staré budovy mají dřevěné vstupní dveře a špaletová okna s užším izolačním dvojsklem.

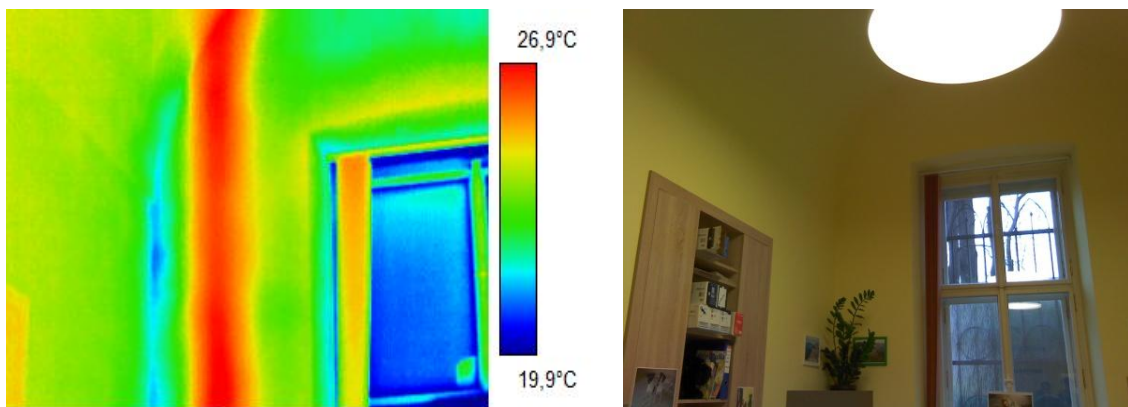


Obrázek 40 – Severní fasáda staré budovy (potrubí systému vytápění)

6.2.2 Interiér



Obrázek 41 – Detail spodní části dveří v spojovacím krčku mezi starou a novou budovou



Obrázek 42 – Místnost v přízemí staré budovy – podatelna

7 ZÁVĚR

7.3 Vyhodnocení měření bezkontaktními přístroji – experiment

Cílem měření bylo zjistit vliv vzdálenosti měřeného objektu a bezkontaktního teploměru na naměřenou teplotu. To je znázorněno v grafech v kapitole 4.

Naměřená teplota na této podmínce velmi závisí. Celkově se dá říci, že se zvětšující se vzdáleností L roste i chyba měření. Závislost teploty a vzdálenosti L je následující: Čím jsme od tělesa dále, tím nižší teplotu (oproti nastavené teplotě) naměříme. To ale úplně neplatí u termokamer.

Výhoda termokamer oproti pyrometrům je hlavně v tom, že nasnímaný termogram lze zpětně vyhodnocovat v počítači, kde je možné nastavit jednotlivé okrajové podmínky. Tuto funkci pyrometry nemají. Dále by bylo vhodné, kdyby výrobci bezdotykových teploměrů udávali i relativní chybu měření v závislosti na vzdálenosti L .

Termovizní kamery jsou přesnější než bezkontaktní měřicí přístroje, a to bez ohledu na vzdálenost.

7.4 Vyhodnocení měření obálky budovy

Stav tepelné izolace potrubí systému vytápění je špatný. Z termogramu na obrázku 41 je patrné, že únik tepla z trubky tepelného systému je vidět na vnější fasádě budovy.

Na nové budově jsou stará dřevěná okna a jsou zde vidět výrazné tepelné mosty a úniky tepla. V případě výměny oken za nová bude potřeba řešit nucené větrání budovy. To znamená podřídit této opravě i vzduchotechniku.

Při případné rekonstrukci bych doporučoval vzít na naměřené výsledky zřetel.

Pokud by se historická budova zateplovala, náklady budou obrovské. Zároveň by se musely řešit problémy s památkovým úřadem, protože se jedná o budovu z 16. století.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] R. Vavříčka, *Bezkontaktní způsoby měření teploty*, 1. vyd. Společnost pro techniku prostředí, 2013.
- [2] V. Lysenko, *Detektory pro bezdotykové měření teplot*, 1. vyd. BEN - technická literatura, 2005.
- [3] M. Kreidl, *Měření teploty : senzory a měřicí obvody*, 1. vyd. BEN - technická literatura, 2005.
- [4] “ČERNÉ TĚLESO BB500 - kalibrace infračervených teploměrů (50 až 500 °C).” [Online]. Available: https://www.epristroje.cz/kalibrace_meridel-dostmann_electronic_cerne_teleso_bb500__kalibrace_infracervenych_teplomeru_50_az_500c-942841979-441744594-kalibracni-pec/. [Accessed: 13-May-017].
- [5] “Proscan 530 Infrared thermometer - Dostmann.” [Online]. Available: <http://www.dostmann-electronic.de/product/proscan-530-infrared-thermometer.html>. [Accessed: 13-May-2017].
- [6] “Testo 860-T1,” vol. 61, no. October, p. 6902, 2002.
- [7] “POWERFIX® Infrarot-Temperaturmessgerät - Lidl Deutschland - lidl.de.” [Online]. Available: <https://www.lidl.de/de/powerfix-infrarot-temperaturmessgeraet/p212041>. [Accessed: 13-May-2017].
- [8] Minolta, *cyclops_minilaser_miniview_dat_en.pdf*.
- [9] “FLIR i7 InfraRed Camera Compact Thermal Imaging (140x140) | TEquipment.NET.” [Online]. Available: <http://www.tequipment.net/Fliri7.html>. [Accessed: 13-May-2017].
- [10] “FLIR T460 Thermal Imaging Camera, MSX, UltraMax, 320 x 240 Resolution, - 4 - 2,732°F Range, 60 Hz - at the Test Equipment Depot.” [Online]. Available: <http://www.testequipmentdepot.com/flir/thermal-imagers/t4xx-series/thermal-imaging-camera-ultramax-t460.htm>. [Accessed: 13-May-2017].

- [11] “Flir S65 HS.” [Online]. Available:
<http://laser.ing.univaq.it/Research/Thermography/IRCamera.htm>. [Accessed: 13-May-2017].
- [12] “Výkresová dokumentace Revmatologického ústavu.”
- [13] Agral Plast, spol. s.r.o., “A- průvodní zpráva Fara,” 2016.
- [14] Agral Plast, spol. s.r.o., “A- průvodní zpráva Nová budova,” 2016.
- [15] Agral Plast, spol. s.r.o., “A- průvodní zpráva Stará budova,” 2016.
- [16] “Zpráva z místního šetření v objektu – PENB.”

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1 – Znázornění velikosti snímané plochy	12
Obrázek 2 – Schéma měření (stůl).....	13
Obrázek 3 – Černé těleso BB500	14
Obrázek 4 – Proscan 530	15
Obrázek 5 – Testo QuickTemp 860–T2	15
Obrázek 6 – IAN 271160	16
Obrázek 7 – Minolta Land Cyclops Mini View	17
Obrázek 8 – Flir i7	17
Obrázek 9 – Flir T460	18
Obrázek 10 – Flir S65	19
Obrázek 11 – Znázornění poměru D:S	20
Obrázek 13 – Legenda k obrázkům (grafům)14, 15 a 16	21
Obrázek 14 – Graf pro $T = 50^{\circ}\text{C}$	22
Obrázek 15 – Graf pro $T = 200^{\circ}\text{C}$	23
Obrázek 16 – Graf pro $T = 450^{\circ}\text{C}$	24
Obrázek 17 – Legenda k obrázkům (grafům) 18, 19 a 20	25
Obrázek 18 – Graf pro $L = 100\text{ mm}$	25
Obrázek 19 – Graf pro $L = 600\text{ mm}$	26
Obrázek 20 – Graf pro $L = 2500\text{ mm}$	26
Obrázek 21 – Legenda k obrázkům (grafům) 22, 23 a 24	27
Obrázek 22 – Toleranční pole Proscan 530 – 50°C	27
Obrázek 23 – Toleranční pole IAN 271160 – 50°C	28
Obrázek 24 – Toleranční pole Flir T460 – 50°C	28
Obrázek 25 – 3D model Revmatologického ústavu	29
Obrázek 26 – Termogram fasády budovy.....	32
Obrázek 27 – Termogram fasády budovy.....	33
Obrázek 28 – Termogram interiéru budovy	34
Obrázek 29 – Termogram fasády budovy.....	36
Obrázek 30 – Východní strana nové budovy.....	37
Obrázek 31 – Jižní strana nové budovy, pohled z ulice Horská	37
Obrázek 32 – Východní strana Fary (lékárna).....	37
Obrázek 33 – Západní fasáda (část blíže k ulici Horská)	38

Obrázek 34 – Detail špičky stavební konstrukce.....	38
Obrázek 35 – Západní fasáda nové budovy (část blíže ke staré budově).....	38
Obrázek 36 – První patro Nové budovy	39
Obrázek 37 – Detail okenního ránu v prvním patře Nové budovy.....	39
Obrázek 38 – Spojovací krček mezi starou a novou budovou.....	39
Obrázek 39 – Budova Fary (měřeno z ulice Na Slupi).....	40
Obrázek 40 – Severní fasáda staré budovy	40
Obrázek 41 – Severní fasáda staré budovy (potrubí systému vytápění).....	40
Obrázek 42 – Detail spodní části dveří v spojovacím krčku mezi starou a novou budovou.....	41
Obrázek 43 – Místnost v přízemí staré budovy – podatelna.....	41
Tabulka 1 – Poměr D:S.....	20
Tabulka 2 – Změny sledované při změně relativní vlhkosti a vzdálenosti dle obrázků .	32
Tabulka 3 – Změny sledované při změně teploty vzduchu dle obrázků.....	33
Tabulka 4 – Změny sledované při změně emisivity dle obrázků	35
Tabulka 5 – Změny sledované při změně odražené teploty dle obrázků.....	36
Tabulka 6 – Tabulka naměřených hodnot.xls.....	příložené CD