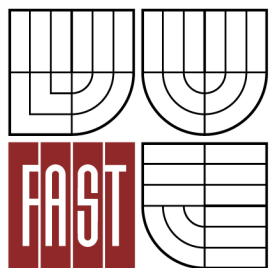




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

ANALÝZA STROPNÍHO VYTÁPĚNÍ

ANALYSIS OF CEILING HEATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LADISLAV CARBOL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LUCIE HOŘÍNKOVÁ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav technických zařízení budov

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Ladislav Carbol
Název	Analýza stropního vytápění
Vedoucí diplomové práce	Ing. Lucie Hořínková
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013

V Brně dne 31. 3. 2012


.....
doc. Ing. Jiří Hírš, CSc.
Vedoucí ústavu


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

1. Stavební dokumentace zadané budovy
2. Aktuální legislativa ČR
3. České i zahraniční technické normy
4. Odborná literatura
5. Zdroje na internetu

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Práce bude zpracována v souladu s platnými předpisy (zákony a vyhláškami, normami) pro navrhování zařízení techniky staveb.

A. Analýza tématu, cíle a metody řešení.

- Analýza zadaného tématu, normové a legislativní podklady
- Cíl práce, zvolené metody řešení
- Aktuální technická řešení v praxi
- Teoretické řešení (s využitím fyzikální podstaty dějů)
- Experimentální řešení (popis metody a přístrojové techniky)
- Řešení využívající výpočetní techniku a modelování

B. Aplikace tématu na zadané budově - koncepční řešení

- návrh technického řešení v zadané specializaci (včetně doložených výpočtů) v rozpracovanosti rozšířeného projektu pro stavební povolení: půdorysy v měřítku 1:100, stručná technická zpráva (v tématech zaměřených na energetickou náročnost budou využívány metody energetického auditu a aktuální legislativy)
- Ideové řešení navazujících profesí TZB (ZTI, UT, VZT) v zadané budově.
- Vyhodnocení použitého řešení z hlediska vnitřního prostředí, uživatelského komfortu, prostorových nároků, ekonomiky provozu, dopadu na životní prostředí apod.;

C. Algoritmizace, modelování, aplikace výpočetní techniky

- Teoretické řešení úlohy, vývoj vlastního výpočetního nástroje pro řešení zadaného jevu, aplikace software pro modelování fyzikálních dějů

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Lucie Hořínková
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou stropního vytápění ubytovacích prostor kolejí VUT. Obsahuje teoretický rozbor problematiky sdílení tepla sáláním a konvekcí u stropního vytápění. Součástí práce je vytvoření matematického modelu pro výpočet veličin, které charakterizují prostor s převážně sálavým vytápěním. Výstupy z modelu jsou porovnány s naměřenými hodnotami na reálné budově.

Abstract

Diploma thesis deals with analysis of radiant ceiling heating in VUT dormitories. The work contains a theoretical analysis of radiant and convection heat transmission of ceiling heating. Part of this work is creation of mathematical model for evaluation of variables typical for radiant ceiling heating. Model outputs are compared with data measured on a real building.

Klíčová slova

Stropní sálavé vytápění, kapilární rohože, sálání, konvekce, přestup tepla, střední radiační teplota, operativní teplota

Key words

Radiant Ceiling Heating, Capillary tube mats, radiation, convection, thermal transmission, mean radiant temperature, operational temperature

Bibliografická citace

CARBOL, Ladislav. Analýza stropního vytápění. Brno, 2013. 110 s., 2 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických
zařízení budov. Vedoucí práce Ing. Lucie Hořínková.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
podpis autora
Bc. Ladislav Carbol

Poděkování

Děkuji vedoucí mé diplomové práce, Ing. Lucii Hořínkové za odborné vedení a vstřícný přístup. Také děkuji rodičům za podporu při studii.

V Brně dne 6.ledna 2013

OBSAH

A	Analýza tématu, cíle a metody měření	3
1.1	Analýza tématu, cíl práce	3
1.2	Normové a legislativní podklady.....	6
1.3	Aktuální technická řešení v praxi	7
1.3.1	Praktický výpočet výkonu kapilárních rohoží	11
1.4	Teorie	14
1.4.1	Sálavé otopné systémy	14
1.4.2	Velkoplošné vytápění	16
1.4.3	Sdílení tepla	17
1.4.4	Sdílení tepla konvekcí	17
1.4.5	Sdílení tepla sáláním.....	19
1.5	Řešení využívající výpočetní techniku	25
1.5.1	Výpočetní modely a programy	25
1.5.2	MRT Analysis 3.7	27
1.6	Experiment	32
1.6.1	Měření tepelného stavu interního mikroklimatu	32
1.6.2	Popis měření	36
1.6.3	Měření vertikálního teplotního profilu	38
1.6.4	Měření teplot konstrukcí.....	41
1.6.5	Měření hustoty tepelného toku a stanovení součinitelů přestupu tepla	43
1.6.6	Nejvyšší přípustná teplota stropní otopné plochy	47
1.6.7	Použitá čidla a měřící zařízení.....	51
1.6.8	Závěr	52
B	Aplikace tématu na zadané budově – koncepční řešení	53
2.1	Popis objektu a navržené rekonstrukce	53
2.2	Výpočet tepelného výkonu	56
2.2.1	Stávající stav.....	57
2.2.2	Nový stav po zateplení.....	58
2.3	Návrh otopné plochy	59
2.4	Navazující profese.....	60
2.5	Technická zpráva	61

C	Algoritmizace, modelování, aplikace výpočetní techniky.....	72
3.1	Poměr osálení φ	72
3.2	Výpočtový model poměru osálení φ , střední radiační teploty a asymetrie radiační teploty	74
3.3	Vytvoření vztahu pro výpočet přestupu tepla sáláním.....	82
3.4	Tepelná bilance místnosti se sálavým vytápěním '	88
3.4.1	Tepelná rovnováha ochlazovaných stěn.....	89
3.4.2	Tepelná rovnováha vnitřního vzduchu	90
3.4.3	Tepelná pohoda člověka.....	90
3.4.4	Tepelná ztráta místnosti a výkon otopné plochy	91
3.4.5	Zjednodušený způsob vyjádření tepelné rovnováhy prostoru.....	92
3.5	Výpočtový model pro návrh teploty stropní otopné plochy.....	93
3.5.1	Řešič systému algebraických rovnic	97
3.5.2	Ověření správnosti programu.....	98
	Závěr.....	101
	Seznam obrázku a tabulek a grafu	102
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	106
	Seznam použité literatury	108
	Seznam příloh.....	110

A - ANALÝZA TÉMATU, CÍLE A METODY MĚŘENÍ

1.1 Analýza tématu, cíl práce

V dnešní době je známo mnoho způsobů, jak zajistit optimální tepelný komfort lidí v obytných či jinak využívaných prostorách. Jedná se o klasické konvekční otopné soustavy, teplovzdušné systémy, ale i převážně sálavé otopné soustavy. Každý způsob vytápění je svým způsobem odlišný. Konvekční vytápění, které se pro svou jednoduchost a cenovou dostupnost navrhuje nejčastěji, je specifické sdílením tepla do prostoru převážně konvekcí. Otopná tělesa plní funkci výměníku tepla mezi teplonosnou látkou a vzduchem v místnosti. Výkon otopného tělesa, se obecně odvíjí od geometrie tělesa, fyzikálních vlastností vzduchu a teplonosné látky. Dva fyzikální děje, a to sálání a konvekce, jsou nahrazeny součinitelem přestupu tepla. Procentuální zastoupení obou složek ve výsledném součiniteli pak určuje, zda se bude jednat o konvekční či sálavé vytápění. Nejjednodušším způsobem, jak zvýšit součinitel přestupu tepla konvekcí a potažmo i výkon tělesa, je zvýšením rychlosti proudění vzduchu. Taková otopná tělesa se nazývají fancoil, neboli tělesa s nucenou konvekcí vzduchu. Nejpoužívanější, desková otopná tělesa, se poměrem mezi sálavou a konvekční složkou blíží spíše ke konvekčnímu vytápění, ale to také není vždy pravdou. Vyzařovací schopnost jakéhokoliv tělesa se odvíjí od úplně jiných fyzikálních principů, než je tomu u proudění. Například po sdílení tepla sáláním hraje jen minimální roli samotné prostředí, tedy vzduch. Vzduch je za normálních podmínek transparentní a má jen minimum prachových částic, které by mohly pohlcovat sálavé teplo. Proto se sálavý výkon nemění s teplotou ani s rychlostí proudění vzduchu. Co je ovšem pro sálání velmi podstatné je barva povrchu, a to jak sálajícího otopného tělesa, tak osálané místnosti. Barvou je myšlena schopnost pohlcovat záření především ve vzdáleném infračerveném spektru. Z fyzikální podstaty každé těleso, které má teplotu vyšší než 0 K, sdílí teplo s okolím sáláním. Intenzita tohoto jevu se odvíjí jednak od emisivity obou těles, ale také od rozdílu čtvrtých mocnin teplot obou těles. Absolutní sálavý tok je umocněný plochou, kterou může těleso sálat do okolí. Proto například otopné těleso s jedinou, nejlépe rovnou deskou, má převažující sálavou složku. A těleso se žebry, která mohou osálat pouze samy sebe, mají dominantní právě konvektivní složku.

Aplikace sálavých systémů má dlouhou historii. Za nejstarší sálavé vytápění by se bez pochyb mohla považovat otevřená ohniště. Při spalování dřeva teplota plamene dosahuje 1100°C , a proto i relativně malé ohniště bylo schopno vyzářit i desítky kilowat do okolního prostoru. Na druhou stranu je nutné dodat, že ještě větší množství tepla přišlo na zmar vlivem přirozené konvekce. Dnes se přímého plamene pro sálavé vytápění používá především při spalování v krbových kamnech. Od tohoto principu se zcela neupustilo a spalování zemního plynu našlo své uplatnění hlavně pro vytápění průmyslových hal. Jde o takzvané světlé plynové zářiče. Zemní plyn je bezplamenně katalyticky spalován na povrchu keramických destiček, které pak sálají do vytápěného prostoru. Konstrukce těchto zářičů umožňuje, aby celých 70% tepla bylo sdíleno sáláním. Zbylých 30% tepla stoupá ke stropu ve formě ohřátého vzduchu. Existují i jiné typy zářičů, třeba tzv. tmavé zářiče nebo elektrické zářiče. Tyto typy sálavého vytápění se vyznačují vysokou teplotou, a proto se souhrnně nazývají vysokoteplotní. Jak jsem již v začátku zmínil, teplota a výkon sálajícího tělesa jsou úzce spjaty. Proto tmavé zářiče při teplotě okolo 190°C dosahují výkonu cca 20kW, ale světlé zářiče dosahující teplot i 950°C a mají výkon i přes menší plochu téměř dvojnásobný. Naskytují se tedy dva způsoby, jak pokrýt ztrátu daného prostoru, pokud ji chceme vytápět sálavým způsobem. Buď využijeme několik zářičů o vysoké teplotě, anebo zvolíme takzvané velkoplošné nízkoteplotní sálavé vytápění.



Obr. 1-1: Krbová kamna [9] a infračervený zářič [8]

Princip velkoplošného vytápění spočívá v instalaci otopné plochy do některé konstrukce obklopující místnost. Nejčastěji se preferují obvodové ochlazované konstrukce, protože tepelná ztráta prostupem těchto konstrukcí se pokryje ztrátovým výkonem otopné plochy. Vytápění může být nainstalované do stěn, ale i do stropu. Zdaleka nejčastější aplikací je vytápění podlahové. Má totiž několik nesporných výhod.

Jednak navozuje příjemný pocit tepla od nohou, ale hlavně poloha teplé podlahy napomáhá přirozené konvekci. Proto konvekční složka u podlahového vytápění činí cca 45%, což je z fyzikálního hlediska hlavní odlišností. Součinitel přestupu tepla pro podlahové vytápění je proto i při nízkých teplotách větší než u ostatních instalací, cca $10 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Další možností instalace je stěnové vytápění, u kterého je přijatelně velká konvekční složka. Na rozdíl od podlahového vytápění, u kterých jsme svázáni hygienickými a materiálovými omezeními na 29°C respektive 27°C , si u stěnového vytápění můžeme dovolit i vysoké povrchové teploty. Jednoznačně nejméně příznivá poloha otopné plochy z pohledu přirozené konvekce je strop. Na rozdíl od podlahového vytápění se však může nižší konvekční tepelný výkon kompenzovat vyšší teplotou. Dále pak je celá plocha stropu, až na několik světél, zpravidla nezakryta nábytkem, a proto může být otopná plocha instalovaná celoplošně, což vede k větší rovnoměrnosti radiační teploty v místnosti.

Sálavé vytápění se stává stále častějším způsobem vytápění. Bohužel se jejich aplikace, přestože je téměř neomezená, v praxi zužuje pouze na podlahové vytápění. Jen málokdy se setkáme s jiným využitím, snad možná pro vytápění vysokých výrobních hal a tělocvičen, kde jsou sálavé systémy jediným funkčně-ekonomickým řešením. Pravděpodobně je to způsobeno předsudky projektantů a větší pracností spojenou se správným návrhem tohoto systému. Možná proto se s velkoplošným sálavým vytápěním kanceláří a obytných místností vůbec nesetkáváme, přestože je z hygienického hlediska obzvláště výhodné (absence hluku, průvanu či víření prachu).

V diplomové práci se budu zabývat analýzou stropního sálavého vytápění v typickém pokoji studentských kolejí. V části B provedu návrh sálavého otopného systému s využitím kapilárních rohoží. Pro analýzu návrhu otopného systému byly v části C vytvořeny dva matematické modely. První model slouží pro výpočet střední radiační teploty v libovolném bodě místnosti a pro určení dalších veličin ovlivňujících interní mikroklima v místnosti se sálavým vytápěním. Okrajové podmínky pro tento model vychází z naměřených hodnot v řešené místnosti. Druhý model je určený pro ověření vhodnosti návrhu otopné plochy a pro úpravu jejich parametrů po plánovaném zateplení budovy. Oba zmíněné modely jsou založeny na fyzikálních představách sdílení tepla sáláním a rovnicích tepelné bilance. Použité výpočtové postupy vychází z principů popsaných v publikaci [4].

1.2 Normové a legislativní podklady

- ČSN EN 12831 - Tepelné soustavy v budovách - Výpočet tepelného výkonu (r 2005)
- ČSN 06 0310 Ústřední vytápění - Projektování a montáž (r 2006)
- ČSN EN 12828 Tepelné soustavy v budovách. Navrhování teplovodních tepelných soustav. (r 2005)
- Nařízení vlády č. 148/2006 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací

Normy a legislativa zabývající se tematikou velkoplošného stropního vytápění a interním mikroklimatem:

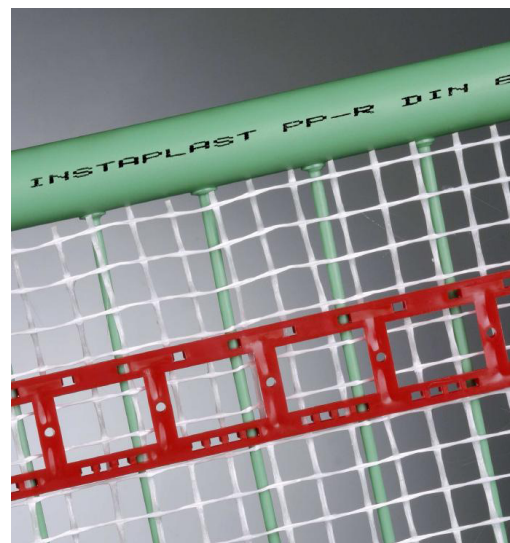
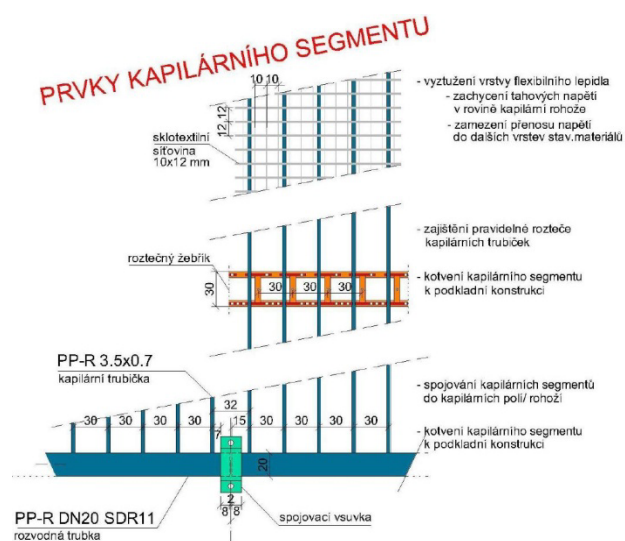
- ČSN 06 0312 - Ústřední sálavé vytápění se zabetonovanými trubkami. Projektování a montáž (r 1972)
- ČSN EN 1264-5 - Zabudované vodní velkoplošné otopné a chladicí soustavy - Část 5: Otopné a chladicí plochy zabudované v podlahách, střepech a stěnách - Stanovení tepelného výkonu (r 2009)
- ČSN EN ISO 7726 - Ergonomie tepelného prostředí - Přístroje pro měření fyzikálních veličin (r 2002)
- ČSN EN ISO 7730 - Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu (r 2006)
- NV 178/2001 Sb. - kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci, ve znění nařízení vlády č. 523/2002 Sb. (nahrazeno)
- NV 361/2007 Sb. - kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb.
- vyhláška 6/2003 - kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb

1.3 Aktuální technická řešení v praxi ¹

Jak jsem již zmínil v úvodu, nejčastější formou využití velkoplošného sálavého vytápění je podlahové vytápění. V této práci se však budu zabývat hlavně méně častou aplikací, a to stropním vytápěním. V zásadě jde vždy o stejný princip. Zabudovaným potrubím, popřípadě topnými kabely, se rozežřeje konstrukce a v závislosti na teplotě povrchu pak tato konstrukce sdílí teplo s ostatními povrchy v místnosti. Z konstrukčního hlediska se pokládají buď jednotlivé trubky do meandru či spirály, anebo se dá využít moderních kapilárních rohoží. Jako materiál topných hadů se v dnešní době preferuje kompozitní materiál PEX s kyslíkovou bariérou. Starší systémy používaly zabetonované pozinkované potrubí. Tento systém měl ovšem zbytečně velký objem vody, zanášel se vodním kamenem a korodoval. Proto bývá při rekonstrukcích nahrazován kapilárními rohožemi, které je možné nainstalovat do omítky a původní otopnou plochu ze systému odpojit.

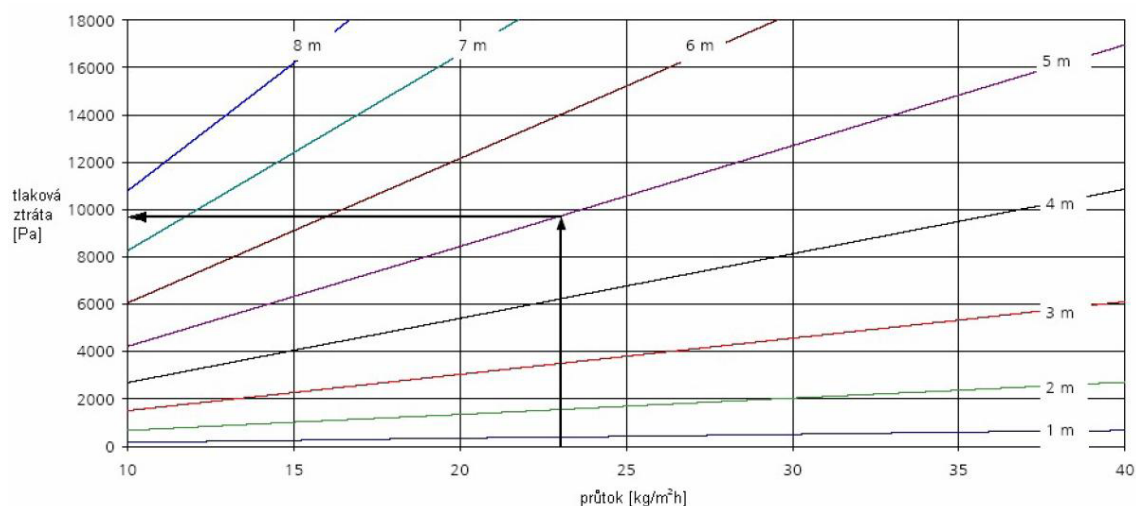
V současné době jsou na českém trhu k dostání kapilární rohože od dvou výrobců, a to HENNLICH (G-THERM) a INFRAKLIMA. Oba výrobci používají pro KR (kapilární rohože) materiál PP-R typ 3. Hlavním důvodem pro použití polypropylenu je ohebnost a odolnost proti zarůstání korozí. Právě z obavy z možného zanášení kapilár oba výrobci požadují, aby v okruhu s kapilárními rohožemi byly použity nekorodujících materiálů jakými jsou nerez, bronz a niklovaný bronz. Instalace KR do konstrukcí stropu či podlah je také podmíněna hodnotou součinitele prostupu tepla konstrukce. Výrobce INFRAKLIMA doporučuje použít 4cm vrstvu polystyrenu pod samotnou kapilární rohož. Tím zajistí nižší reakční čas kapilárního systému a hlavně sníží ztráty prostupem, které by jinak byly výrazně vyšší kvůli zvýšené povrchové teplotě konstrukce. Proto obsahují KR tohoto výrobce navíc plastový „žebříček“ pro lepší kotvení do podkladních konstrukcí. Spojování potrubí v systému se provádí pomocí plastových vsuvek, proto není nutné dělat mezi jednotlivými segmenty mezery větší než 32mm.

¹ Tato část DP čerpá poznatky z bakalářské práce L. Carbol [1]



Obr. 1-2: Prvky kapilárního segmentu INFRACLIMA [20]

Mimo jiné je PP-R materiálem hydraulicky hladkým (0,01Mn), a proto jsou tlakové ztráty třením v kapilárách o průměrech cca 3,5mm únosné. Záleží samozřejmě na teplotním spádu a potřebném výkonu, který ovlivňuje průtok KR. Dá se ale říci, že se běžné tlakové ztráty samotné KR pohybují okolo 10kPa (délka KR 5m, průtok 23kg/m2hod).



Graf 1-1: Tlaková ztráty G-termálních kapilárních rohoží K.S15 (délka rohože 1-8m) [21]

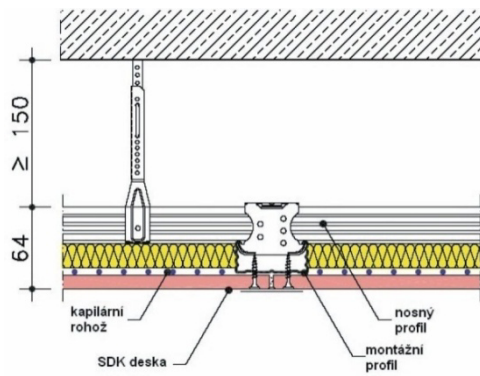
Kapilární systém je použitelný prakticky pro jakoukoliv budovu. Nízká stavební výška konstrukce spolu s kapilárním systémem (cca 4 cm vč. izolace a 10mm bez izolace) umožňuje široké využití především pro novostavby. Kapilární rohože se dají použít i pro rekonstrukce. Aby ale byla otopná plocha dostatečná, musel by být vzhledem k vyšším tepelným ztrátám těchto objektů a vzhledem k dodržení přípustných sálavých výkonů systém instalován do většiny stavebních konstrukcí. [19]

Posledním rozdílem KR od obou výrobců je pozice páteřní trubky vratné vody. INFRAKLIMA má páteřní trubky vedeny na každé straně, kdežto G-TERM má obě páteřní trubky vedeny na straně stejné. Toto uspořádání sice požaduje větší stavební drážky, ale ve výsledku vede k rovnoměrnějšímu rozložení teplot.

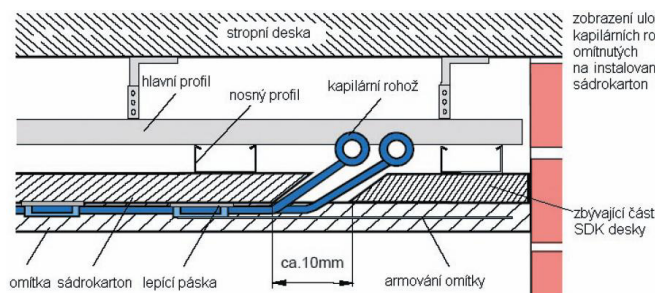


Obr. 1-3: Detail umístění kapilárních rohoží na stropní desce, vlevo INFRAKLIMA
vpravo G-TERM [21]

Nejčastějším způsobem je instalace KR do omítky stropní desky (obr. 1-3). Další variantou je instalace na SDK podhled (obr. 1-4). Zde je ovšem nutný k dosažení požadovaného výkonu vyšší teplotní spád. Varianta, která je z hlediska přenosu tepla výhodnější, je instalace na omítnutou SDK desku (obr. 1-5). Obě varianty sice vedou ke snížení stropní konstrukce, ale páteřní potrubí se pak nemusí zasekávat do drážek. Běžné kapilární rohože se dají instalovat také do železobetonové stropní desky (obr. 1-6). Tento systém se také nazývá aktivací betonového jádra a vyznačuje se delší dobou náběhu. Kapilární rohože mohou být instalované i do kazet v podhledovém stropě (obr. 1-7). Tyto kazety jsou kovové a perforované, díky čemuž dosahují nejvyšších výkonů.



Obr. 1-4: Montáž KR na SDK podhled. [21]



Obr. 1-5: Montáž KR na omítnutou SDK desku [21]



Obr. 1-6: Montáž KR do železobetonové stropní desky [21]



Obr. 1-7: Montáž kazet s kapilárními rohožemi v podhledovém stropě [21]

1.3.1 Praktický výpočet výkonu kapilárních rohoží

Pro praktický výpočet měrného výkonu otopné plochy se nahrazuje součinitel přestupu tepla sáláním a konvekcí jedním souhrnným součinitelem. Rozdíl teplot povrchu topné plochy a osálaných ploch je nahrazen teplotou vzduchu. Toto zjednodušení lze použít za předpokladu malého rozdílu mezi teplotou vzduchu a účinnou teplotou okolních ploch. Dále se pak uvažuje s průměrnou teplotou otopné plochy, čímž se zanedbá nerovnoměrnost povrchové teploty. Zjednodušení je snadno opodstatnitelné z důvodu malé rozteče jednotlivých kapilár. Výkon topných a potažmo i chladicích stropů se v praxi stanoví podle DIN 4715 (rov 2.1).

$$q_N = C \times TU^n \quad [W/m^2] \quad [21] \quad (1.1)$$

Kde:

TU - teplotní rozdíl mezi prostorovou teplotou a průměrnou teplotou chladicí/topné vody

C, n - jsou konstanty závislé na typu instalace

Tab. 1-1: Parametry normovaných výkonů [21]

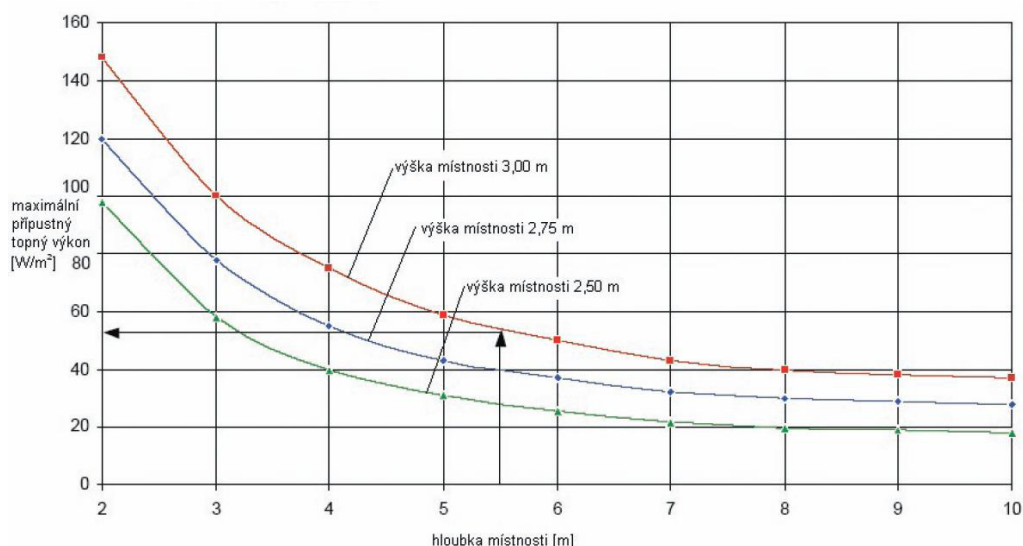
	typ instalace	C	n
1	kovová stropní kazeta s akustickým rounem, ocelový plech tl. 0,6 mm typ rohože K.U15 - přilepená, položená minerální vlna tl. 35 mm přikryté sádrokartónovou deskou tl. 12,5 mm	6,259	1,105
2	kovová stropní kazeta s akustickým rounem, ocelový plech tl. 0,6 mm typ rohože K.U10 - přilepená, položená minerální vlna tl. 35 mm přikryté sádrokartónovou deskou tl. 12,5 mm	6,693	1,096
3	fermacelová deska tl. 10 mm typ rohože K.G10 - přilepená tepelně vodivou pastou V.WLP.1	6,194	1,096
4	sádrokartónová deska tl. 12,5 mm typ rohože K.G10 - přilepená tepelně vodivou pastou V.WLP.1	5,850	1,095
5	omítnutý strop, tl. omítky cca 9 mm, strojní omítání MP7 typ rohože K.S15	6,210	1,112
6	perforovaná sádrokartónová deska tl. 9,5 mm, Ø otvoru 8mm typ rohože K.U10 - přilepená lepidlem V.K.1 minerální vlna tl. 20 mm, akustické rouno a nanesen disperzní nářer	4,329	1,117
7	dvojitý sádrokartón typ rohože K.S15 mezi dvěma sádrokartónovými deskami	5,080	1,070
8	dvojitý sádrokartón typ rohože K.S15 mezi dvěma sádrokartónovými deskami s reflexní tep. izolací	5,140	1,080
9	akustická omítka - Sto - tl. 12 mm typ rohože K.S15 - vomítnutá - cca 6-ti mm překrytí akustickou omítkou	3,390	1,150
10	hotový prefabrikát B.KG12	5,210	1,100
11	kovová stropní kazeta s akustickým rounem, ocelový plech tl. 0,6 mm typ rohože K.U10 - přilepená	5,350	1,160
12	doplňkové zavěšené samostatné i různě tvarované kovové kazety typ rohože K.U10 - přilepená, bez izolace	6,520	1,147

Při použití kapilárních rohoží jako stropního topení je nutno respektovat přípustnou mezní teplotu povrchu stropu. Jednak se posuzuje intenzita osálení temene hlavy, aby nedošlo k přehřátí organismu, a druhou podmínkou je asymetrie radiační

teploty. Případné nedodržení těchto podmínek vede ke značnému diskomfortu. Nejvyšší přípustná teplota se odvíjí především od geometrie prostoru, otopné plochy a rozmístěním ochlazovaných konstrukcí. Zjednodušeně se dá říci, že čím je světlá výška místnosti nižší, tím menší je také přípustná teplota stropu. Výrobce kapilárních rohoží sestavil jednoduchý graf, ze kterého se dá bez nutnosti jakýchkoliv výpočtů přibližně stanovit maximální výkon stropní otopné plochy. Exaktní výpočet maximální povrchové teploty je složitý a zdlouhavý. Tématem osálení temene hlavy a normativními požadavky se budu zabývat v části C.

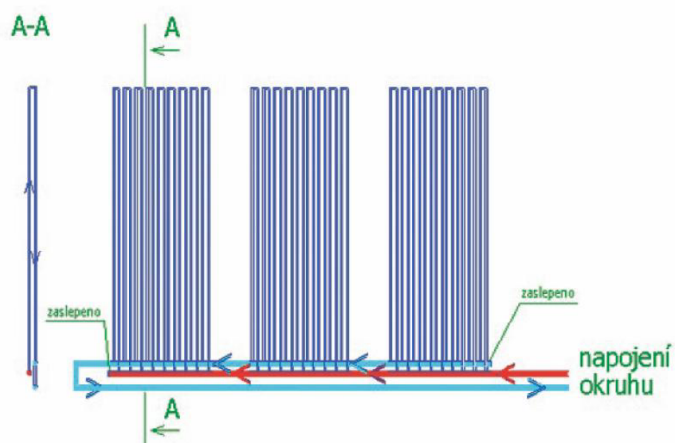
Dále výrobce doporučuje dodržení následujících kritérií z důvodu zamezení možného průvanu vznikajícího pohybem chladného vzduchu podél oken.

- Je-li potřeba tepla menší než 100 W/bm fasády, topení může být realizováno stropem bez omezení.
- Je-li potřeba tepla menší než 250 W/bm fasády, topení se realizuje prostřednictvím okrajového pruhu podél oken; vyzařované teplo se koncentruje na okna a nebezpečí průvanu je odstraněno.
- Je-li potřeba tepla větší než 250 W/bm fasády, je nutno přezkoušet, v závislosti na činnosti v prostoru, zda bude samotný strop stačit pro vytápění; pokud ne, je potřeba instalovat doplňkové topení podél oken. [21]



Graf 1-2: Přípustný topný výkon KR [21]

Kapilární rohože se spojují pro jednotlivé zóny a místnosti do okruhů, které jsou pak přivedeny do lokálního rozdělovače a sběrače. Celý systém je analogický k podlahovému vytápění s tím rozdílem, že jsou jednotlivé KR v rámci okruhu zapojeny systémem Tichelmann. Doporučená velikost jednoho okruhu je 15 m². Regulace jednotlivých větví je zajištěna buď termostatickými hlavicemi s kapilárou, nebo spojením prostorového termostatu se servomotory jednotlivých okruhů.



Obr. 1-8: Zapojení kapilárních rohoží [21]

1.4 Teorie

1.4.1 Sálavé otopné systémy

Podle převládajícího způsobu sdílení tepla mezi otopnou plochou s vytápěným prostorem dělíme vytápění na konvekční nebo sálavé. U konvekčního vytápění ohřívají otopná tělesa nejdříve vnitřní vzduch, který pak předává teplo stěnám a ostatním předmětům v místnosti. Teplota vzduchu je tedy u konvekčního vytápění vyšší než povrchová teplota stěn. U sálavého vytápění se naopak využije jen menší část otopného příkonu ke konvekčnímu ohřátí vzduchu a větší část tepla je sáláním přímo předávána do okolních ploch. Povrchová teplota okolních ploch je u sálavého vytápění vyšší než teplota vzduchu ve vytápěném prostoru. Sálavé otopné soustavy se dají rozdělit na: ²

- a) Velkoplošné vytápění
- b) Individuální vytápění sálavými panely
- c) Celkové vytápění závěsnými panely
- d) Vytápění infračervenými zářiči

a) Otopnou plochou při velkoplošném vytápění je obvykle některá ze stěn omezujících vytápěný prostor. Povrchová teplota otopné plochy je poměrně nízká. Pro stropní vytápění se teplota pohybuje do 45°C, pro podlahové vytápění do 30°C a pro stěnové vytápění do 60°C. Otopná plocha se zahřívá topnou vodou, teplým vzduchem, nebo elektricky. Podle konstrukčního provedení mohou být otopné plochy samostatné, anebo integrované do stavební konstrukce. Sálavé otopné panely, které se zavěšují pod strop místnosti nebo umísťují volně v prostoru, jsou nejčastěji kovové, mohou však být i z jiného materiálu. První instalace pozinkovaných trubek do monolitického stropu byly považovány za převratné. Byly vyzdvihovány pro svou jednoduchost, přestože se trubky musely v každém ohybu spojit a při pokládce musel být zajištěn mírný spád, aby nedocházelo ke zavzdušňování. Dnes se preferují systémy s rychlou odezvou, například podmínkové kapilární rohože nebo systémy s aktivací betonového jádra. Potrubí topných registrů je z odolnějšího a na montáž méně pracného materiálu, jakým

² Následující rozdělení vychází primárně z publikace doc. J. Cihelky [4]

je třeba síťovaný polypropylen. Stropní sálavé vytápění má své nesporné výhody - k vytvoření otopné plochy je k dispozici celý strop a také povrchová teplota stropu může být vyšší než teplota podlahy. Pro vytápění vysokých místností je ku prospěchu i fakt, že celých 80% tepla je sdíleno sáláním, což vede k rovnoměrnějšímu teplotnímu profilu místnosti. Nevýhoda stropního vytápění je v tom, že největší sálavý účinek je v místě hlavy, která je velmi citlivá na přehřívání.

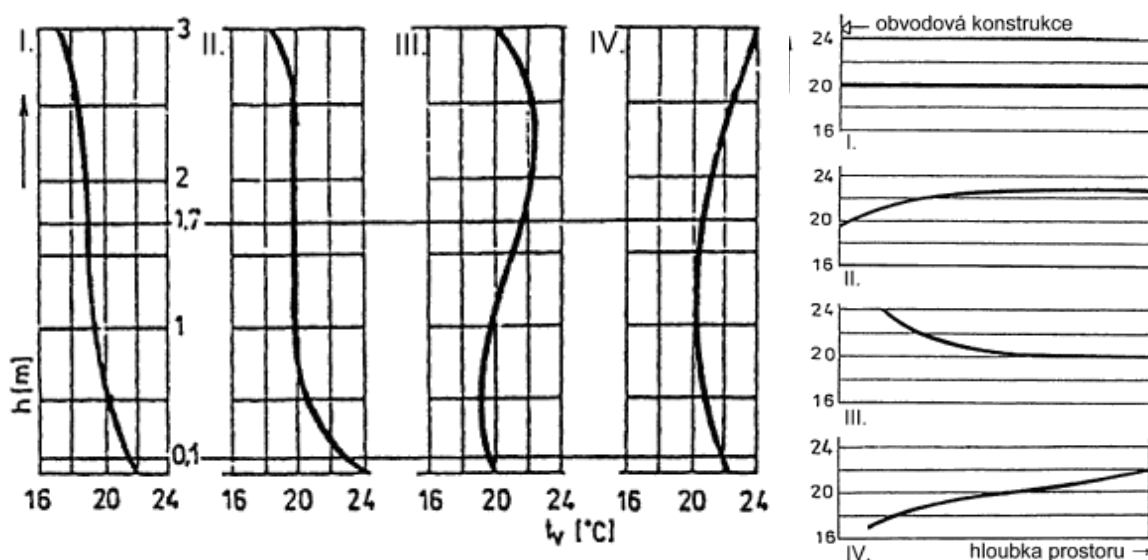
b) Blízkými sálavými panely lze dosáhnout optimálních podmínek tepelné pohody jen v omezeném prostoru. Lokálním zvýšením střední radiční teploty je možné dosáhnout optimální operativní teploty i při nízkých teplotách vzduchu. Tento způsob vytápění je proto velmi hospodárný.

c) Pro celkové vytápění vysokých prostorů (např. průmyslových hal) se používá zavěšených sálavých panelů. Panely jsou úzké kovové desky volně zavěšené podél celé haly v určité výšce nad podlahou. Panely jsou zahřívány nejčastěji teplovodně, ale mohou být i horkovodní a parní. Teplota povrchu panelu je nejvýše 140°C; horní strana panelu je dobře izolovaná. Sálavým teplem usměrněným směrem dolů se zvýší účinná teplota ploch v pracovní oblasti, a tudíž lze tepelné pohody dosáhnout při teplotě vzduchu okolo 10°C. Snížením teploty vzduchu se pak velmi podstatně zmenší tepelná ztráta větráním; spotřeba tepla při vytápění závěsnými panely je o 20 až 30% nižší než při teplovzdušném vytápění.

d) Poslední variantou je využití plynových nebo elektrických infrazářičů. U světlých plynových zářičů je zdrojem sálání keramická deska, která se bezplamenným povrchovým spalováním plynu zahřívá na teplotu 800 až 950°C. U elektrických zářičů je zdrojem sálání tělísko nebo kovová trubka s keramickou náplní; zdroj je odporově zahříván na teplotu 400 až 800°C. Tepelné paprsky vysílané zdrojem jsou usměrněny rotačním nebo korýtkovým reflektorem z lesklého kovu k vytápěné oblasti. Infračervenými zářiči se vytápí zejména půdorysně rozlehlé a vysoké místnosti.

1.4.2 Velkoplošné vytápění

Instalace otopné plochy velkoplošného vytápění má svá specifika, která se odráží na interním mikroklimatu. Podíl tepelného toku sáláním u stropního vytápění činí přibližně 80 %, u stěnového 65 % a u podlahového 55 %. Dalším důležitým aspektem je prostorové rozložení teplot, a to jak v rovině vertikální, tak i horizontální. Nerovnoměrnost ve vertikálním rozložení teplot ve vytápěném prostoru je způsobena přívodem tepla a ochlazováním stěn místností. Vertikální nerovnoměrnost narůstá se s povrchovou teplotou otopné plochy. S ohledem na skutečnost, že podlahové vytápění je provozováno s nejnižšími teplotami, je vertikální rozložení teplot téměř ideální (graf. 1-3). Při ideálním vytápění by mělo být zajištěno takové rozložení teplot, aby byla v oblasti hlavy stojícího člověka teplota vzduchu o 2°C nižší, než je v oblasti kotníků. U ostatních druhů vytápění je vertikální průběh teplot značně nerovnoměrný.



Graf 1-3: Vertikální a horizontální průběh teplot vzduchu ve vytápěné místnosti v závislosti na způsobu vytápění [11]

I. ideálně požadovaný průběh, II. podlahové vytápění s ochlazovaným stropem, III. článkové otopné těleso, IV. stropní vytápění

Horizontální rozložení teplot je ovlivněno především umístěním otopné plochy ve směru od obvodové ochlazované konstrukce. U podlahového vytápění je horizontální průběh teplot téměř rovnoměrný, blížíci se ideálnímu, až na oblast přilehlou k ochlazované konstrukci. Tento nedostatek se dá kompenzovat okrajovou

(intenzivní) zónou s vyšší teplotou. Vyššího výkonu v okrajové zóně je možno dosáhnout dalším otopným okruhem s vyšším teplotním spádem, nebo zmenšením rozestupů instalovaného potrubí. Jak vyplývá z grafu 1-3, u sálavého vytápění se vertikální průběh teplot značně liší v závislosti na umístění otopné plochy. Dále je také zřejmé, že teplota sálajícího povrchu je vyšší než teplota vzduchu, ale možná překvapující je i vyšší teplota ostatních konstrukcí. Vysvětlení se skýtá ve fyzikální podstatě sdílení tepla elektromagnetickým zářením.

1.4.3 Sdílení tepla

Fyzikální děj přenosu tepelné energie patří k těm nejsložitějším a ani v dnešní době není zcela přesně popsán. Při analýze sdílení tepla se setkáváme se třemi základními mechanizmy: prouděním, vedením a sáláním. Poslední dva uvedené jsou fyzikálně přesně popsány a jsou tedy i dobře předvídatelné, ovšem u konvekce je situace odlišná. Touto tematikou se zabývalo mnoho autorů, například M. Sazima [18], nebo N. A. Michejev [17], ale i přes jasnou fyzikální podstatu jsou vztahy pro určení součinitelů přestupu tepla z velké části empirické. Některé vzorce mají přípustnou chybu i přes dvacet procent. Takto velké nepřesnosti jsou dány velkým množstvím proměnných faktorů. Současné stanovení přesné geometrie a fyzikálních vlastností jak proudící tekutiny, tak obtékaného povrchu je velmi náročné. Proto se ve výpočtech vyskytují podobnostní kritéria, která snižují počet nezávislých proměnných, střední teplota mezní vrstvy, která nahrazuje teplotní pole a určující rozměr, který nahrazuje geometrii. Bez těchto úprav by bylo řešení realizovatelné jen s užitím simulačních prostředků.

1.4.4 Sdílení tepla konvekcí

Z povrchu sálavé otopné plochy je teplo sdíleno nejen sáláním, ale také konvekcí. Přitom jde obvykle o sdílení tepla při přirozeném proudění vyvolaném rozdílem hustoty zahřátého vzduchu. Měrný tepelný tok sdílený konvekcí se spočítá podle rovnice (rov. 1.2).

$$q = \alpha_k \cdot S \cdot (t_p - t_v) \quad (1.2)$$

Jak jsem již naznačil v úvodu této kapitoly, součinitel α_k je závislý jednak na fyzikálních vlastnostech tekutiny, rozdílu teplot, ale i na tvaru a drsnosti obtékaného povrchu. U nuceného proudění je α_k také funkcí rychlosti proudění. Vliv těchto proměnných na

celkový charakter děje popisují podobnostní kritéria – geometrické, hydrodynamické a termokinematické.

Z podobnosti hustoty tepelného toku prouděním a vedením v termokinetické mezní vrstvě tekutiny (rov. 1.3) plyne Nusseltovo číslo.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (1.3)$$

Z podobnosti vztahových a třecích sil vyplývá kritérium Grashofovo (rov. 1.4), které vyjadřuje podobnost gravitačního neizotermního proudění vazké tekutiny.

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \Delta t}{\nu^3} \quad (1.4)$$

Poměr vývoje rychlostní a tepelné mezní vrstvy proudění popisuje Prandtlovo kritérium (rov. 1.5).

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (1.5)$$

Z těchto tří kritérií vyplývá obecný tvar rovnice pro popis přirozené konvekce (rov. 1.6).

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (1.6)$$

Ve vztazích pro Nu, Gr, Pr:

- l - charakteristický rozměr tělesa [m]
- α - součinitel přestupu tepla [W/m²/K]
- λ - tepelná vodivost tekutiny [W/m/K]
- ν - kinematická viskozita [m²/s]
- a - teplotní vodivost [m²/s]
- Δt - teplotní rozdíl [°C]
- g - tíhové zrychlení [m/s²]
- c,n - empiricky stanované součinitele

U velkoplošného sálavého vytápění je většinou rozdíl teploty otopné plochy a teploty vzduchu velmi malý, takže fyzikální vlastnosti tekutiny (vzduchu) mají přibližně

konstantní hodnotu. V tomto případě lze obecný vztah (rov. 1.6) zjednodušit na tvar (rov. 1.7), ve kterém je součinitel α_k pouze funkcí rozdílu teplot.

$$\alpha_k = c \cdot (\Delta t)^n \quad (1.7)$$

$$\alpha_k = 1,3 \cdot (\Delta t)^{0,25} \quad \text{Nusselt, Hencky} \quad (1.8)$$

$$\alpha_k = 0,92 \cdot (\Delta t)^{0,27} \quad \text{Heilman} \quad (1.9)$$

$$\alpha_k = 0,87 \cdot (\Delta t)^{0,33} \quad \text{King} \quad (1.10)$$

$$\alpha_k = 1,95 \quad \text{Wilkes, Peterson} \quad (1.11)$$

$$\alpha_k = 0,93 \cdot (\Delta t)^{0,33} \quad \text{Michejev} \quad (1.12)$$

Z výše uvedených vztahů pro výpočet α_k teplého stropu se nejvíce blíží realitě rov. 1.12 podle Michejeva, přestože sám autor tento vztah sestavil pro vodorovný panel volně zavěšený v prostoru, kolem kterého může vzduch volně stoupat vzhůru. U stropního vytápění však toto proudění není možné. Svislé stěny zadrží pod stropem vrstvu „klidného“ vzduchu, takže teplo je sdíleno převážně vedením a sáláním. Z pokusů laboratoře ASHVE byl zjištěn pro stropní otopnou plochu vztah (rov. 1.13).

$$\alpha_k = 0,145 \sqrt[4]{\Delta t \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)} \quad (1.13)$$

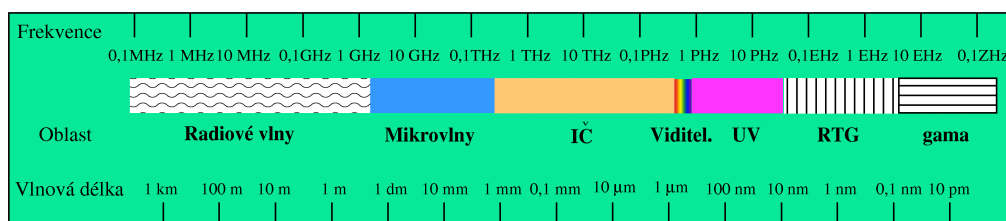
Podle tohoto vztahu je $\alpha_k = 0,2$ až $0,8 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (při $\Delta t = 10$ až 30°C). Ve skutečnosti je tato vrstva „klidného“ vzduchu neustále narušována vlivem konvekce na ochlazovaných stěnách, či pohybem osob v místnosti. Proto se doporučuje počítat s $\alpha_k = 1,95 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (rov. 1.11). Uvedené rovnice jsou použity pro vyhodnocení experimentálního měření v kapitole 1.6.

1.4.5 Sdílení tepla sáláním

Přenos tepla sáláním je realizován elektromagnetickým zářením, které nepotřebuje pro své šíření hmotné prostředí. Elektromagnetické záření má ve vakuu teoreticky nekonečný dosah, ale se snižujícím se prostorovým úhlem od zdroje klesá jeho intenzita. Elektromagnetické záření je kombinací příčného postupného magnetického vlnění a elektrického pole. [15] Vznik tohoto záření má původ v excitaci elektronů v elektronovém obalu atomu, které mají na zlomek sekundy větší energii, než kterou jim dovoluje základní stav. Po uvolnění přebytečné energie ve formě fotonu se

excitovaný elektron opět vrátí do svého základního stavu. Protože si na atomární úrovni pevné a kapalné látky předávají energii náhodnými kolizemi, energie takto předaná se opět může vyzářit ve formě fotonů. Intenzita vyzařování se tedy zvyšuje s počtem kolizí atomu, a protože počet kolizí se opět zvyšuje s teplotou, existuje podle Stefan-Boltzmanova zákona jistá úměra mezi teplotou a intenzitou záření.

Tepelné paprsky, které vysílá povrch zahřátých těles, jsou totožné s viditelnými světelnými paprsky vyzařovanými Sluncem. Navzájem se oba druhy paprsků liší pouze vlnovou délkou. Rozsah vnímání světla lidského oka se pohybuje v rozmezí od 0,365 μm do 0,75 μm. Ale vlnové délky tepelných paprsků těles při běžných teplotách se pohybují od 0,75 μm do 400 μm. Zákony světelného záření neboli optiky jsou v podstatě stejné i pro tepelné záření. Případné odchylky jsou způsobeny pouze vlnovou délkou. Podle vlnové délky a vlastností se záření dělí do různých skupin: gama záření, rentgenové záření, UV záření, viditelné světlo, infračervené záření a rádiové vlny. Tepelné záření, které vzniká srážkami molekul, se řadí do infračerveného spektra.



Obr. 1-9: Elektromagnetické spektrum záření [15]

Elektromagnetické záření se řídí zákony aplikovanými v optice. Jedná se o zákon lomu paprsku na přechodu dvou prostředí s různou optickou hustotou (rov. 1.14) a o zákon odrazu od reflexních ploch (rov. 1.15), který říká, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n \quad (1.14)$$

$$\alpha = \beta \quad (1.15)$$

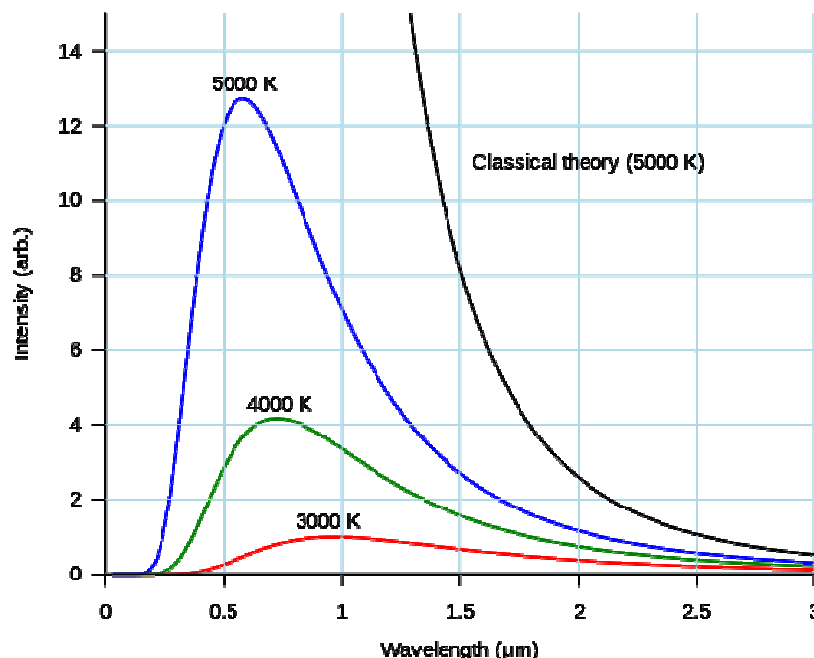
Pro popis dalších zákonů týkajících se elektromagnetického záření se využívá pojmu absolutně černé těleso, který zavedl Kirchhoff. Absolutně černé těleso pohlcuje veškeré dopadající záření ve všech vlnových délkách. Zároveň je i dokonalým zářičem, protože stejné množství energie vyzáří zpět. Protože se reálná tělesa nechovají jako dokonale černá, byl zaveden termín emisivita. Tato bezrozměrná veličina určuje poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa.

Například emisivita pro vápennou omítku je rovna 0,93. Tato hodnota se velmi blíží absolutně černému tělesu, přestože se bílá barva ve viditelné spektrum chová spíše odrazivě. Některé materiály mají ještě vyšší spektrální selektivnost. Například zoxidovaný měděný plech výborně pohlcuje viditelné záření, které je nejvíce zastoupené v dopadajícím slunečním světle, ale jen minimálně vyzařuje tepelné záření vlivem vlastní teploty. Pro tuto vlastnost našel měděný zoxidovaný plech uplatnění v absorberech slunečních kolektorů. Absolutně černé těleso se využívá i pro popis spektrální hustoty záření $E_{0\lambda}$, která vychází z Planckova vyzařovacího zákona (rov. 1.16).

$$E_{0\lambda} = f(\lambda, T) = c^2 h \frac{2\pi\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1.16)$$

Na grafu. 1-4 je vidět, že s rostoucí termodynamickou teplotou se posouvá spektrální maximum směrem ke kratším vlnovým délkám. Na základě této skutečnosti je možné stanovit ekvivalentní teplotu barvy. Vztah mezi dominantní vlnovou délkou a termodynamickou teplotou tělesa je dán Wienovým posunovacím zákonem (rov. 1.17).

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,897\,7686 \cdot 10^{-3} \quad (1.17)$$



Graf 1-4: Spektrum hustoty záření [15]

Ve většině případů oboru TZB není nutné znát spektrální intenzitu záření tělesa, nýbrž postačí hodnota celkové intenzity záření. K tomuto číslu se dá dopočítat integrací Planckova vyzařovacího zákona pro celé spektrum. Výsledkem je pak Stefan-Boltzmannův zákon. Celková intenzita záření černého tělesa je závislá pouze na čtvrté mocnině termodynamické teploty tělesa (rov. 1.18).

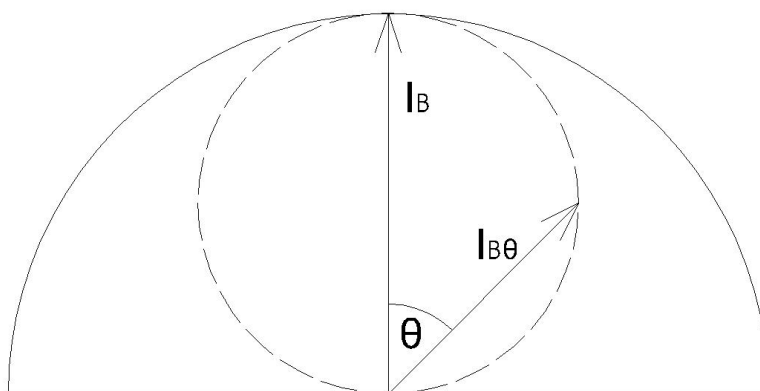
$$I = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \quad (1.18)$$

Pro zahrnutí šedých těles je vztah rozšířen o emisivitu ε (rov. 1.19):

$$I = \varepsilon \sigma T^4 \quad \sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \quad (1.19)$$

Skutečnost, že přenos tepelné energie mezi dvěma povrchy o konečných rozměrech závisí také na úhlu dopadu záření, byla popsána tzv. Lambertovým-kosinový zákonem. Tímto zákonem se řídí většina stavebních materiálů s výjimkou kovů. (rov. 1.20).

$$I_{B\theta} = I_B \cdot \cos \theta \quad (1.20)$$



Obr. 1-10: Záření absolutně černého tělesa do poloprostoru

Pokud bychom měli vypočítat intenzitu záření hmotného bodu, využili bychom Stefan-Boltzmannův zákon. Pokud bychom zavedli předpoklad, že na sebe budou sálat dvě rovnoběžné absolutně černé desky o nekonečných rozměrech, mohli bychom spočítat i relativní tepelný tok, který obě desky sdílí (rov. 1.21). Reálná tělesa ale nejsou dokonale černá (přidána emisivita) ani nejsou dokonale rovnoběžná a

nekonečně velká (zaveden poměr osálení). Následující vztah je vhodný pro technické řešení přestupu tepla sáláním (rov. 1.22).

$$Q_{12} = S_1 \cdot \sigma_B \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.21)$$

$$Q_{12} = S_1 \cdot \varphi_{12} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma_B \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.22)$$

kde:

Q_{12} - sdílená tepelná energie [W]

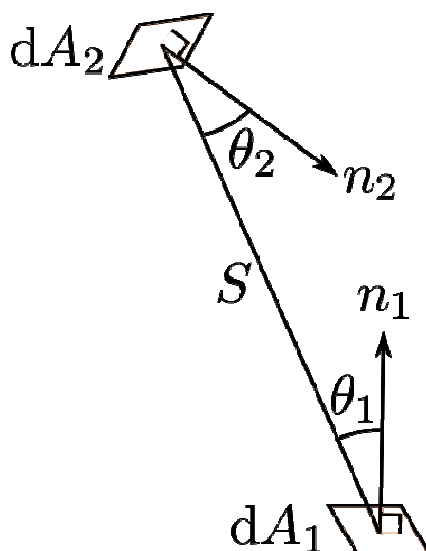
S_1 - plocha sálajícího povrchu [m²]

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - emisivita obou povrchu [-]

σ_B - Stefan-Boltzmanova konstanta [W/(m² K⁴)]

T_1, T_2 - termodynamická teplota obou povrchu [K]

φ_{12} - poměr osálení [-]



Obr. 1-11: Záření absolutně černého tělesa do poloprostoru [14]

Z výše uvedeného vztahu je nejobtížněji stanovitelným členem poměr osálení φ_{12} . Pokud by se jednalo o nekonečně malou sálající plochu, pak by se poměr osálení mohl definovat jako poměr kulové výseče připadající zornému úhlu sálající a osálané plochy k celé polokouli opsané kolem sálající plochy. Pro dvě plochy o konečných velikostech se poměr osálení vyřeší jako dvojný integrál přes oba sledované povrchy. (rov. 1.23). Poměr osálení je roven jedné, když je sálající těleso úplně obklopeno tělesem osálaným.

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot S} \iint_{S_1 S_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{r^2} dS_1 dS_2 \quad (1.23)$$

kde:

φ_{12} , -poměr osálání [-]

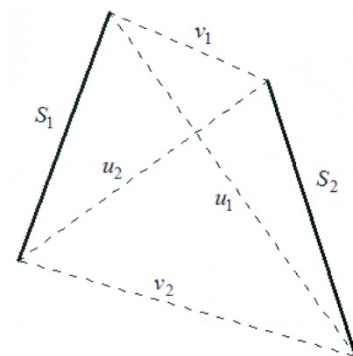
S_1, S_2 -plocha sálajících povrchů [m^2]

θ_1, θ_2 -úhly mezi spojnicí a normálou povrchů [rad]

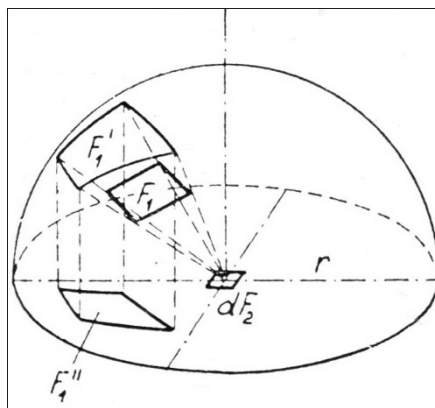
r -vzdálenost středů obou povrchů [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$]

T_1, T_2 -termodynamická teplota obou povrchů [K]

Ze vztahu (rov. 1.23) vychází tzv. Integrační metoda, kterou se dají obecně řešit jakékoliv polohy sálajících ploch. Jediným problémem je značná pracnost řešení dvojného integrálu. Pro základní případy ale existují analyticky upravené vztahy. Za předpokladu vnesení určité chyby do výpočtu můžeme řešenou plochu rozdělit na ekvidistantní síť prvků, které se dají jednotlivě řešit analytickými vztahy. Výsledný poměr osálání se dopočítá pomocí adičního a substrakčního pravidla. Poměr osálání ve dvourozměrných systémech se dá řešit i jinými metodami, například Metodou strun.



Obr. 1-12: Stanovení poměru osálání metodou strun [3]



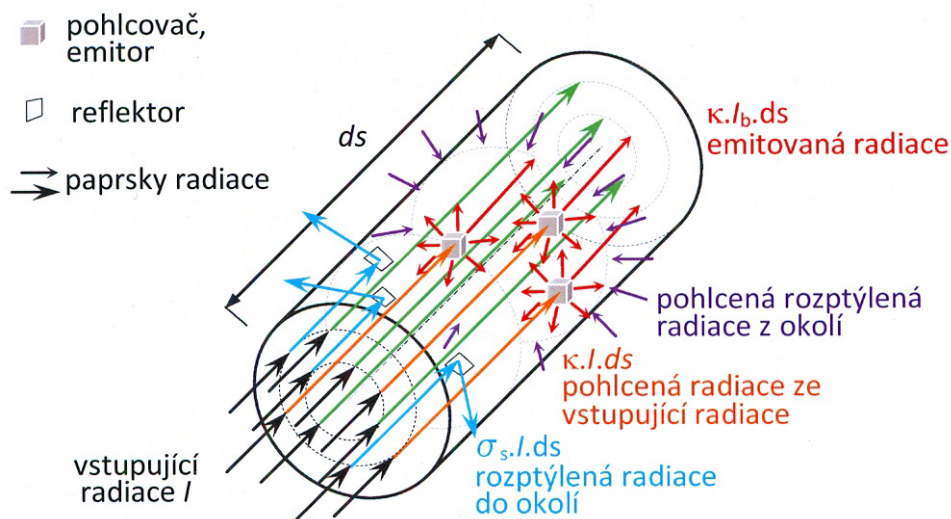
Obr. 1-13: Nusseltova geometricko-analytická metoda [4]

1.5 Řešení využívající výpočetní techniku

1.5.1 Výpočetní modely a programy³

Ve výpočtových modelech je přenos tepla sáláním pro svou náročnost často zanedbáván. Záření obvykle nehraje tak velikou roli v celkové bilanci přenosu tepla. V případě předmětu o vysoké teplotě, jako jsou tavné pece, spalovací zařízení, nebo světlé a tmavé zářiče využívané pro vytápění, je sálání dominantně zastoupeno.

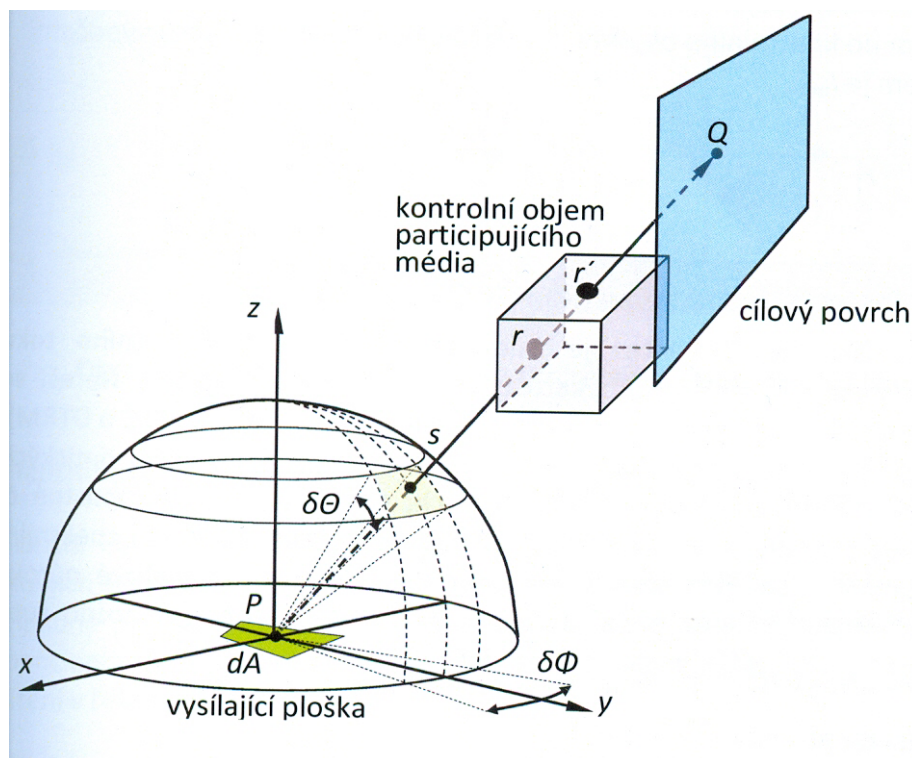
Přenos tepla sáláním je komplexní a náročná záležitost. Výpočty veličin nutných pro popsání vzájemné interakce prvků v prostoru jsou bez aplikace výpočetní techniky téměř neřešitelné. Pouze některé základní nebo značně zjednodušené příklady se dají řešit s přijatelnou přesností bez využití simulací a výpočtových modelů. Pro kompletní popis způsobu, jakým je sálavá energie šířena do okolí, se využívá obecná rovnice přenosu tepla sáláním, neboli Radiative Transfer Equation (RTE). RTE popisuje změnu intenzity radiace po délce paprsku vlivem prostředí. Emitovaná intenzita je tedy snížena o pohlcení do prostředí, o rozptyl do okolí a zvýšena o rozptyl z okolí.



Obr. 1-14: Změna intenzity radiace po délce svazku [3]

³ kapitola vychází z publikace doc. Šikuly a Ing. Pláška [3]

Obecná rovnice není přímo řešitelná, a proto existují různé modely radiace, které RTE zjednodušují a umožňují její řešení. Tyto modely mají jen určité oblasti, pro které jsou vhodné. Jednou z myšlenek pro řešení RTE je například sledování paprsků tzv. Ray-Tracing, u kterých se vyhodnocuje pohlcení či odraz. Paprsky mohou být náhodně vysílány ve svazku v ortogonální souřadnicové soustavě, model je pak založen na metodě Monte Carlo (MC), nebo jsou paprsky vysílány ve sférických souřadnicích, tato metoda se jmenuje Discrete Transfer Radiation Model (DTRM).



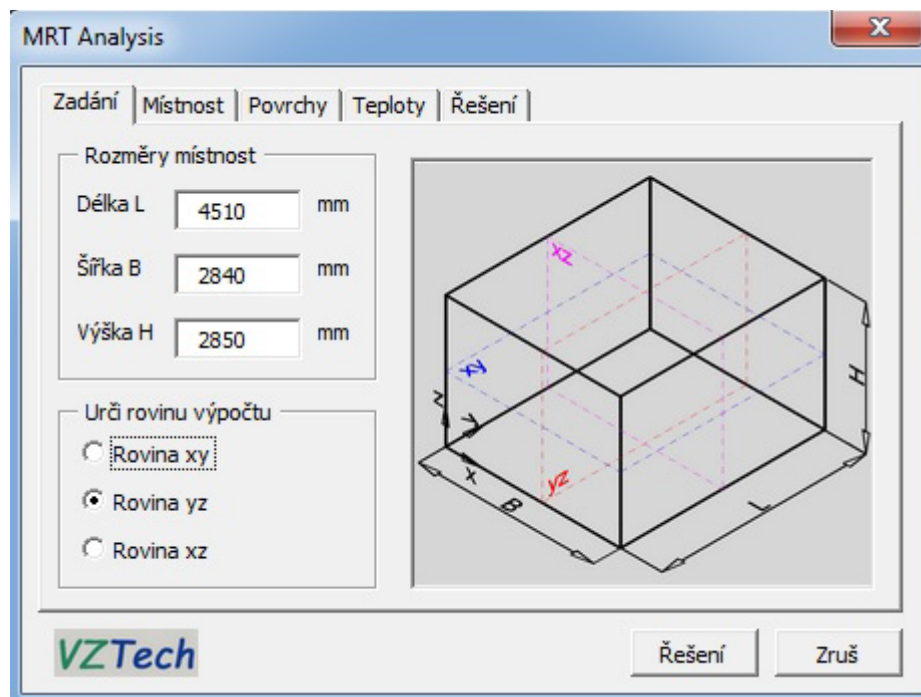
Obr. 1-15: Znázornění sledovaných paprsků v metodě DTRM [3]

DTRM je méně náročná na výpočetní operace a také uvažuje s difuzivitou prostředí. Na odlišném principu tzv. „šedém záření“ je založena metoda Discrete Ordinates Method (DO), která pro svou nízkou náročnost na paměť našla uplatnění v CFD simulacích. Poslední skupina radiačních modelů se souhrnně nazývá Surface to Surface (S2S). Jsou to jediné modely radiace, které jsou řešitelné i ručními výpočty. Prostor uvažovaný v těchto modelech je diatermií, tedy takové, které se přenosu tepla nezúčastňuje. Základním vztahem pro tyto modely je rov. 1.22 a výpočet poměru osálení. Modely S2S jsou využívány v sofistikovaných simulačních programech ANSYS a Fluent. Integrační metoda výpočtu poměru osálení, kterou se také řadí do

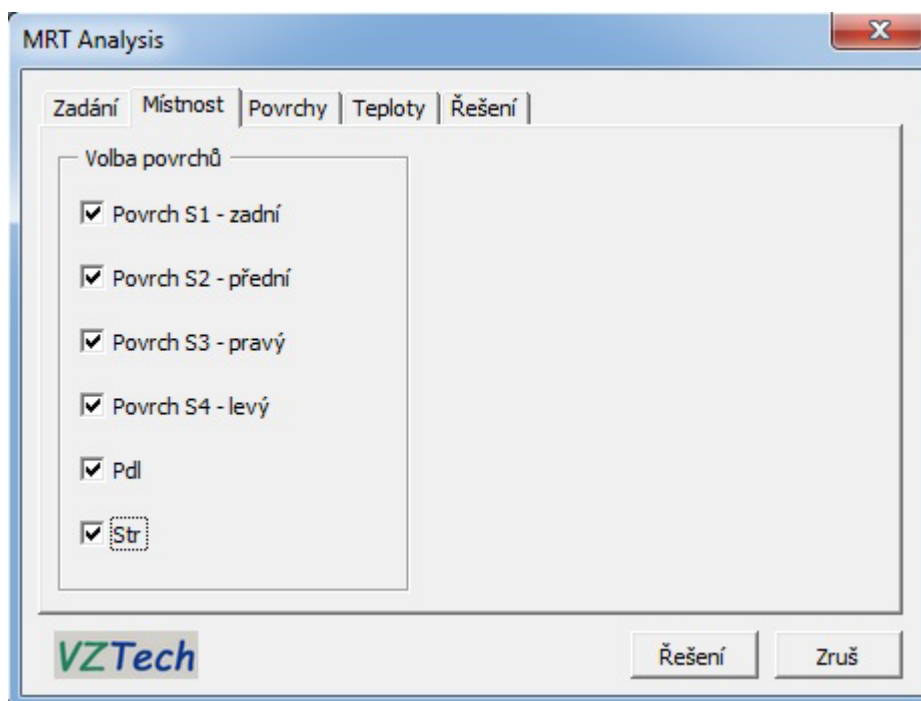
skupiny S2S modelů, je využita například v programu MRT Analysis. Integrovanou metodou se budu zabývat podrobněji v části C.

1.5.2 MRT Analysis 3.7

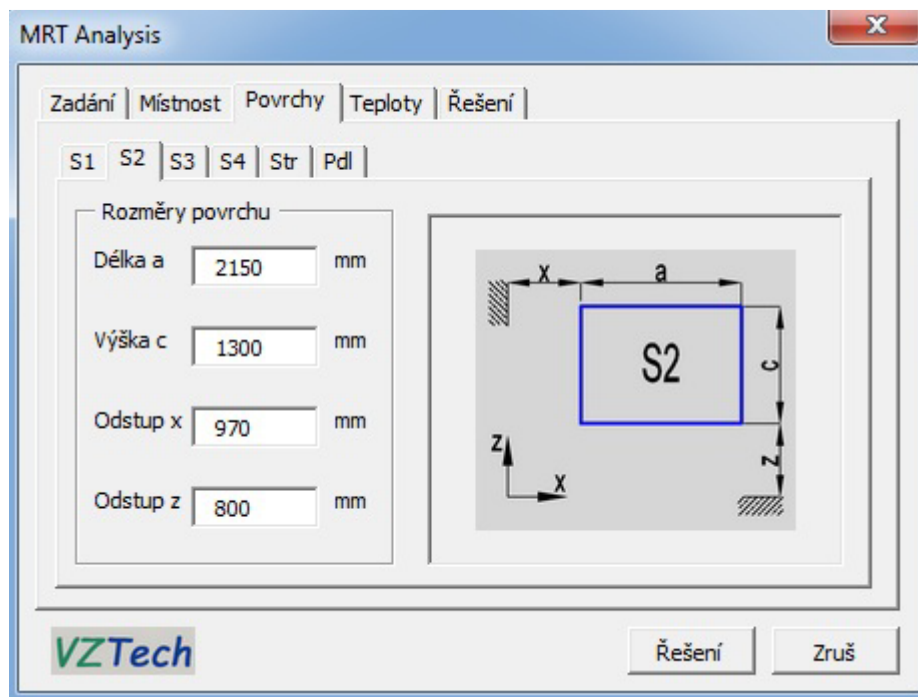
Program MRT Analysis 3.7 je určen pro výpočet střední radiační teploty a operativní teploty v uživatelsky přívětivém prostředí programu Excel. Zdrojový kód je psán v programovacím jazyku Visual Basic (VBA). Autorem je Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D. Program vznikl pro hodnocení komfortu v prostoru se sálavými systémy vytápění a klimatizace [10]. Výstupem programu je graf s hodnotami střední radiační teploty ve formě izomaps napříč místnostmi. Sledování radiační teploty je možné ve třech libovolně umístěných rovinách. Vstupními údaji programu jsou rozměry kvádrového prostoru a pozice nejvýše jedné obdélníkové konstrukce o definované teplotě do každé obvodové konstrukce. Předpokladem programu je tedy znalost průměrné teploty konstrukcí. Konstrukce, jichž teplota není zadána, nebo jde o zbytkové plochy na stěně s definovanou otopnou/chladicí plochou, nejsou programem brány v úvahu. Tímto jsou zavedeny menší nepřesnosti. Nevýhodou je fakt, že tento elegantně jednoduchý program neumí řešit jiné než obdélníkové tvary teplých či chladných konstrukcí a je možné zadat pouze jeden obdélníkový tvar na obvodovou konstrukci. Balkónové dveře s oknem na ochlazované stěně se proto nedají dostatečně přesně zadat. Buď se dá zadat teplota obdélníkového okna a chladná stěna nebude započítána, nebo lze zadat průměrná teplota stěny i okna dohromady.



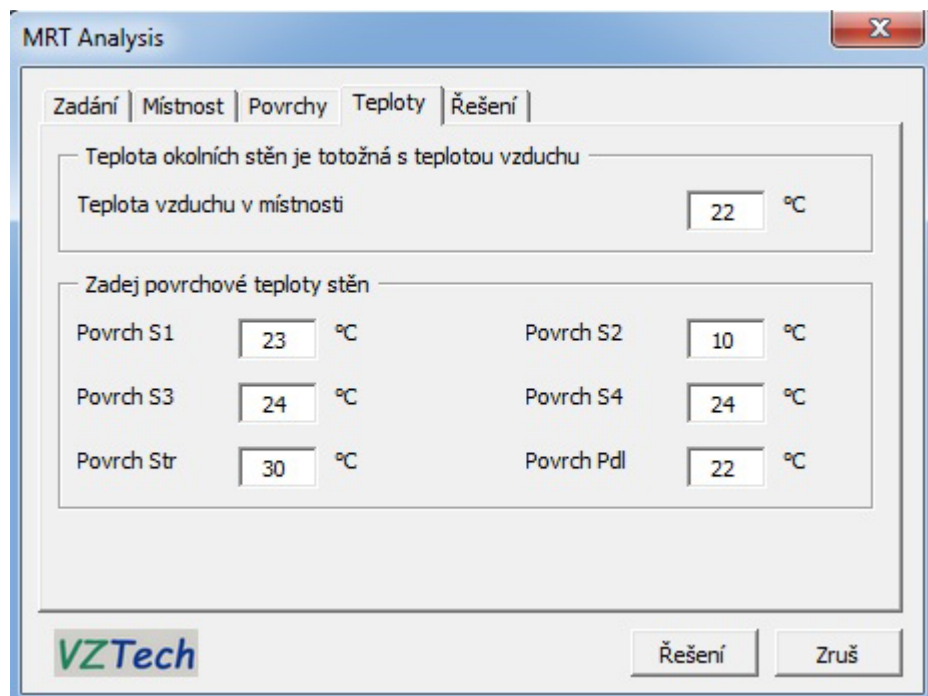
Obr. 1-16: MRT Analysis 3.7 zadání rozměru místnosti



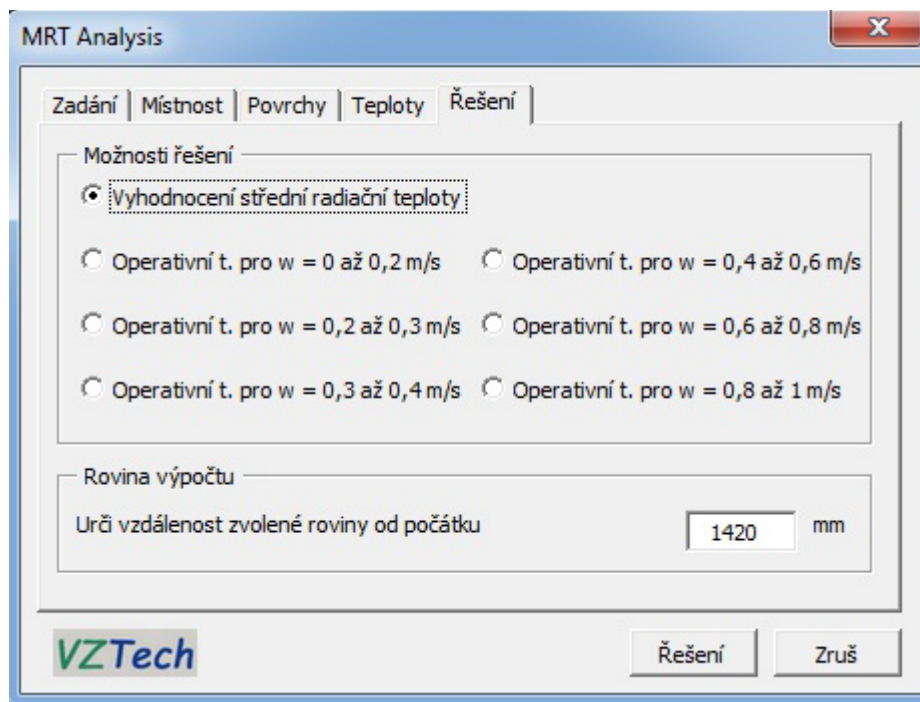
Obr. 1-17: MRT Analysis 3.7 zadání aktivních povrchu pro výpočet



Obr. 1-18: MRT Analysis 3.7 zadání rozměru povrchu s teplotou

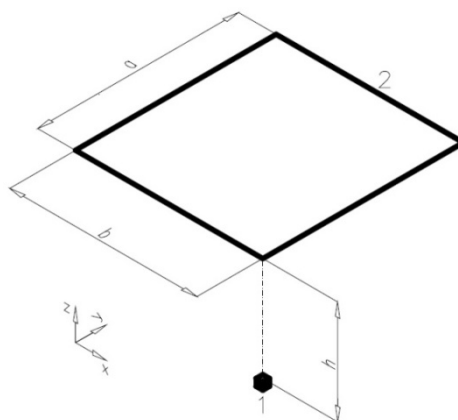


Obr. 1-19: MRT Analysis 3.7 zadání teplot povrchu



Obr. 1-20: MRT Analysis 3.7 volba výstupu programu

Tento program je založený na S2S integrační metodě s jediným vztahem pro výpočet poměru osálení, a to vztahem pro sálající elementární bod k obdélníku.

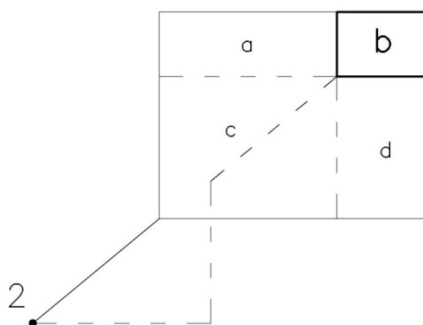


Obr. 1-21: Výpočet poměru osálení pro bod ležící na úrovni rohu obdélníku

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \arctg \frac{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}{a \cdot b} \quad (1.24)$$

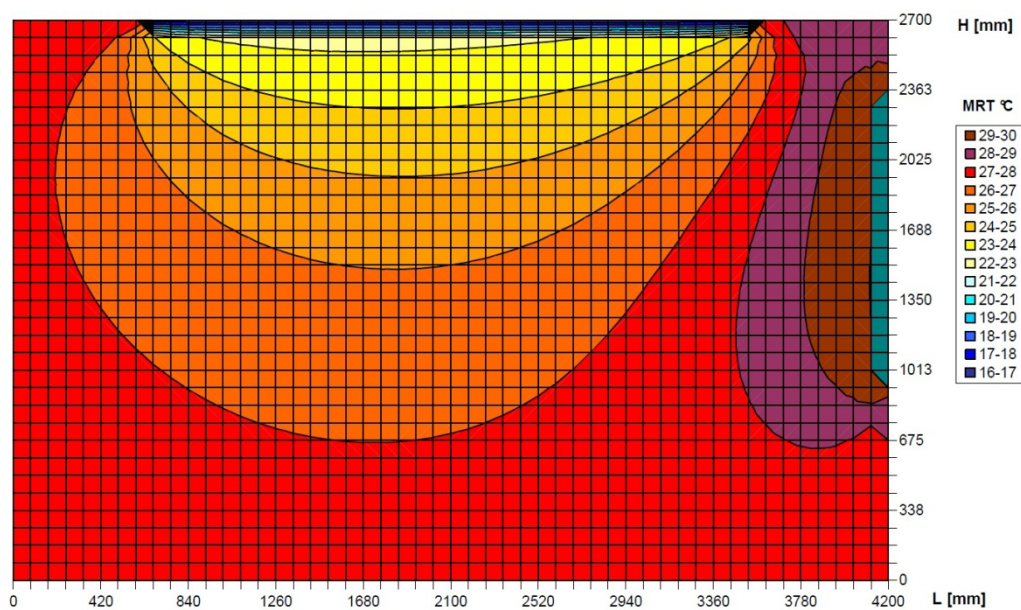
Tento vztah, který je výsledkem integrace rov. 1.24, je ideální pro určení střední radiační teploty, ale neumožňuje hodnocení radiační asymetrie. Ta je nutná pro posouzení interního mikroklimatu v místnostech se sálavým vytápěním. Výsledný

poměr osálání se musí z několika takovýchto vztahů dopočítat pomocí adičního pravidla (rov. 1.25).



Obr. 1-22: Využití substrakčního pravidla pro výpočet poměru osálání

$$\varphi_{b2} = \varphi_{(a,b,c,d)2} - \varphi_{(c,d)2} - \varphi_{(a,c)2} + \varphi_{(c)2} \quad (1.25)$$



Graf 1-5: MRT Analysis 3.7 výstup z programu

Bohužel tento program, stejně jako každý program, který je založený na S2S metodě, neumí řešit radiační stíny. Výpočetní náročnost programu je minimální, běžně velkou místnost je program schopen vyřešit v řádu několika minut.

1.6 Experiment

Aplikace fyzikálních zákonitostí a simulačních postupů nám poskytuje velké množství užitečných poznatků. Často se ale setkáváme s problémy, které jsou pro svou komplexnost jen velmi těžko popsatelné, aby mohly být dostatečně přesně postihnuty simulačními prostředky. Rovněž se dostáváme do situací, kdy je potřeba ověřit korektnost již hotového modelu.

Jako vhodný fyzický model pro provedení měření byl zvolen objekt Listových kolejí VUT v Brně. Tato budova byla postavena v druhé polovině 70. let a její vytápění je řešeno velkoplošným stropním systémem Crittal. Jedná se o pozinkované potrubí průměru $\frac{1}{2}$ " nebo $\frac{3}{4}$ ", které je zabetonované do stropní konstrukce. Absolutním unikátem systému je fakt, že potrubí topných hadů se ve statickém návrhu započítává mezi výztuž. Když se v nedávné době dělaly statické posudky, jednou z hlavních otázek byla nosnost těchto téměř padesát let starých a zkorodovaných rozvodů. Budova v posouzení obstála a v této návaznosti byl vypracován průkaz energetické náročnosti budovy. V současné době je budova téměř z poloviny zateplena polystyrenovou kontaktní izolací. Cílem měření je analýza stavu tepleného mikroklimatu v obytných místnostech a srovnání skutečného výkonu otopné plochy podle technických a fyzikálních vztahů. Dále pak byly získané průběhy teplot všech konstrukcí použity ve výpočtových modelech.

1.6.1 *Měření tepelného stavu interního mikroklimatu*⁴

Metody měření fyzikálních veličin prostředí musí být voleny se zřetelem na to, že měřené veličiny jsou časově proměnné. Stejně tak jsou i parametry vnitřního mikroklimatu vázány na člověka pohybujícího se v tomto prostoru. Prostor lze z biologického hlediska považovat za homogenní, jestliže jsou v daném okamžiku měřené veličiny (teplota vzduchu, rychlost, vlhkost a střední radiační teplota) kolem osoby prakticky rovnoměrné. Tato podmínka je jen zřídka platná pro prostory se sálavým vytápěním, proto se uvažuje s prostředím heterogenním. To znamená, že jsou veličiny charakterizující měřený prostor různé v závislosti na poloze měřidla. Pokud jde o stropní sálavé vytápění, nehomogenita měřeného prostoru se nejvíce projevuje na

⁴ Kapitola navazuje na SVOČ práci L. Carbola [2]

vertikálním teplotním profilu. Pro analýzu tepleného mikroklimatu a pro posouzení vhodnosti otopného systému je nutné, aby sledované veličiny byly definované ve vztahu k osobě pohybující se ve sledovaném prostředí.

Teplota vzduchu t_a [°C]

Teplota vzduchu t_a [°C] je teplota v okolí lidského těla měřená jakýmkoliv teplotním čidlem neovlivněným sáláním. Měření této veličiny je často považováno za jednoduché, ale ve skutečnosti může vést k závažným chybám, není-li dodržena řada potřebných opatření. Čidla musí být chráněna před působením sálání z okolních tepelných zdrojů, protože teplota měřená v takovém případě by byla spíše teplotou výslednou. Vliv osálání čidla může být snížen těmito prostředky:

- snížení emisivity čidla použitím čidla z leštěného kovu, nebo krytí čidla reflexním nátěrem
- snížení rozdílu teploty mezi čidlem a sousedními plochami například obklopením čidla několika reflexními stínítky
- zvýšení součinitele přestupu tepla prouděním, a to zvýšením rychlosti proudění vzduchu kolem čidla nucenou ventilací

Při měření teploty se musí přihlížet k potřebné době ustálení měřidla. Jelikož jsou čidla teploty často velmi malá, v řádu milimetrů, a jejich specifická tepelná kapacita je také malá, jsou schopny reagovat na dynamické změny teploty. Jinak je tomu u čidel kombinovaných pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Tato čidla jsou větší a vykazují prodlevu měření i několika minut. Na druhou stranu jsou lépe stíněna proti účinkům sálání. Tyto vlastnosti se projevují především při sledování dynamických změn teploty, například při větrání.

Výsledná teplota t_g [°C]

Výsledná teplota t_g [°C] je teplota v okolí lidského těla měřená kulovým teploměrem, která zahrnuje vliv současného působení teploty vzduchu, teploty okolních ploch a rychlosti proudění vzduchu. V České republice se pro měření používá

především kulový teploměr typu Jokl, který je tvořen koulí z měděného plechu o průměru 100 nebo 150 mm. Koule má černý matný povrch potažený pěnovým polyuretanem. Do středu koule se vkládá baňka rtuťového teploměru, případně jiné teplotní čidlo. Jelikož je doba ustálení kulového teploměru 20 až 30 minut, není tento přístroj vhodný pro měření s rychlými teplotními změnami.

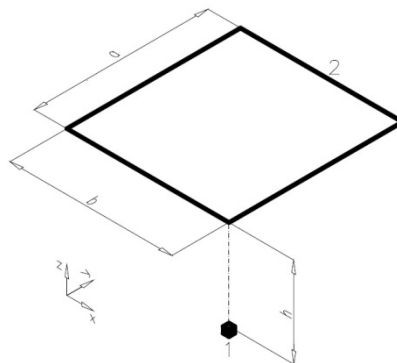
Střední radiační teplota t_r [°C]

U sálavého vytápění se musí uvažovat se sálavým účinkem všech konstrukcí vymezujících vytápěný prostor. Počítá se jednak s přímým sáláním otopných ploch, ale také s druhotným sáláním netopných ploch. Tepelný účinek sálající plochy závisí nejen na její velikosti a povrchové teplotě, ale také na vzdálenosti a poloze místa, ve kterém se intenzita zjišťuje. Pro zjednodušení výpočtů se používá veličina – střední radiační teplota (dříve účinná teplota), kterou se nahradí jednotlivé teploty sálajících ploch. Obecný vztah pro výpočet střední radiační teploty vychází ze Stefan-Bolzmannova zákona a jedná se o součet čtvrtých mocnin teplot povrchu a příslušných poměrů osálání. V tomto vztahu se neuvažuje s rozdílnou emisivitou jednotlivých povrchů, protože většina stavebních povrchů jako jsou stěny a stropy má přibližně stejnou emisivitu.

$$\overline{t_r} = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n (\varphi_{ir} * T_i^4)} - 273,15 \text{ [°C]} \quad (1.26)$$

Střední radiační teplota je důležitým ukazatelem pro stanovení teplené pohody lidí v místnostech se sálavým vytápěním. Její hodnota je nutná pro určení asymetrie radiační teploty, operativní teploty a pro určení intenzity osálání temene hlavy. Výpočet podle vzorce (1.26) je velmi náročný a vyžaduje znalost geometrie místnosti a přesného rozložení teplot všech povrchů. Pro výpočet intenzity osálání temene hlavy se často počítá pouze s otopnou plochou. Toto zjednodušení je na stranu bezpečnou, protože ostatní plochy mají naopak teplotu menší a jejich zakomponování do výpočtu vede k celkovému snížení střední radiační teploty. Poměr osálání φ_{1-2} pro sálající/osálaný bod se spočítá podle (1.27)

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \arctg \frac{c\sqrt{a^2+b^2+h^2}}{ab} \quad (1.27)$$



Obr. 1-23: Geometrie pro výpočet poměru osálení

Když tedy známe střední radiační teplotu a celkovou plochu sálajících konstrukcí, můžeme spočítat tepelný tok sdílený mezi tělesy.

Měření střední radiační teploty se provádí nepřímo - výpočtem z naměřené teploty kulového teploměru a teploty vzduchu, popřípadě ji lze spočítat z tepelných toků naměřených radiometrem. Radiometrem se měří rozdíl teplot plošky absolutně černé – pohlcující záření a plošky absolutně bílé, odrážející záření. Naměřené hodnoty kulovým teploměrem jsou silně závislé na rychlosti proudění vzduchu, proto jsou výpočtové vztahy pro střední radiační teplotu odvozeny pro případy závislé na rychlosti proudění vzduchu. Vzorec pro výpočet střední teploty sálání pro standardní kouli ($D = 150\text{mm}$):

$$\overline{t_r} = \left[(t_g + 273,15)^4 + 0,4 \times 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1.28)$$

Pro heterogenní prostředí se počítá s průměrnou střední hodnotou naměřenou třemi kulovými teploměry, a to ve výšce hlavy, břicha a kotníku. Výpočet střední radiační teploty v případě heterogenního sálání:

$$\overline{t_r} = \frac{1 \times \overline{t_{hlava}} + 2 \times \overline{t_{břicho}} + 1 \times \overline{t_{kotníky}}}{4} \quad (1.29)$$

Operativní teplota t_o [°C]

Operativní teplota je rovnoměrná teplota uzavřené černé plochy, uvnitř které by člověk sdílel sáláním a prouděním stejně tepla jako v prostředí reálném. Stanoví se výpočtem:

$$t_o = \frac{t_a \cdot \sqrt{10 \cdot v_a + t_r}}{1 + \sqrt{10 \cdot v_a}} \quad (1.30)$$

Střední teplota okolních ploch t_{pr} [°C]

Přestože se střední radiační teplota okolních ploch obvykle vztahuje k elementárnímu bodu, je při větším počtu okolních ploch výpočet této teploty složitý a zdoluhavý (je nutno stanovit poměr osálení ϕ všech okolních ploch). Proto se obvykle u místností, jejichž půdorysné rozměry ani výška nejsou příliš velké (obytné místnosti, kanceláře atd.), používá místo radiační teploty střední teplota stěn.

$$t_{pr} = \frac{\sum(F \times t)}{\sum F} \quad (1.31)$$

Střední teplota stěn je sice pro výpočet značně jednodušší než střední radiační teplota, ale toto zjednodušení má za následek často velké rozdíly vypočítaných teplot. Střední radiační teplota nijak nezohledňuje polohu konstrukcí vzhledem k pozorovanému bodu. Pokud uvažujeme bod ležící ve středu místnosti, je rozdíl obou teplot zanedbatelný. Pokud ale bod leží blízko konstrukce či na konstrukci, je chyba v řádu několika stupňů.

1.6.2 Popis měření

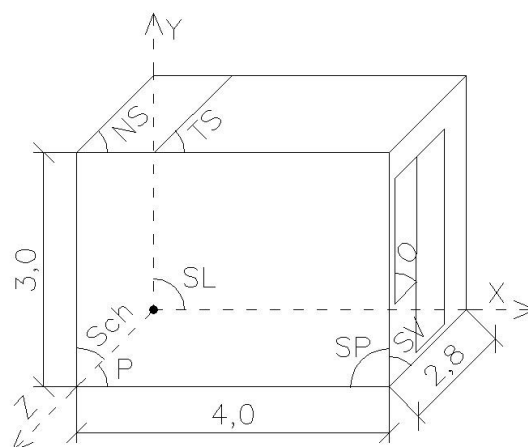
Měření bylo provedeno ve dvou pokojích objektu. První pokoj s označením izolace nemocných, byl dlouhodobě neobývaný. Tento pokoj byl napojen na stoupací potrubí v útlumovém režimu. Pokoje o patro níže a o patro výše byly napojeny na stejné stoupací potrubí se sníženým teplotním spádem. Útlumový režim se projevil celkově nižšími teplotami otopné části stropu, osálaných ploch a hlavně nižší teplotou vzduchu. Povrchová teplota stropu se v místnosti pohybovala v rozmezí od 19,5°C do 22°C a teplota vzduchu nepřekročila 19°C.



Obr. 1-24: Měřený pokoj

Situace u druhého pokoje byla značně odlišná. Zatímco na izolaci byl subjektivní dojem spíše chladu, druhý pokoj, který byl trvale obýván, byl spíše přetopen. Ubytování studenti regulovali teplotu v místnosti povolováním kliček dřevěných zdvojených oken. Tím se zvýšila spárová průvzdušnost oken a celková tepelná ztráta místnosti. Teplota se tak ustálila na nižší hodnotě. Podle subjektivního pocitu ubytovaných představuje jedna otevřená klička okna stav optimálního tepelného mikroklimatu. To byl jeden z důvodů, který mě vedl k důkladné analýze celé problematiky a k vypracování modelu, který by byl schopen redukovat přetápění.

Oba měřené pokoje měly identické rozměry i stejné rozložení nábytku. Místnosti sousedily z obou stran s dalšími vytápěnými pokoji a měly pouze jednu venkovní stěnu s balkónovými dveřmi a oknem.

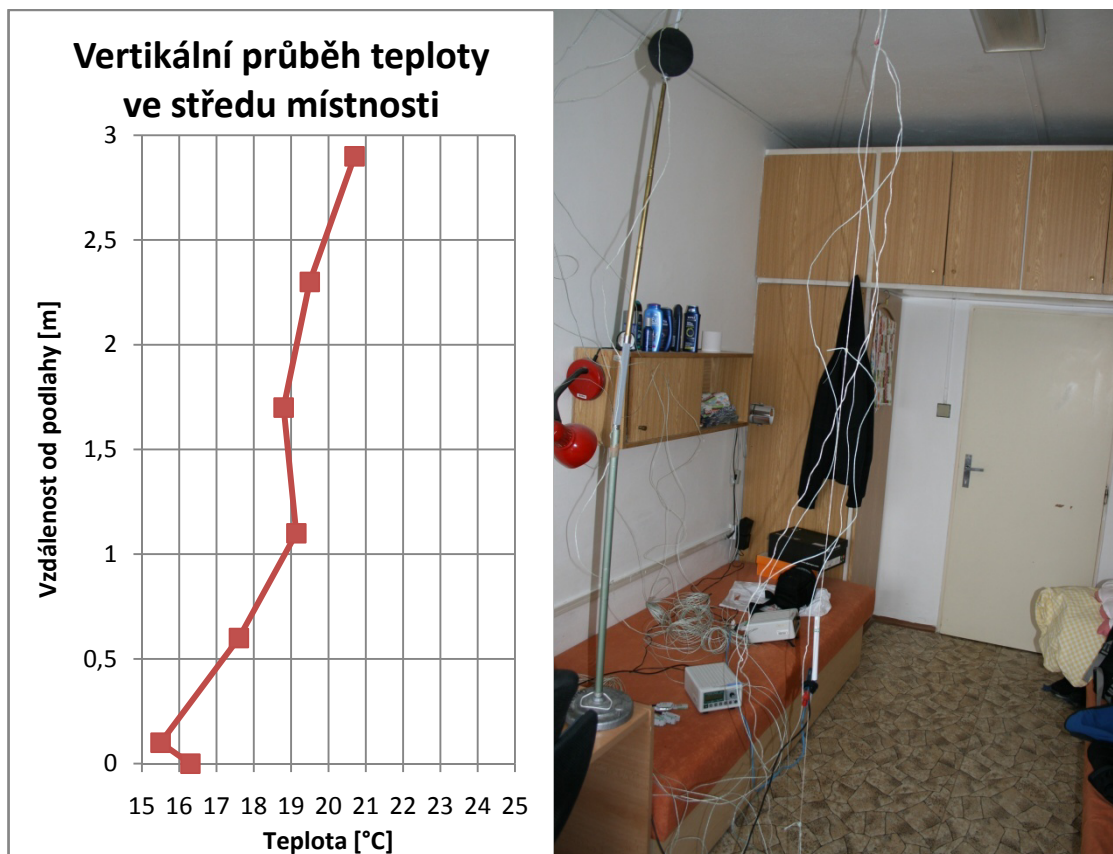


Obr. 1-25: Geometrie měřeného pokoje

Při prvotní analýze cílů měření jsem zjistil, že bude zapotřebí shromažďovat data z mnoha senzorů současně. Proto jsem pro záznam použil dvě měřicí ústředny ALMEMO 3290-8. Každá z ústředí má k dispozici 1 vstup pro anemometr a 8 vstupů pro jakékoliv čidlo. Vhodná čidla pro měření s touto ústřednou jsou vybaveny „inteligentními konektory“ a přednastavenou kalibrací a identifikací čidla. Měření bylo provedeno v jemném časovém kroku 30 sekund.

1.6.3 Měření vertikálního teplotního profilu

První měření, které trvalo bezmála 19 hodin, bylo provedeno v pokoji „izolace“. Při měření jsem několikrát intenzivně větral, abych simuloval neustálý tepelný stav místnosti. Při větrání klesla teplota vzduchu na 15°C. Pro ustálení na průměrnou teplotu 19°C bylo potřeba cca 3,5hod. Teploty otopného stropu (22°C) a teploty neochlazovaných stěn (20,9°C) se příliš nelišily. Proto byl průběh změřeného teplotního profilu téměř totožný s ideálním profilem (Obr. 1.26). Výsledky z měření na „izolaci“ jsem dále nezkoumal, protože při teplotě 22°C se stropní vytápění vůbec neprojevilo. Protože byla teplota všech konstrukcí obklopující místnost větší než teplota vzduchu (kromě venkovní stěny), jednalo se spíše o celoplošné vytápění. Proto se výsledný profil tolik blížil ideálnímu.



Obr. 1-26: Vlevo: teplotní profil místnosti „izolace“; vpravo: rozmístění čidel

V druhém pokoji jsem také měřil průběhy teploty vzduchu, a to ve středu místnosti (graf. 1-6). Pro posouzení vlivu sálání se měřila i výsledná teplota kulovým teploměrem. Protože byl k dispozici pouze jeden kulový teploměr, měření bylo opakováno v různých výškách od podlahy. Z těchto hodnot a z hodnot vypočítaných pomocí výpočtového modelu pro osálání byl sestaven graf průběhu operativní teploty s výškou místnosti. Dále pak byla měřena teplota stíněného kulového teploměru pro stanovení korekce osálání čidel teploty vzduchu (tab. 1-2).

Tab. 1-2: Zpracování naměřených dat pro vyhodnocení operativní teploty

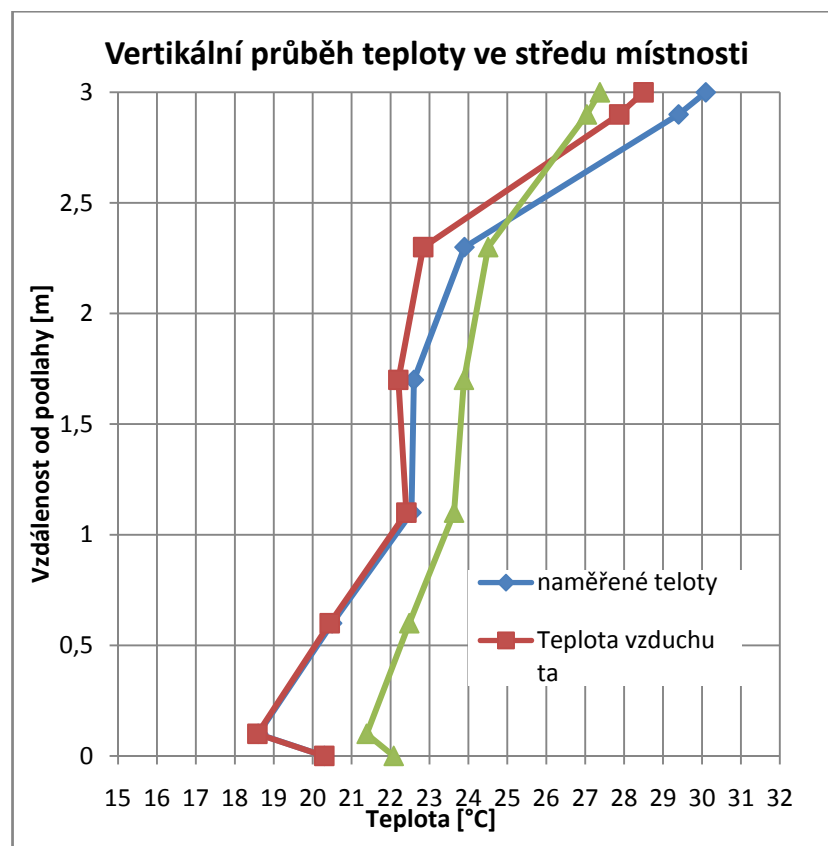
poloha bodu			průměrná teplota		nestíněná	vyrovnání t_a	naměřená $\bar{t}_r$	vypočítaná $\bar{t}_r$
Lokální	Globální		kulový tepl.	stíněná				
L=1,8m V=1,1 m	X=	2,6	23,04	22,48	22,61	-0,13	23,23	23,97
	Y=	1,2						
	Z=	1,4						
L=0,8m V=2,3 m	X=	3,2	24,57	22,55	23,61	-1,06	25,48	24,91
	Y=	2,4						
	Z=	1,4						

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 \times 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

rychlost vzduchu v_a 0,06

L=1,8m	0	0,1	0,6	1,1	1,7	2,3	2,9	3
naměřené teloty	20,30	18,60	20,50	22,54	22,60	23,90	29,40	30,10
vyrovnání na t_a	0,00	-0,02	-0,06	-0,13	-0,40	-1,06	-1,53	-1,60
Teplota vzduchu t_a	20,30	18,58	20,44	22,41	22,20	22,84	27,88	28,50
stř. rad. tepl. t_r	23,46	23,56	24,06	24,58	25,19	25,80	26,40	26,51
operativní teplota t_o	22,08	21,39	22,48	23,63	23,88	24,51	27,04	27,38

Vysvětlivky: L - vzdálenost od ochlazované stěny , V - výška od podlahy



Graf 1-6: Teplotní profil obývané místnosti

Subjektivní pocit horka v druhém pokoji je potvrzen i změřenou operativní teplotou ve výšce hlavy $23,9^{\circ}\text{C}$. Hodnota se vyskytuje na horní hranici doporučené operativní teploty ($22\pm 2^{\circ}\text{C}$) stanovené NV178/2001Sb.

1.6.4 Měření teplot konstrukcí

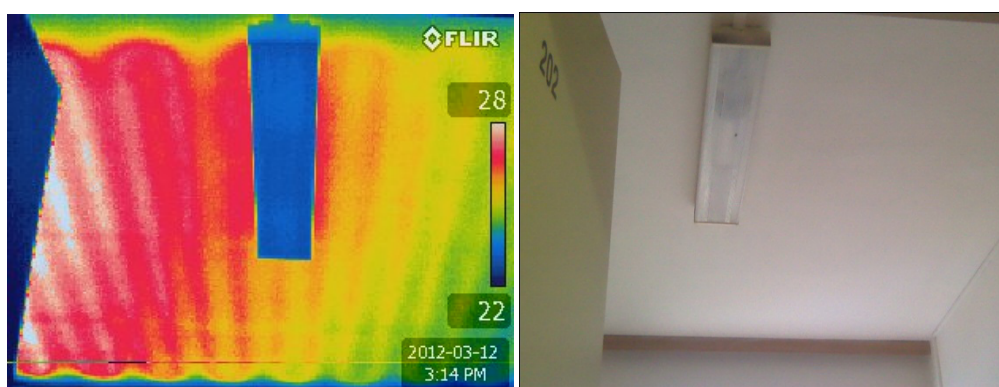
Výkon jakékoliv otopné plochy založené na sdílení tepla sáláním se odvíjí od teploty konstrukcí. Na rozdíl od konvekčního vytápění není rozhodující teplota vzduchu, ale teplota všech povrchů v místnosti. Problémem je ovšem určení těchto teplot. Teplý vzduch díky přirozené konvekci stoupá ke stropu a se stěnami sdílí teplo. Proto za ustáleného stavu je možné stanovit pouze průměrnou teplotu stěny. Spíše je lepší sestavit aproximační rovnice, které vystihují trend stoupající teploty stěny s výškou od podlahy. Podobná situace je u podlahy a stropu. Teploty rostou se vzdáleností od ochlazovaných stěn. Tento fenomén mají na svědomí především tepelné mosty.

Teploty povrchů byly měřeny ručním infrateploměrem a termokamerou. Kontrola správnosti měření byla provedena kontaktními čidly teploty. Z naměřených teplot byly metodou nejmenších čtverců sestaveny aproximační polynomy (část C).

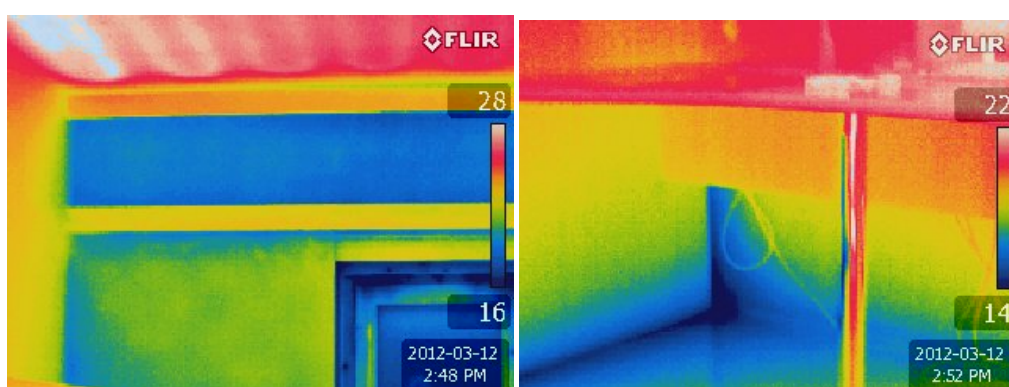
Dále jsem pak měřil teplotu otopného stropu v malém výseku. Cílem bylo zjistit průměrnou teplotu stropu a povrchovou teplotní nerovnoměrnost. Termočlánky byly rozmístěny do řady se 100mm rozestupem. Z pozdějších snímků z termokamery jsem zjistil, že čidla byla rozmístěna rovnoběžně s otopnými trubkami, proto se zde očekávané teplotní rozdíly neprojeví.



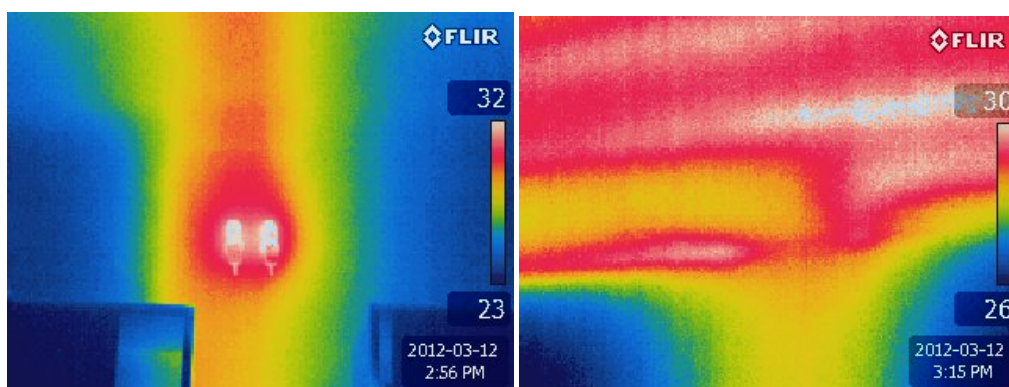
Obr. 1-27: Vlevo: rozmístění čidel na stropě, vpravo: čidla na potrubí



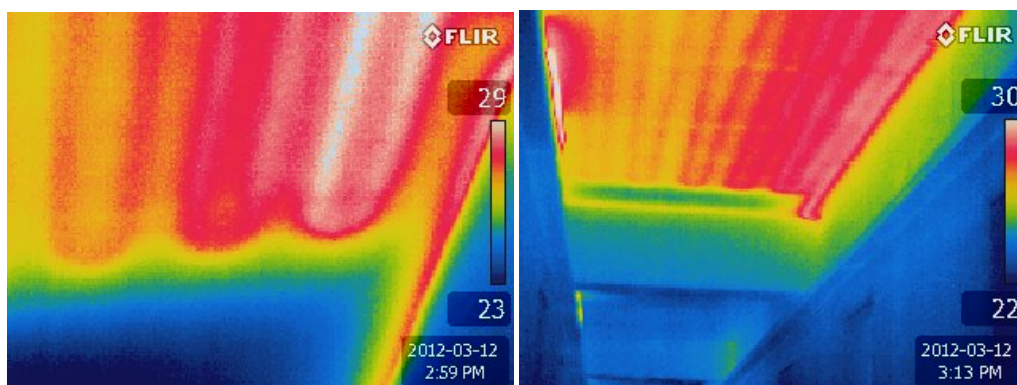
Obr. 1-28: IR snímek otopné části stropu měřeného pokoje



Obr. 1-29: IR snímek tepelných mostů



Obr. 1-30: IR snímek přívodního potrubí s kohouty pro otopnou plochu pokoje a chodby



Obr. 1-31: IR snímek napojení otopné plochy chodby

V měřeném pokoji byly umístěny na pravé stěně dvě šoupátka (obr. 1-27). Původní domněnka byla taková, že se jedná o přívod a vrat do otopného stropu pokoje. Termosnímky však (obr. 1-30 a obr. 1-31) ukázaly, že se jedná pouze o přívod topné vody pro dvě různé místnosti. Lokální zvýšení teploty stěny od přívodního potrubí je také zohledněno v aproximačních polynomech povrchových teplot.

1.6.5 Měření hustoty tepelného toku a stanovení součinitelů přestupu tepla

V kapitole zabývající se sdílením tepla byly popsány obtížnosti spojené s určením součinitelů přestupu tepla konvekcí a sáláním. Návrh otopné plochy je úzce spjatý s těmito koeficienty. Pomocí takzvaných „alfa metrů“, nebo přesněji čidel hustoty tepelného toku se součinitele přestupu dají dopočítat. Čidla hustoty tepelného toku jsou plastové destičky, které se připevní na sledovanou plochu. Při špatném kontaktu se mezi destičkou a konstrukcí vytvoří izolační vzduchová mezera, která vede k nižším hodnotám tepelného toku. Taková systematická chyba se dala eliminovat například přitlačením, nebo aplikací teplovodivé pasty na plochu styku pro lepší přenos tepla. Otázkou ovšem zůstává, jestli výrobce při kalibraci čidla se vzduchovou mezerou nepočítal.

$$q = \alpha_k \cdot (t_p - t_v) + \alpha_s \cdot (t_p - t_r) \quad (1.32)$$

Podle výše uvedeného vztahu je možné dopočítat oba součinitele. Musíme ale znát teplotu vzduchu na okraji mezní vrstvy, teplotu měřeného povrchu a střední radiační teplotu. Výpočet střední radiační teploty byl proveden ve výpočtovém modelu.

Jako nejvhodnější vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla konvekce u stropního vytápění se ukázal vztah ASHVE laboratoře (rov 1.33) a vztah podle Nusselta (rov 1.34).

$$\alpha_k = 0,145 \sqrt[4]{\Delta t \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)} \quad \text{pro střed otopné plochy} \quad (1.33)$$

$$\alpha_k = 1,3 \cdot (\Delta t)^{0,25} \quad \text{pro okraj otopné plochy} \quad (1.34)$$

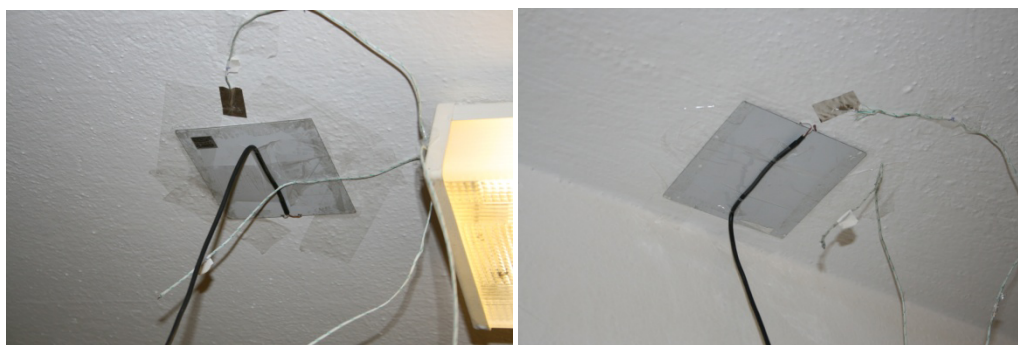
V části C jsem pomocí výpočtového modelu stanovil vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla sáláním. Protože čidla hustoty tepelného toku byla umístěna na místech s různou střední radiační teplotou, byly sestaveny dvě aproximační rovnice (rov 1.35 a rov.1.36).

$$\alpha_s = 0,0232t_p + 3,7925 \quad \text{pro střed otopné plochy} \quad (1.35)$$

$$\alpha_s = 0,0233t_p + 3,8495 \quad \text{pro kraj otopné plochy} \quad (1.36)$$



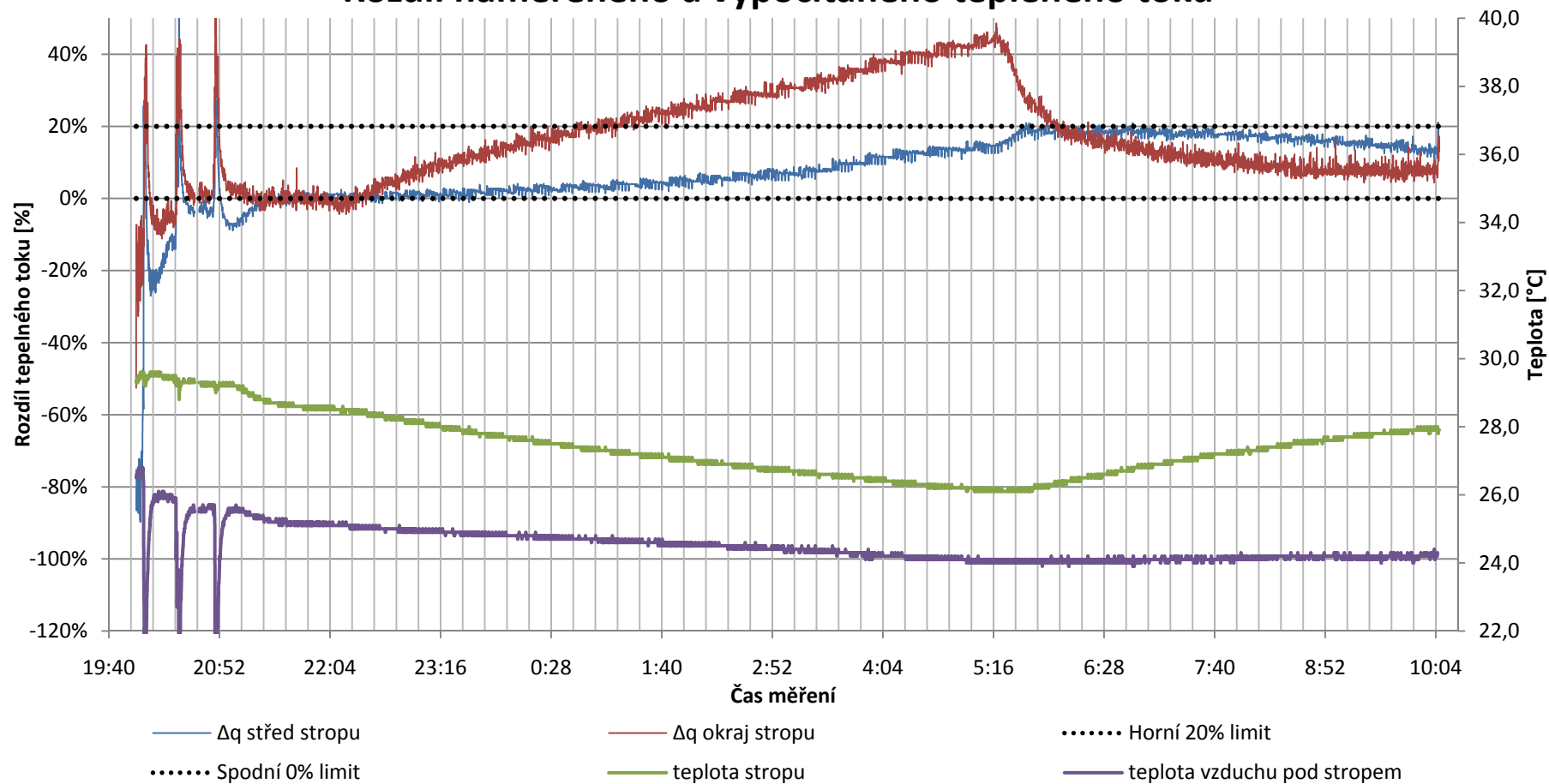
Obr. 1-32: měření hustoty tepelného toku



Obr. 1-33: Rozmístění čidel hustoty tepelného toku a teplot

Na následujícím grafu jsou zobrazeny procentuální odchylky naměřených a spočítaných tepelných toků z otopného stropu. Tento graf reprezentuje celé čtrnáctihodinové měření tepelného toku ze stropu. Na začátku měření jsou vidět tři významné odchylky způsobené intenzivním větráním. Zbytek měření proběhl bez přítomnosti osob, tudíž byl vliv konvekce na celkovém přenosu tepla minimální. To platí pro čidlo umístěné ve středu místnosti, modrou křivku, která vyhazuje kladnou odchylku do 20%. Tepelný tok čidla umístěného u stěny se výše uvedenými vztahy nepodařilo vypočítat. Nejpravděpodobnějším vysvětlením je přítomnost silnějších konvektivních proudů podél chladných stěn. Absolutní hodnoty měřeného tepelného toku se při ustáleném stavu pohybovaly v rozmezí od 21 do 32 W/m². Při takto malých hodnotách se velmi významně projeví chyba měřicího zařízení. Graf potvrzuje vysokou přesnost vytvořených vztahů pro součinitel přestupu tepla sáláním. Vztah je platný pro rozmezí teplot stropu od 26,1 od 29,4°C. Protože mi nebylo umožněno zasáhnout do regulace teploty, větší rozsah platnosti vztahu se nadal ověřit.

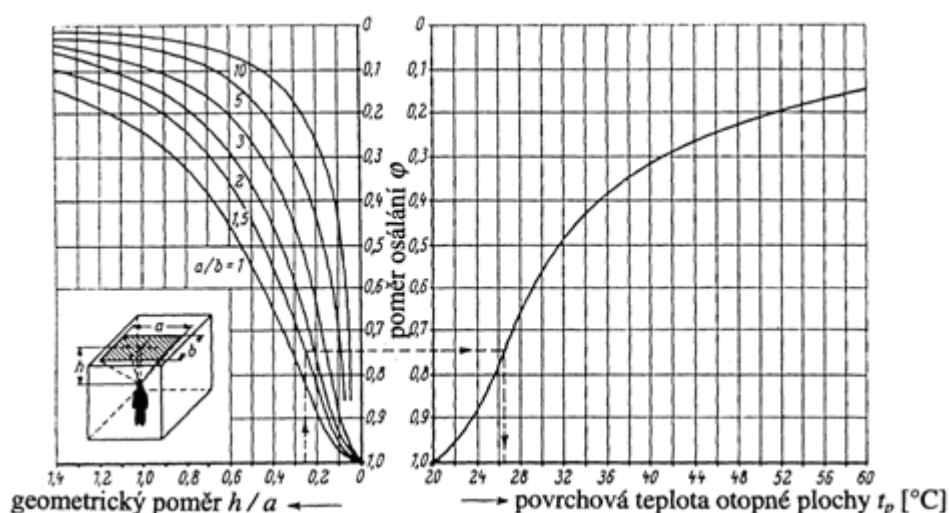
Rozdíl naměřeného a vypočítaného tepelného toku



Graf 1-7: Rozdíl naměřeného a vypočítaného tepelného toku

1.6.6 Nejvyšší přípustná teplota stropní otopné plochy⁵

Velice citlivá na místní přehřívání je zejména hlava člověka. I poměrně malé zvýšení střední radiční teploty v místě hlavy (ve výšce 1,7 m nad podlahou) nad průměrnou hodnotu, požadovanou ve výšce 1 m, způsobí nepříjemný pocit tepelné nepohody. Je tedy nutné omezit povrchovou teplotu stropní otopné plochy. Nejvyšší přípustnou teplotu při různé velikosti a různé výšce stropní otopné plochy zjišťoval při fyziologických pokusech Chrenko. Za nejvyšší přípustnou teplotu stropní otopné plochy Chrenko označil teplotu, při níž nejvýše 10% z celkového počtu zkoušených osob uvedlo, že se necítí příjemně. [4]



Obr. 1-34: Přípustná povrchová teplota stropu při teplotě vzduchu 20 °C podle Kollmara. [4]

I když je uvedený graf zkonstruován na základě subjektivních pocitů, lze k podobným výsledkům dojít při dodržení dvou předpokladů. Jednak při dodržení maximální hodnoty osálení temene hlavy, jednak při nepřekročení hodnoty sálavé asymetrie. Porušení obou kritérií vede ke značné nepohodě.

Pro výpočet intenzity osálení temene hlavy je možné odvodit vztah vyplývající ze Stefan-Bolzmannova zákona.

⁵ Kapitola navazuje na SVOČ práci L. Carbola [2]

$$I = q = \varphi_{np} \times \sigma \times F_p \times (T_p^4 - T_n^4) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1.37)$$

Druhou možností, jak vypočítat intenzitu osálení, je postup publikovaný ve věstníku ministerstva zdravotnictví z listopadu roku 2004. [16]

$$I = \frac{(t_r + 273)^4 - 8,65 \cdot 10^9}{17,3 \cdot 10^6} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1.38)$$

Pro tento vztah je nutné znát střední radiační teplotu, která se dá vypočítat buď z teploty kulového teploměru, nebo z naměřených teplot konstrukcí a poměrů sálání. Vztah předpokládá, že teplota povrchu lidského těla je 30°C. Na druhou stranu je ve vztahu použita střední radiační teplota, která zahrnuje nejenom teplotu otopného stropu, ale i podstatě nižší teploty okolních konstrukcí. Výsledná intenzita osálení pak může nabývat záporných hodnot. Z fyzikálního hlediska jsou oba vztahy správné, ale značná odlišnost výsledků vychází z různých předpokladů výpočtu (tab. 1-4). První uvedený vztah bral v potaz pouze teplo sdílené mezi otopnou plochou a povrchem lidského těla, kdežto druhý vztah počítá s celkovým sdílením tepla sáláním mezi člověkem a okolím.

Dříve byl stanoven limit intenzity osálení temene hlavy dle NV 178/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů, podle kterého nesmělo být překročeno 200 W/m². Toto nařízení vlády však bylo nahrazeno NV 361/2007 Sb., ve kterém žádný limit stanoven není. Zmíněné nařízení vlády se týká pracovních prostor. Obytnými prostory se zabývá vyhláška 6/2003. Ani v této vyhlášce nejsou obsaženy žádné limity týkající se sálavého vytápění, přestože dlouhodobý pobyt v prostorách s vysokou složkou sálání může způsobit závažná onemocnění.

Druhým prvkem ovlivňujícím tepelnou pohodu je sálavá asymetrie. Ta je definovaná jako rozdíl středních radiačních teplot horní a dolní strany elementárního čtverce. Tato veličina slouží zpravidla pro srovnání dvou navzájem rovnoběžných povrchů. Nejčastěji se měří mezi stropem a podlahou, kde asymetrie nabývá největších hodnot.

$$\Delta t_{pr} = T_{pr1} - T_{pr2} \quad (1.39)$$

Pro lepší představu vlivu sálavé asymetrie na tepelnou pohodu se zavádí ukazatel PD, neboli procento nespokojených.

$$\text{Teplý strop} \quad PD = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 \cdot \Delta t_{pr})} - 5,5 \quad \text{pro } \Delta t_{pr} < 23^\circ\text{C} \quad (1.40)$$

Protože legislativa České republiky nezná podmínku sálavé asymetrie, je vhodné použít alespoň normy ČSN EN 7726 a ČSN EN 7730, podle kterých se dá hodnotit tepelná pohoda podle kritéria PD.

Tab. 1-3: Rozdělení do kategorií podle ČSN EN ISO 7730 [6]

Kategorie	Tepelný stav těla jako celku		Místní diskomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD v % působený		
				Vertikálním rozdílem teploty vzduchu	Teplou nebo chladnou podlahou	Asymetrie radiace
A	< 6	-0,2 < PMV < +0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Tab. 1-4: Výpočet intenzity osálení temene hlavy a asymetrie radiační teploty měřené místnosti

Intenzita osálení temene hlavy I_s	
poměr osálení φ	0,6
teplota stropu t_p	30,1
Teplota povrchu těla	30
rozměr A	2,8
rozměr B	3
pocha	8,4
Stefan-Bolzmanova konst.	5,67E-08
I_s (rovnice 1.37) [W/m^2] =	3
stř. rad. tepl. (h=1,7m) t_r	23,23
I_s (rovnice 1.38) [W/m^2] =	-55

Asymetrie radiační teploty Δt_{pr}		
	pro h=1m	pro h=1,7m
stř. radiační teplota horní strany $t_{r,H}$	26,11	27,93
stř. radiační teplota dolní strany $t_{r,D}$	21,50	21,72
Δt_{pr} =	4,61	6,21
PD [%]	6,04	9,18

Z výpočtů uvedených v tab. 1-4 vyplývá, že intenzita osálení temene hlavy nabývá záporných hodnot. To znamená, že při teplotě stropu 30,1°C není lidská hlava osálena. Podmínka intenzity osálení je důležitá například u blízkých sálavých ploch. Pro celoplošné vytápění je určující asymetrie radiační teploty. Měřená místnost by se podle ČSN EN ISO 7730 řadila do kategorie C.

1.6.7 Použitá čidla a měřicí zařízení

Tab. 1-5: Použité měřicí přístroje

seznam použitých čidel a měřáků	typ	výrobce	počet	měřená		měřicí rozsah	přesnost měřidla
Měřicí ústředna	3290-8	ALMEMO	2	veličina	jednotka		
Termočlánek NiCr-Ni	ZA 9020-FS Thermo E4	Ahlborn	17	t_a, t_e, t_g, t_p	°C	-200 až 1370°C	±0.05 K, nebo ±0.05 %
Destička pro měření tepelného toku	ZA 9007-FS Norm E4	Ahlborn	2	q	W/m ²	není známo	není známo
Sonda pro měření teploty a vlhkosti	FHA646R	Ahlborn	1	t_a	°C	-30 až 100°C	pro 0 až 70°C: ±0,1°C
				ϕ_a	%r.H.	5 až 98% r.H.	±2 r.H.
Infra teploměr	7811	AMIR	1	t_p	°C	-32 až 600°C	pro 23°C: ±1 K, nebo ±1 %
Termokamera	není známo	není znám	1	t_p	°C	není známo	není známo
Kulový teploměr Vernon-Jokl	VJ1	není znám	1	t_g	°C	není známo	není známo

vysvětlivky:

t_a - teplota vzduchu v interiéru t_p - teplota povrchu konstrukce
 t_e - teplota vzduchu v exteriéru ϕ_a - relativní vlhkost vzduchu
 t_g - teplota kulového teploměru q - hustota tepelného toku

1.6.8 Závěr

V kapitole nazvané experimentální měření jsem se snažil v co největší stručnosti popsat měřené veličiny a zvolené postupy měření. Měřením bylo získáno velké množství často velice podobných dat. To bylo způsobeno malou proměnlivostí venkovní teploty, která se ani zdaleka nepřiblížila výpočtové teplotě pro Brno (-12°C). Zásah do systému regulace, kterým bych na krátký čas zvýšil teplotu otopného stropu, mi nebyl umožněn. Naměřená data nebylo nutno statisticky zpracovávat, protože byla použita především jako okrajové podmínky pro výpočtový model poměru osálení a střední radiační teploty.

B - APLIKACE TÉMATU NA ZADANÉ BUDOVĚ – KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

2.1 Popis objektu a navržené rekonstrukce

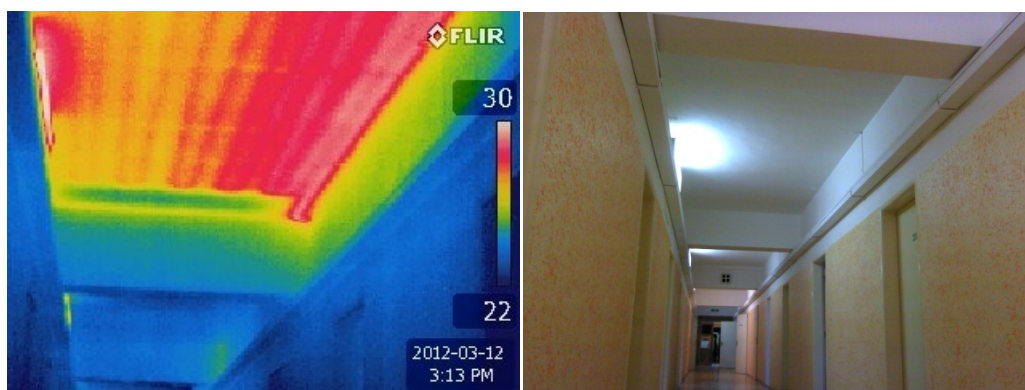
Měření sálavého vytápění bylo provedeno na objektu Listových kolejí VUT v Brně na ulici Kounicova 46/48. Objekt byl pojmenován po bývalém rektoru VUT v Brně prof. Vladimíru Listovi. Přestože hlavní budova byla postavena již v polovině 70. let minulého století a má úctyhodnou kapacitu 1030 lůžek, tento objekt nikdy neprošel významnější rekonstrukcí, která by snížila energetickou náročnost. Pouze na části budovy byly původní dřevěná zdvojená okna nahrazená plastovými. Obvodové stěny jsou vystavěny z tvárnic Krist tl. 300mm. Příčky jsou vyzděny z CDM bloků a z plných pálených cihel. Strop je monolitický, železobetonový s příčnými průvlaky. Zvláštností této budovy je stropní vytápění se zabetonovanými trubkami.



Obr. 2-1: Budova Listových kolejí v Brně

Tato šestipodlažní budova má hlavní rozvody topné vody v podzemním podlaží. Na jednotlivé stoupací porubí jsou vždy zrcadlově napojeny dva pokoje v každém patře. Vytápění ubytovacích prostor, dále jen pokojů, je zajištěno výhradně stropním vytápěním. Pouze v posledním podlaží jsou kvůli větším ztrátám instalována navíc

ještě článková otopná tělesa. Společné kuchyňky jsou vytápěny také článkovými otopnými tělesy. Společné prostory chodeb a schodišť mají pouze stropní vytápění. Aby byly kompenzovány minimální tepelné ztráty těchto místností, je otopná část stropu chodeb pouze před každým šestým pokojem. I přesto tímto opatřením dochází k významnému přehřívání společných prostor. Místy byly naměřeny teploty vzduchu ve výšce hlavy přesahující 24°C.



Obr. 2-2: IR snímek společné chodby

Budova v současné době prochází rekonstrukcí, která má vést ke snížení energetické náročnosti. Plášť budovy bude zateplený 14 cm polystyrenu. Pro případ nutnosti rekonstrukce i otopného systému budovy je vypracován tento návrh kapilárních rohoží, které nahradí stávající otopné plochy na chodbách a ve studentských pokojích.

Rekonstrukce by měla využívat co možná největší množství prvků stávajícího otopného systému, aby se minimalizovaly bourací a stavební práce. Rekonstrukce byla navržena tak, aby i nadále byl zachován princip stropního vytápění. Stropní otopné plochy se zabetonovanými trubkami budou odpojeny a na nové stoupací rozvody budou napojeny kapilární rohože. Systém měření a regulace pro vytápění bude upraven, aby byla zajištěna lepší regulovatelnost systému.

Hlavním podkladem pro vypracování návrhu rekonstrukce otopné soustavy budovy je stavební výkres typického podlaží včetně skladeb konstrukcí. Bilance potřeby tepla je převzata z energetického auditu. Výkresy a technické specifikace jednotlivých profesí TZB nejsou známy. Termosnímky a vizuální prohlídkou byly

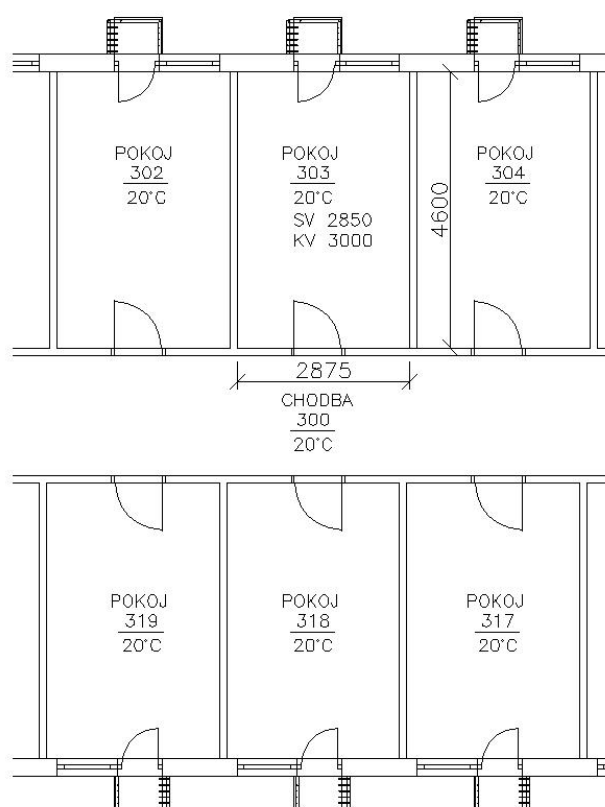
zjištěny informace o poloze rozvodů ÚT. Ostatní informace vychází z publikace J. Cihelky [4], který se problematikou stropního vytápění Crittal zabýval právě v období výstavby Listových kolejí.

Návrh řeší rekonstrukci otopné plochy v typickém pokoji kolejí. Stávající systém Crittal a stávající ocelové potrubí stoupacího a ležatého rozvodu bude nahrazeno plastovým o odpovídající světlosti. Kapilární rohože budou instalovány do omítky na stávající železobetonovou desku. Výrobce doporučuje, aby kapilární rohože byly na páteřní rozvody napojeny přes etážový rozdělovač, na kterém je možné kompenzovat odlišné tlakové ztráty jednotlivých okruhů. Protože na stoupací potrubí budou napojeny vždy stejně velké okruhy, bude i tlaková ztráta okruhů přibližně stejná a topné okruhy nebudou napojeny přes etážové rozdělovače.

Otopná plocha a teplotní spád bude navržený pro stávající nezateplený stav. Po zateplení bude teplotní spád snížen.

2.2 Výpočet tepelného výkonu

Navrhovaná místnost má pouze jednu ochlazovanou stěnu s balkónovými dveřmi a oknem. Výpočtová teplota 20°C je stejná i pro místnosti se kterými sousedí, proto se do tepelných ztrát nezapočítávají. Výpočet tepelného výkonu je proveden podle platné ČSN EN 12 831. Tato norma nepočítá se zvýšenou ztrátou prostupem vlivem vyšší teploty osálaných konstrukcí.



Obr. 2-3: Rozměry řešeného pokoje

2.2.1 Stávající stav

Tab. 2-1: Výpočet tepelného výkonu řešené místnosti podle ČSN EN 12 831

Výpočet tepelné ztráty prostupem pro místnost č. 303

Tepelné ztráty přímo do venkovního prostředí								
Stavební konstrukce								
Č.k.	Popis	A _k	U _k	ΔU	U _{kc}	e _k	A _k ·U _{kc} ·e _k	
SO 1	Venkovní stěna	4,12	1,5	0,1	1,6	1	6,60	
OZ 1	Okno zdvojené	2,09	2,4	0	2,4	1	5,01	
DO1	Dveře balónové	2,42	2,4	0	2,4	1	5,80	
Celková měrná tepelná ztráta přímo do venkovního prostředí H_{r,ie} = ∑_k A_k·U_{kc}·e_k							17,40	
Tepelné ztráty nevytápěným prostorem								
Stavební konstrukce								
Č.k.	Popis	A _k	U _k	ΔU	U _{kc}	b _u	A _k ·U _{kc} ·b _u	
Celková měrná tepelná ztráta přes nevytápěný prostor H_{r,iue} = ∑_k A_k·U_{kc}·b_u							0	
Tepelné ztráty z/do prostorů vytápěných na rozdílné teploty								
Stavební konstrukce								
Č.k.	Popis	A _k	U _k	f _{ij}	A _k ·U _k ·f _{ij}			
Celk. měrná tepelná ztráta z/do prostor s odl.tepl. H_{T,ij} = ∑_k A_k·U_k·f_{ij} (W/K)					0			
Tepelné ztráty zeminou								
Č.k.	Popis	A _k	U _{equiv,k}	A _k · U _{equiv,k}	f _{g1}	f _{g2}	G _w	f _{g1} · f _{g2} ·G _w
(∑ _k A _k ·U _{equiv,k})								
Celková měrná tepelná ztráta zeminou H_{T,ig} = (∑_k A_k·U_{equiv,k}) · f_{g1}· f_{g2}·G_w (W/K)								0
Celková měrná tepelná ztráta prostupem H_{r,i} = H_{r,ie} + H_{r,iue} + H_{r,ij}+ H_{r,ig}							17,40	
	θ _{int,i}	θ _e	θ _{int,i} - θ _e	H _{r,i}	Návrhová ztráta prostupem Φ _{T,i}			
	20	-12	32	17,40	556,8			

Tepelná ztráta větráním – přirozené větrání pro místnost č. 303

Objem místnosti V_i (m^3)	Výpočtová venkovní teplota θ_e	Výpočtová vnitřní teplota $\theta_{int,i}$	Hygienické požadavky	
			n (h^{-1})	$V_{min,i}$ (m^3/h)
37,7	-12	20	0,5	18,8
Počet nechráněných otvorů	n_{50}	Činitel zaclonění e	Výškový korekční činitel ε	Množství vzduchu infiltrací $V_{inf,i}$ (m^3/h)
2	7,8	0,03	1	17,6
Výpočet tepelné ztráty větráním				
max. z $V_{min,i}$, $V_{inf,i}$	$H_{v,i}$	$\theta_{int,i} - \theta_e$	Návrhová tepelná ztráta větráním $\Phi_{v,i}$ (W)	
18,8	6,4	32	205,0	

Výpočet návrhového tepelného výkonu (pro budovu s přirozeným větráním)

Místnost	Tepelný výkon pro tepelné ztráty prostupem $\Phi_{T,i}$ (W)	Tepelný výkon pro tepelné ztráty větráním $\Phi_{v,i}$ (W)	Zátopový tepelný výkon $\Phi_{RH,i}$ (W)	Celkový tepelný výkon $\Phi_{HL,i}$ (W)
303	556,8	205,0	0	761,9

2.2.2 Nový stav po zateplení

Tab. 2-2: Výpočet tepelného výkonu řešené místnosti podle ČSN EN 12 831

Výpočet tepelné ztráty prostupem pro místnost č. 303z

Tepelné ztráty přímo do venkovního prostředí								
Stavební konstrukce								
Č.k.	Popis	A _k	U _k	ΔU	U _{kc}	e _k	A _k .U _{kc} .e _k	
SO 1	Venkovní stěna	4,12	0,235	0,02	0,255	1	1,05	
O 1	Okno plastové	2,09	1,2	0	1,2	1	2,50	
DO1	Dveře balónové plastové	2,42	1,2	0	1,2	1	2,90	
Celková měrná tepelná ztráta přímo do venkovního prostředí H_{r,ie} = ∑_k A_k.U_{kc}.e_k							6,45	
Tepelné ztráty nevytápěným prostorem								
Stavební konstrukce								
Č.k.	Popis	A _k	U _k	ΔU	U _{kc}	b _u	A _k .U _{kc} .b _u	
Celková měrná tepelná ztráta přes nevytápěný prostor H_{r,iue} = ∑_k A_k.U_{kc}.b_u							0	
Tepelné ztráty z/do prostorů vytápěných na rozdílné teploty								
Stavební konstrukce								
Č.k.	Popis	A _k	U _k	f _{ij}	A _k .U _k .f _{ij}			
Celk. měrná tepelná ztráta z/do prostor s odl.tepl. H_{r,ij} = ∑_k A_k.U_k.f_{ij} (W/K)							0	
Tepelné ztráty zeminou								
Č.k.	Popis	A _k	U _{equiv,k}	A _k . U _{equiv,k}	f _{g1}	f _{g2}	G _w	f _{g1} . f _{g2} .G _w
(∑ _k A _k .U _{equiv,k})								
Celková měrná tepelná ztráta zeminou H_{r,jg} = (∑_k A_k.U_{equiv,k}). f_{g1}. f_{g2}.G_w (W/K)							0	
Celková měrná tepelná ztráta prostupem H_{r,i} = H_{r,ie} + H_{r,iue}+ H_{r,ij}+ H_{r,jg}							6,45	
	θ _{int,i}	θ _e	θ _{int,i} - θ _e	H _{r,i}	Návrhová ztráta prostupem Φ _{T,i}			
	20	-12	32	6,45	206,5			

Tepelná ztráta větráním – přirozené větrání pro místnost č. 303z

Objem místnosti V_i (m^3)	Výpočtová venkovní teplota θ_e	Výpočtová vnitřní teplota $\theta_{int,i}$	Hygienické požadavky	
			n (h^{-1})	$V_{min,i}$ (m^3/h)
37,69125	-12	20	0,5	18,8
Počet nechráněných otvorů	n_{50}	Činitel zaclonění e	Výškový korekční činitel ϵ	Množství vzduchu infiltrací $V_{inf,i}$ (m^3/h)
2	5	0,03	1	11,3
Výpočet tepelné ztráty větráním				
max. z $V_{min,i}$, $V_{inf,i}$	$H_{v,i}$	$\theta_{int,i} - \theta_e$	Návrhová tepelná ztráta větráním $\Phi_{v,i}$ (W)	
18,8	6,4	32	205,0	

Výpočet návrhového tepelného výkonu (pro budovu s přirozeným větráním)

Místnost	Tepelný výkon pro tepelné ztráty prostupem $\Phi_{T,i}$ (W)	Tepelný výkon pro tepelné ztráty větráním $\Phi_{v,i}$ (W)	Zátopový tepelný výkon $\Phi_{RH,i}$ (W)	Celkový tepelný výkon $\Phi_{HL,i}$ (W)
303z	206,5	205,0	0	411,5

2.3 Návrh otopné plochy

Nově instalované kapilární rohože budou umístěny pouze na část stropu, stejně jako stávající otopná plocha. Návrh teplotního spádu bude proveden podle DIN (viz. kapitola 1.2) a vlastním programem tepelné bilance (viz. kapitola 3.4).

Stávající stav:

Potřebný topný výkon (stávající stav): 802,9 W

Plocha kapilárních rohoží: 8,13 m²

Potřebný měrný topný výkon (stávající stav): 98,7 W/m²

$$q_N = C \times \Delta T^{1,12} = 6,211 \cdot (32 - 20)^{1,12} = 98,4 \text{ W/m}^2$$

Stav po zateplení:

Potřebný topný výkon (stávající stav): 411,5 W

Plocha kapilárních rohoží: 8,13 m²

Potřebný měrný topný výkon (stávající stav): 50,6 W/m²

$$q_N = C \times \Delta T^{1,12} = 6,211 \cdot (27 - 20)^{1,12} = 54,1 \text{ W/m}^2$$

Tab. 2-3: Návrh kapilárních rohoží

č. m.	teplota místnosti	rozměr KR		počet KR	teplotní spád		t _m °C	měrný výkon W/m ²	instal. Výkon W	ztráta W	pokrytí %	poznámka
		délka	šířka		°C	°C						
303	20	2750	x 985	3	34	30	32	98,4	800	761,9	105	stávající stav
303z	20	2750	x 985	3	29	25	27	54,1	439	411,5	107	po zateplení

Zvolený teplotní spád pro nezateplený stav: 34/30°C

Zvolený teplotní spád pro zateplený stav: 29/25°C

Příloha č. 1: Výkres otopné plochy řešeného pokoje

2.4 Navazující profese

Vzduchotechnika:

Objekt bude větrán převážně přirozeně. Hygienická výměna vzduchu obytných místností a chodeb bude zajištěna přirozeným větráním. Koupelny záchody a prádelna budou větrány nuceně, a to nástěnnými axiálními ventilátory. Větrání bude propojeno se zapínáním osvětlení.

Zdravotechnika:

Vodovod: Stávající vodovodní přípojka bude nadále sloužit pro zásobování budovy vodou. Vodoměrná sestava bude umístěna ve strojovně. V objektu jsou navrženy rozvody studené, teplé a cirkulační vody a tyto rozvody budou vedeny v instalačních šachtách. Příprava teplé vody bude zajištěna deskovým výměníkem z CZT. Pro pokrytí odběrových špiček bude instalovaná akumulární nádoba o objemu 6300l. Velikost akumulární nádoby a výkon deskového výměníku bude navržen na základě analýzy denního průběhu potřeby vody. Kromě pojistného ventilu bude do systému přípravy TV instalována i průtočná expanzní nádoba. Do strojovny bude přivedena studená voda pro doplňování vody do systému vytápění a pro úklid.

Kanalizace: Bude řešena jako oddílná soustava dešťové a splaškové kanalizace. Plochá střecha bude odvodněna střešními vpustmi s lapači splavenin. Odpadní potrubí bude vedeno uvnitř objektu v instalačních šachtách. Svodné potrubí bude napojeno přes revizní šachtu, umístěnou před objektem, do veřejné kanalizace. V místech náchylných na zanášení budou instalovány čistící kusy. Podlahové vpusti budou ve strojovně sloužit k odkapu vody pojistných ventilů a pro případ vypouštění otopného systému. Podlahové vpusti budou umístěny také v prostorách umývárny.

Plynovod: Plynovodní potrubí se v objektu zřizovat nebude. V kuchyňkách jsou umístěny elektrické sporáky. Zdrojem tepla pro přípravu TV a vytápění bude CZT.

2.5 Technická zpráva

1.1. Účel a funkce zařízení pro vytápění

Projekt řeší rekonstrukci otopného systému Listových kolejí v Brně. Zdrojem tepla je stávající horkovodní předávací stanice umístěná v 1. PP. Pro pokrytí tepelných ztrát bude sloužit stropní sálavé vytápění a článková otopná tělesa. Jedná se o budovu se šesti nadzemními a dvěma podzemními podlažními umístěnou v Brně. Projekt je zpracován v rozsahu dokumentace pro stavební povolení.

1.2. Výchozí podklady

Výchozími podklady pro zpracování dokumentace byly:

- stavební výkresy
- průkaz energetické náročnosti budovy z roku 2007
- hygienické předpisy
- státní normy oboru vzduchotechnika
- státní normy oboru vytápění
- požadavky investora
- požadavky profesí

Součástí projektu nejsou navazující profese. Požadavky profese vytápění byly s navazujícími profesemi projednány a předány a jsou zpracovány do samostatných projektů jednotlivých profesí.

1.3. Použité předpisy a obecné technické normy

- Nařízení vlády č. 68/2010 Sb. ze dne 19. března 2010, kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci
- Nařízení vlády č.6/2002 Sb. ze dne 16. prosince 2002, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb
- Nařízení vlády č.148/2007 Sb. ze dne 15. března, kterým se mění nařízení vlády č. 88/2004 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací

- Vyhl. 193/2007 - kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu
- Vyhl. 194/2007 - kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími dodávku tepelné energie konečným spotřebitelům
- Vyhl. 499/2006 Sb. o dokumentaci staveb
- Vyhl. 151/2001- kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie
- ČSN 73 0540 -2 (2007) Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky
- ČSN 73 0540 -3 Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrh hodnoty veličin
- ČSN EN 12831 – Tepelné soustavy v budovách – Výpočet tepelného výkonu
- ČSN EN 12828 - Tepelné soustavy v budovách - Navrhování teplovodních tepelných soustav
- ČSN 06 0310 - Tepelné soustavy v budovách - Projektování a montáž
- ČSN 06 0320 - Ohřívání užitkové vody - Navrhování a projektování
- ČSN 06 0830 - Zabezpečovací zařízení pro ústřední vytápění a ohřívání užitkové vody
- ČSN EN 1886 - Větrání budov - Potrubní prvky - Mechanické vlastnosti
- ČSN EN 12 236 - Větrání budov - Závěsy a uložení potrubí - Požadavky na pevnost
- ČSN 73 0802 - Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty (2000)
- ČSN 73 0810 - Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení (2005)
- ČSN EN ISO 13 790 - Energetická náročnost budov - Výpočet potřeby energie na vytápění a chlazení
- ČSN 73 0802 - Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty (2000)

1.4. Výpočtové hodnoty klimatických poměrů

Místo	:	Brno
Nadmořská výška	:	234 m n. m.
Zimní výpočtová teplota	:	-12°C

1.5. Mikroklimatické podmínky

Parametry interního mikroklimatu jsou dány hygienickými předpisy, směrnici a normami. S návrhovými parametry vnitřního prostředí bude investor seznámen, vstupní data pro výpočet tepelných zisků byla odsouhlasena.

1.5.1. Balance potřeb tepla pro vytápění a přípravu TV

- celková tepelná ztráta budovy prostupem a přirozeným větráním	: 1393kW
- potřebný výkon pro ohřev TV	: 280 kW
- objem akumulční nádoby pro ohřev TV	: 6300L
- předpokládaná roční potřeba pro vytápění	: 7594 MWh / rok.
- potřeba tepla pro přípravu TV činí	: 4543 MWh / rok.

1.6. Koncepce zařízení pro techniku prostředí

Zdrojem tepla pro vytápění a přípravu TV je stávající horkovodní předávací stanice CZT o výkonu 1720 kW. Teplá voda se připravuje stávajícím deskovým výměníkem o výkonu 280kW. Odběrové špičky jsou pokryty akumulčním zásobníkem o objemu 6300 litrů. Výměňková stanice a akumulční nádrž je umístěna ve strojovně v 1. PP. Zařízení bude vybaveno pojistnou sestavou složenou z expanzní nádoby a pojistného ventilu. Vybavení strojovny zůstane beze změny. Stávající stropní otopné plochy Crittal budou odpojeny. Stávající potrubní rozvody z pozinkovaného potrubí budou nahrazeny potrubím plastovým.

Objekt bude vytápěn velkoplošným stropním systémem bez akumulace. Kapilární rohože budou umístěny na železobetonovou stropní desku a budou omítnuty. Hlavní ležaté rozvody jsou vedeny pod stropem v 1. PP. Jednotlivé otopné plochy jsou napojeny na stoupací potrubí. Na patě stoupaček budou instalovány regulační a vypouštěcí ventily USV-I. Systém stropního vytápění bude rozdělen na dvě větve podle světové orientace. Rekonstrukce se netýká stávajícího rozvodu pro článková otopná tělesa. Pro ně bude zachována samostatná větev s vyšším teplotním spádem.

Budova má přes pět set identických pokojů se stropním vytápěním. Regulace teploty bude řízena systémem MaR podle referenční místnosti. Profese MaR zajistí

ekvitermní regulaci teplotního spádu a dalších funkcí, jako jsou útlumové režimy v době, kdy je objekt opuštěn.

1.6.1. Popis zdroje tepla

Zdrojem tepla je stávající horkovodní výměníková stanice napojená na CZT o výkonu 1720 kW. Rekonstrukce se předávací stanice netýká.

1.6.2. Ohřev TV

Příprava TV bude zajištěna centrálně, průtokovým ohřevem s akumulacním zásobníkem. Zdrojem tepla je deskový výměník o výkonu 280 kW napojený na horkovod CZT. Akumulační zásobník o objemu 6300l slouží pro pokrytí odběrových špiček. Tato projektová dokumentace neřeší rekonstrukci systému ohřevu TV.

1.6.3. Otopná plocha

Stropní sálavé vytápění je navrženo z kapilárních rohoží K.S15 G-term. Kapilární rohože budou instalované do omítky na železobetonové stropní desky. Potrubí rozvodu kapilárních rohoží bude vedeno v drážkách ve stěnách, těsně pod stropem. Při instalaci kapilárních rohoží se musí dodržovat montážní předpisy výrobce. Napojení kapilár v rámci jednotlivých okruhů bude realizováno systémem Tichelmann. Regulaci výkonu otopných ploch zajistí systém MaR podle referenční místnosti. Kapilární rohože budou napojeny na samostatnou větev o nižším teplotním spádu. Stávající článková otopná tělesa a jejich potrubní rozvody zůstanou beze změny.

1.7. Parametry teponosné látky

Do systému bude napuštěna upravená voda z vodovodního řádu. Teplotní spád bude regulován systémem MaR. Maximální provozní přetlak 0,4 MPa.

1.8. Expanzní a pojistné zařízení, doplňování soustavy

Pro danou soustavu rozvodů topné vody je stanoven maximální provozní přetlak 400 kPa.

Zabezpečení soustavy proti objemovým změnám topné vody je navrženo uzavřenou expanzní nádobou s membránou. Jištění soustavy je řešeno pojistným ventilem.

Doplňování systému vodou je automatické - v závislosti na tlaku otopné vody snímaného na potrubí. Doplňování bude spuštěno při poklesu tlaku na 100 kPa, ukončení doplňování při dosažení tlaku 250 kPa.

1.9. Potrubí

Rozvody budou provedeny z Ekoplastik PP-R PN20, v části 1. PP v místě napojení na hlavní rozdělovač bude použito potrubí ocelové.

1.10. Armatury

Potrubní rozvody jsou doplněny drobnými odvzdušňovacími a měřicími armaturami. Projekt uvažuje s automatickým odvzdušňováním hlavních tras rozvodu. Veškeré armatury okruhu s kapilárními rohožemi musí být vyrobeny z korozivzdorného materiálu, tj. bronz, nerez nebo niklovaný bronz. Hydraulické vyvážení bude provedeno vyvažovacími a vypouštěcími ventily USV-I.

1.11. Izolace

Tepelné izolace splňují jednak požadavky na úsporu tepla a jednak slouží k útlumu hluku vznikajícího prouděním. Veškeré potrubí vedené v interiéru bude izolováno tepelně-akustickou izolací. Dodávka a provedení izolací je součástí profese vytápění. Izolace potrubí a všech zařízení bude prováděna po montáži potrubí a po tlakových zkouškách. Izolace potrubí je navržena a bude provedena v souladu s vyhláškou MPO ČR č. 193/2007. Na potrubí vytápění je navržena extrudovaná polyetylenová izolace šedé barvy montovaná pomocí lepidla.

Izolace vytápění: Součinitel tepelné vodivosti je při teplotě 45 °C 0,039 W/mK. Min teplota okolí 15 °C.

Tab. 2-4: Minimální tloušťka izolace potrubí

DN (mm)	20	25	32	40	50
Tl. izolace (mm)	40	40	50	40	40
Měrná ztráta (W/m)	5.1	5.8	6,6	7.1	8.2

Navržené izolace jsou použitelné pouze pro vytápění. Pokud by se rozvody otopné vody měly využít pro chlazení, bylo by nutno použít izolaci z pěnového kaučuku!

1.12. Nátěry

Potrubí v částech, kde nebude použit materiál PP-R, tj. v místech napojení hlavního rozdělovače, bude opatřeno nátěrem.

1.13. Označení potrubí

Potrubí bude označeno dle ČSN 13 0072 barevnými pruhy. Směr proudění bude označen šipkami lepenými na izolaci. Dále budou označena jednotlivá zařízení v předávací stanici.

2. Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

Provedení projektu plně respektuje ČSN 14 0646 vyhlášku ČÚBP č. 48/82 a související normy a předpisy. Montáž všech zařízení musí být prováděna odborně způsobilými pracovníky a musí být dodržována veškerá bezpečnostní opatření. Za bezpečnost při montáži je odpovědný objednatel ve smyslu platných předpisů a montážní organizace, resp. montér provádějící montáž. Montážní organizace s investorem uzavírá dohodu, která obsahuje i podmínky pro bezpečnou montáž. I při montáži je nutno výše uvedené bezpečnostní normy dodržovat.

Při provozu odpovídá za bezpečnost práce provozovatel, resp. pracovník pověřený obsluhou a údržbou zařízení. Všechny podmínky pro bezpečnou práci musí být uvedeny v provozním řádu. Při provozu je vhodné dodržovat následující předpisy i v případě, že nejsou všechny závazné:

ČSN 34 1010 - Všeobecné předpisy pro ochranu před nebezpečným dotykovým napětím

ČSN 34 3100 - Bezpečnostní předpisy pro obsluhu a práci na elektrických zařízeních

ČSN 34 3103 - Bezpečnostní předpisy pro obsluhu a práci na elektrických přístrojích a rozvaděčích

ČSN 34 3500 - První pomoc při úrazech elektrinou

ČSN 65 0201 - Hořlavé kapaliny. Provozovny a sklady.

ČSN 65 0202 - Hořlavé kapaliny. Plnění a stáčení.

Vyhláška ČÚBP č. 48/1982 Sb., Českého úřadu bezpečnosti práce kterou se stanoví základní požadavky k zajištění bezpečnosti práce a technických zařízení

Vyhláška č. 324/1990 Sb. Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu ze dne 13.4.1990 o bezpečnosti práce a technických zařízení při stavebních pracích

Projektová dokumentace je zpracována v souladu s platnými hygienickými předpisy a souvisejícími normami. Zejména zákon o ochraně veřejného zdraví č.258/2000 Sb. o hygienických požadavcích na pracovní prostředí.

3. Ochrana životního prostředí

Provoz navrženého zařízení pro vytápění nebude mít negativní dopad na životní prostředí. Projekt plně respektuje požadavky na užití energie a pravidla pro vytápění v souladu s vyhláškou č. 193/2007 Sb. a dle ustanovení vyhlášky ČÚBP č. 48/1982 a souvisejících norem a předpisů.

4. Pokyny pro montáž

4.1. Postup montáže a připomínky pro montáž

Postup montáže lze volit libovolně podle stavební připravenosti, je však nutno dodržovat některé zásady při montáži jednotlivých celků. Je nutné dodržovat projektovou dokumentaci a předepsané technologické postupy. Rovněž je nutno vždy dodržet zásadu, že potrubí musí být tlakově vyzkoušeno před zaizolováním potrubí. Při montáži je nutno dodržet pokyny výrobce uvedené v průvodní dokumentaci zařízení a jednotlivých výrobců. Rovněž musí být dodržena důsledná koordinace mezi profesemi Vzduchotechnika, ZTI, Elektro a MaR.

4.2. Potrubní rozvody

Při montáži je nutno velmi důsledně respektovat koordinační zásady pro montáž potrubí všech profesí a elektroinstalace. V průběhu projektování byly uvedené profese koordinovány, a proto nelze provádět žádné změny bez projednání se všemi zúčastněnými profesemi.

Pokud je vyznačen na výkrese spád bez udání hodnoty, jedná se o spád 2 ‰ až 3 ‰ nebo větší. Nutno zajistit všeobecnou zásadu, že ve všech nejvyšších místech potrubního systému je nutno umístit odvětrávací ventily, i když to není na výkresech vyznačeno. V případě, že je potřeba instalovat vodorovné potrubí bez spádování, je nutno po 15 až 20 m. umisťovat odvětrávací ventily. V případě jakékoliv změny vynucené situací na montáži je nutno zamezit vzniku „pytlů“ na potrubí a je nutno zajistit odvětrání všech nejvyšších míst. Rovněž je nutno zajistit možnost vypouštění vody z potrubí. Nutno je zajistit průchody požárními zdi tak, aby izolace v průchodu odolávala přímému ohni 30 minut. Před vyzkoušením a uvedením do provozu musí být potrubí a každé zařízení řádně propláchnuto. Veškeré potrubí, které bude opatřeno tepelnou izolací, je nutno ukládat na závěsy a podpěry s pevnou izolační vložkou, aby bylo zamezeno vzniku tepelných mostů a hlavně, aby byla zajištěna parotěsnost izolace (v případě použití rozvodů pro chladicí vodu). Na potrubí je možné začít instalovat tepelnou izolaci až po provedení tlakové zkoušky. Izolovat je nutno veškeré potrubí, včetně těles armatur. Další podrobnosti jsou uvedeny v kap. Izolace.

4.3. Tlaková zkouška potrubí

Po instalaci potrubí před zahájením izolačních prací je nutno provést tlakovou zkoušku na pevnost a zkoušku na těsnost. Obě zkoušky budou provedeny současně. Není nutno provádět tlakovou zkoušku celého systému, je možno provádět tuto zkoušku po ucelených úsecích. Zkoušený okruh (část okruhu) se napustí vodou a natlakuje na zkušební přetlak. Pod tímto tlakem se nechá potrubí 5 minut a tlak během této doby nesmí poklesnout. Následuje důkladná prohlídka všech spojů pod tlakem. Vadná místa je nutno označit a po uvolnění tlaku opravit. Tato zkouška se opakuje po každé nutné opravě spojů. O úspěšném provedení tlakových zkoušek musí být za účasti investora sepsán protokol. Tento protokol se stává součástí dokumentace zařízení.

Zkušební přetlak = 1,5 násobku maximálního provozního přetlaku. Teprve po provedené tlakové zkoušce je možno provádět tepelné izolace potrubí.

4.4. Individuální vyzkoušení

Provádí se podle technické dokumentace dodané výrobcem jednotlivých strojů a zařízení a podle projektové dokumentace.

4.5. První uvedení do provozu, komplexní vyzkoušení a vyregulování systému

Provádí montážní organizace po skončení montáže. Tato zkouška ověřuje kvalitu provedení, montáže a provozuschopnost celého zařízení. Komplexní funkční zkoušku však nelze provést bez dokončení izolace. U dlouhého neizolovaného potrubí nelze zajistit projektované parametry, dojde totiž k přílišnému ochlazení dopravované otopné vody a nelze potom dostatečně vytopit místnosti.

První uvedení do provozu bude provedeno v rámci přípravy na komplexní vyzkoušení. Před prvním uvedením do provozu musí být provedeny:

- tlakové zkoušky a zkoušky těsnosti všech částí systému
- kompletní provedení izolačních prací
- kompletní instalace prvků MaR a elektroinstalace

- přezkoušení instalace a vnějších spojů

Servis výrobce je nutný z důvodu nebezpečí ztráty garančních závazků. Před prvním napuštěním okruhu pracovní kapalinou je nutno potrubí několikrát propláchnout vodou, aby se odstranilo znečištění potrubí při montáži. Teprve po vyčištění potrubí, po vypuštění proplachovací vody a po vyčištění všech filtrů v potrubí je systém připraven pro první napuštění. Potrubní systém je nutno naplnit upravenou vodou. Při napouštění je nutno průběžně kontrolovat funkci automatického odvzdušnění.

Po naplnění systému je možno spustit čerpadlo a postupně dokončit plnění potrubí a jeho odvzdušnění. Naplněný okruh je nutno nechat cirkulovat několik hodin, potom je nutno zkontrolovat tlakovou ztrátu filtrů a podle potřeby znovu filtry vyčistit. Teprve po vyčištění filtrů je možno přistoupit k vyregulování jednotlivých prvků a seřízení celého systému, a to z hlediska funkčního, nikoliv z hlediska tepelných parametrů. Po komplexním vyzkoušení funkce systému je možné přistoupit ke komplexním zkouškám i z hlediska ověření jeho provozních schopností a dosažení tepelných parametrů.

4.6. Zkušební provoz

Zkušební provoz provádí uživatel zařízení vlastní obsluhou nebo zkušební provoz objedná u montážní organizace. Podmínky a rozsah spoluúčasti na zkušebním provozu se sjednají zvláštní dohodou. Při provozu se ověřuje dosažení provozních parametrů předepsaných projektem a provozní spolehlivost celého zařízení.

5. Pokyny pro obsluhu, trvalý provoz a údržbu, bezpečnost práce

Trvalý provoz provádí uživatel zařízení a je povinen vypracovat provozní řád. Do provozního řádu je nutno zahrnout provozní předpisy dodané výrobcem jednotlivých strojů a dále i veškeré předpisy bezpečnosti práce. Provozní řád není součástí tohoto projektu, musí být vypracován po montáži zařízení. Je vhodné zahrnout do provozního řádu poznatky ze zkušebního provozu. Tepelné čerpadlo, seřízené a odevzdané do trvalého provozu, smí být obsluhováno pouze řádně zaškolenými pracovníky, a to dle provozních předpisů dodavatelů zařízení. Před zahájením topné sezóny je nutno

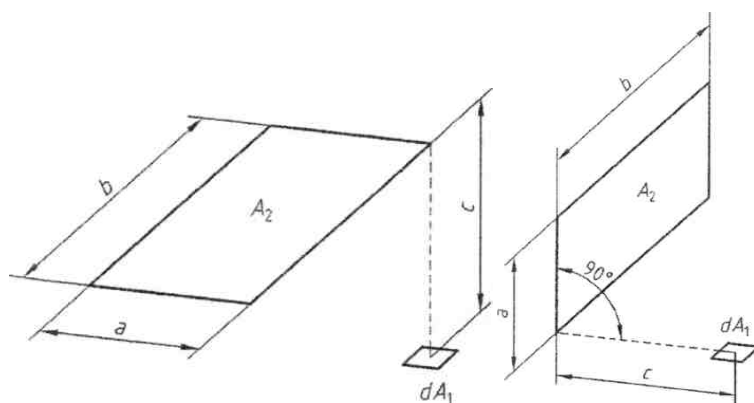
doplnit pracovní kapaliny, překontrolovat chod čerpadel a upravit provozní tlak vodního systému. I při plně automatickém provozu zařízení je nutno sledovat funkci jednotlivých prvků automatické regulace a provádět pravidelnou údržbu regulačních obvodů i jednotlivých měřicích, regulačních a ovládacích prvků. Nutno sledovat dosahované parametry, hlavně teploty vody a vzduchu. Velmi důležité je také podle potřeby čistit filtry kapaliny. Je samozřejmé, že uzavřít ventily před a za filtrem a demontovat víko filtru při jeho čistění je možné pouze za klidu čerpadel a zablokované automatiky zajišťující provoz.

C - ALGORITMIZACE, MODELOVÁNÍ, APLIKACE

VÝPOČETNÍ TECHNIKY

3.1 Poměr osálání φ

Poměr osálání φ [-] udává, jak velká část z celkového množství tepla sálající elementární plochy F_1 dopadá na plochu F_2 . Za předpokladu, že žádné záření není pohlceno ani odráženo vnitřním prostředím, a zároveň obě tělesa jsou dokonale černá. Výsledné vztahy pro poměr osálání jsou odvozené z Lambertova-kosinového zákona a ze zákona ubývání intenzity s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje. V jednoduchém případě bodu sálajícího na rovinnou plochu se dá říci, že poměr osálání je prostorovým úhlem vyděleným tak, aby nabýval maximální hodnoty 1. Pro poměry osálání jsou sestaveny tabulky, ze kterých jde jeho hodnota vyčíst v závislosti na vzájemné vzdálenosti a velikosti. Druhým možným řešením je numerická integrace dostatečně velkého množství elementárních plošek. Existují dva základní vztahy pro sálající elementární plošku. První je určený pro plochy navzájem rovnoběžné a druhý pro plochy kolmé. Z těchto vztahů se dají numerickou integrací spočítat i velmi obtížně řešitelné případy osálání dvou ploch o rozdílných rozměrech, které nejsou situovány přímo proti sobě.



Obr. 3-1: Poloha sálajícího elementu a osálané plochy pro výpočet poměru osálání

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} * \left[\tan^{-1}(n) - \frac{1}{\sqrt{1+m^2}} * \tan^{-1}\left(\frac{n}{\sqrt{1+m^2}}\right) \right] \quad (3.1)$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} * \left[\frac{m}{\sqrt{1+m^2}} * \tan^{-1}\left(\frac{n}{\sqrt{1+m^2}}\right) + \frac{n}{\sqrt{1+n^2}} * \tan^{-1}\left(\frac{m}{\sqrt{1+n^2}}\right) \right] \quad (3.2)$$

Kde:

$$m = \frac{a}{h} ; n = \frac{b}{h}$$

a, b – rozměry osálané plochy

h - vzdálenost obou ploch

3.2 Výpočtový model poměru osálení ϕ , střední radiační teploty a asymetrie radiační teploty ⁶

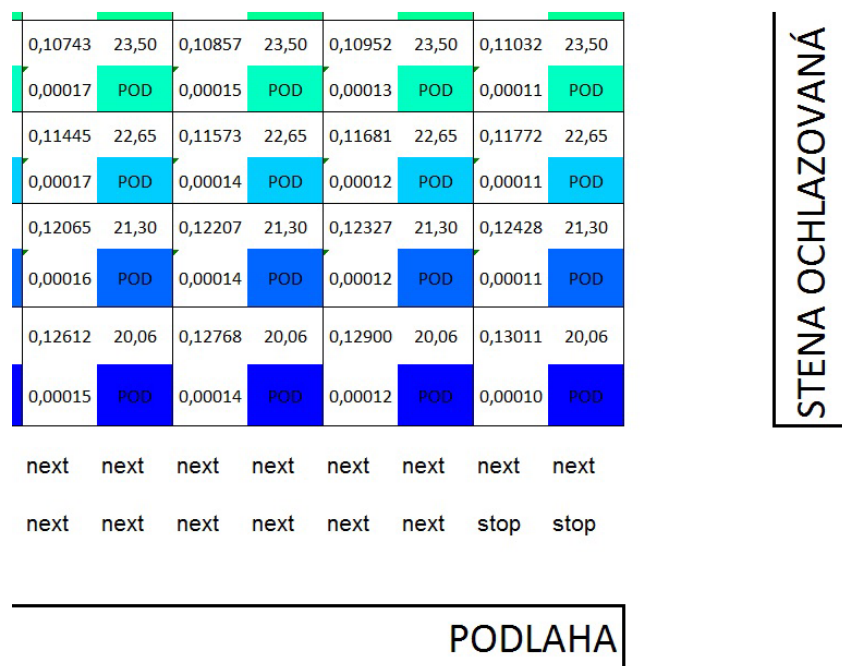
Výpočtový model byl sestaven v prostředí programu Microsoft Office Excel v programovacím jazyku Visual Basic for Applications (VBA). Modelovaná místnost je rozložena na šest konstrukcí (stěna levá, pravá, chodba, stěna ochlazovaná, strop a podlaha). Pro každou konstrukci je vyhrazen jeden „list“ ze „sešitu“ Excel. Všechny konstrukce jsou rozděleny na ekvidistantní síť o velikosti 200 na 200 mm. Velikost sítě byla zvolena s ohledem na velkou časovou náročnost výpočtů a dostatečnou přesnost. Každý prvek sítě (dále jen čtverec) obsahuje 4 buňky, do kterých jsou zapisována data potřebná pro výpočet. V levé horní buňce je celkový poměr osálení oblasti mezi referenčním bodem a řešeným čtvercem, v levé spodní buňce je poměr osálení pouze řešeného čtverce. V pravé horní buňce je teplota čtverce. Pravá spodní buňka je pomocná. Červenými čísly kolem konstrukce jsou naznačeny referenční řádky a sloupce konstrukce (Obr. 3-2).

stěna levá

		STROP							
		1		2		3		4	
CHODBA	15	0,00086	29,63	0,00045	29,63	0,00045	29,63	0,00086	29,63
		0,00042	NAD	0,00045	NAD	0,00045	NAD	0,00042	NAD
	14	0,00086	27,43	0,00045	27,43	0,00045	27,43	0,00086	27,43
		0,00042	POD	0,00045	POD	0,00045	POD	0,00042	POD
	13	0,00326	26,70	0,00169	26,70	0,00169	26,70	0,00326	26,70
		0,00116	POD	0,00125	POD	0,00125	POD	0,00116	POD
	12	0,00672	26,27	0,00348	26,27	0,00348	26,27	0,00672	26,27
		0,00167	POD	0,00179	POD	0,00179	POD	0,00167	POD

Obr. 3-2: Výřez z výpočtové sítě levé stěny s referenčním křížem

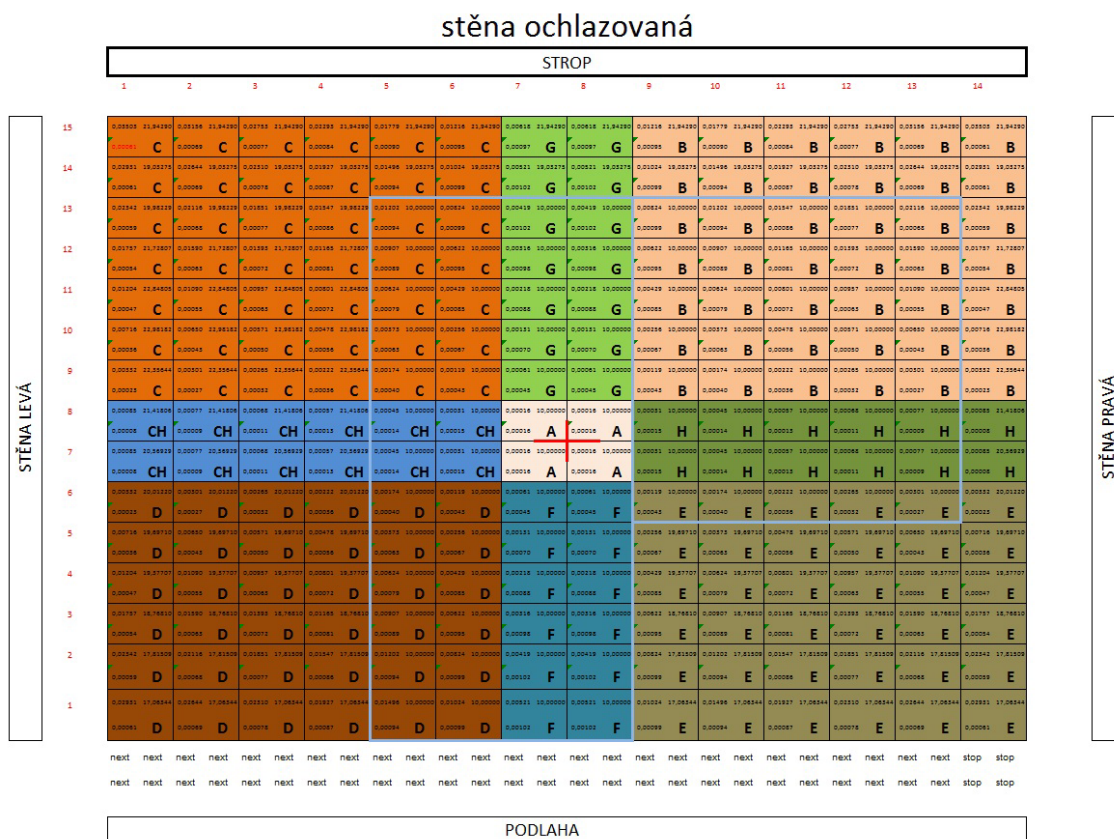
⁶ V menším rozsahu byl výpočtový model popsán ve SVOČ práci L. Carbola



STENA OCHLAZOVANÁ

Obr. 3-3: Podmínka skoku na další sloupec a ukončení podprogramu

Program se skládá z několika podprogramů, které se uplatňují v určitých fázích výpočtu. Tyto podprogramy probíhají v cyklech po řádcích a sloupcích v každém „listu“ zvlášť. Skok na další sloupec nebo konec podprogramů je řešen textovou podmínkou na posledním řádku (Obr. 3-3). Základem programu je výpočet poměru osálení. Tento podprogram přiřazuje podle polohy konstrukce v prostoru správný vztah pro výpočet poměru osálení mezi řešeným čtvercem a referenčním bodem. V druhém cyklu se využívá adičního pravidla pro výpočet poměru osálení pouze řešeného čtverce. Náročnost tohoto podprogramu vyplývá z celkem 9 podmínek „když“, v závislosti na poloze od řešeného čtverce a referenčního bodu (Obr. 3-4). Tento podprogram se zopakuje v každém „listu“ s lokálními souřadnicemi.

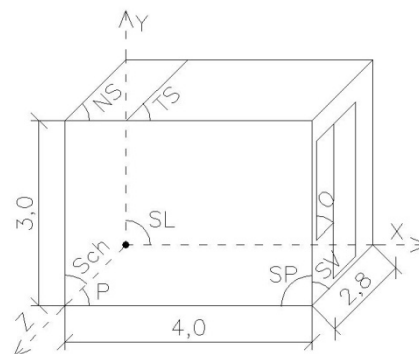


Obr. 3-4: Barevná ilustrace 9 podmínek „když“ v závislosti na poleze referenčního bodu

O přepočet se zadaných globálních souřadnic XYZ na lokální souřadnice referenčních řádků a sloupců se postará další podprogram.

GLOBÁLNÍ		Globalizace lokálních s	
X	2,00	[m]	
Y	1,40	[m]	
Z	1,40	[m]	

(výpočtová síť po 0,2m)

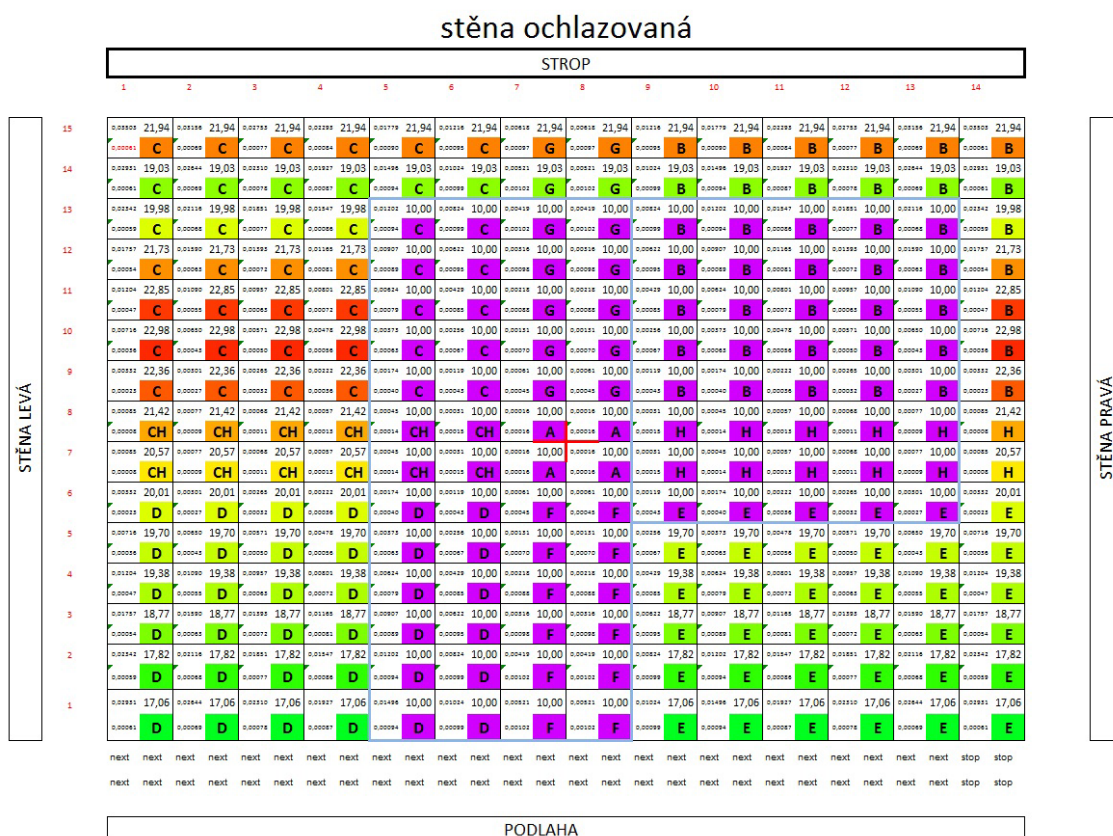


Obr. 3-5: Vlevo: zadání řešeného bodu; vpravo: globální rozměry místnosti

Pro lepší představu polohy řešeného bodu vůči konstrukci byl sestaven podprogram, který vykresluje červený kříž v místě referenčního řádku a sloupce (Obr. 3-6). Stejný podprogram vykreslí i obrysy nábytku, dveří a oken. To je vhodné pro kontrolu správného přiřazení teplot čtvercům.

stěna ochlazovaná															
STROP															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
STĚNA LEVÁ	15	0,00800 21,94 0,00861 C	0,00116 21,94 0,00068 C	0,00753 21,94 0,00077 C	0,00283 21,94 0,00064 C	0,01779 21,94 0,00090 C	0,01216 21,94 0,00085 C	0,00616 21,94 0,00097 G	0,00616 21,94 0,00097 G	0,01116 21,94 0,00086 B	0,01779 21,94 0,00080 B	0,00283 21,94 0,00064 B	0,00753 21,94 0,00077 B	0,00116 21,94 0,00068 B	0,00800 21,94 0,00061 B
	14	0,00991 19,03 0,00061 C	0,00844 19,03 0,00069 C	0,00310 19,03 0,00074 C	0,01937 19,03 0,00067 C	0,01496 19,03 0,00064 C	0,01024 19,03 0,00059 C	0,00631 19,03 0,00102 G	0,00631 19,03 0,00102 G	0,01024 19,03 0,00099 B	0,01496 19,03 0,00094 B	0,01937 19,03 0,00087 B	0,00310 19,03 0,00076 B	0,00844 19,03 0,00069 B	0,00991 19,03 0,00061 B
	13	0,00342 19,98 0,00069 C	0,00116 19,98 0,00068 C	0,01691 19,98 0,00077 C	0,0147 19,98 0,00066 C	0,01102 10,00 0,00094 C	0,00624 10,00 0,00089 C	0,00419 10,00 0,00102 G	0,00419 10,00 0,00102 G	0,00624 10,00 0,00099 B	0,01102 10,00 0,00094 B	0,0147 10,00 0,00087 B	0,01691 10,00 0,00077 B	0,00116 10,00 0,00068 B	0,00342 19,98 0,00069 B
	12	0,01767 21,73 0,00069 C	0,00390 21,73 0,00068 C	0,01392 21,73 0,00077 C	0,01184 21,73 0,00066 C	0,00907 10,00 0,00094 C	0,00622 10,00 0,00089 C	0,00316 10,00 0,00102 G	0,00316 10,00 0,00102 G	0,00622 10,00 0,00099 B	0,00907 10,00 0,00094 B	0,01184 10,00 0,00087 B	0,01392 10,00 0,00077 B	0,00390 10,00 0,00068 B	0,01767 21,73 0,00069 B
	11	0,01120 22,85 0,00047 C	0,00100 22,85 0,00055 C	0,00987 22,85 0,00063 C	0,00621 22,85 0,00072 C	0,00424 10,00 0,00079 C	0,00419 10,00 0,00085 C	0,00216 10,00 0,00086 G	0,00216 10,00 0,00086 G	0,00419 10,00 0,00079 B	0,00424 10,00 0,00072 B	0,00621 10,00 0,00063 B	0,00987 10,00 0,00077 B	0,00100 10,00 0,00055 B	0,01120 22,85 0,00047 B
	10	0,00716 22,98 0,00036 C	0,00650 22,98 0,00043 C	0,00712 22,98 0,00050 C	0,00474 22,98 0,00056 C	0,00372 10,00 0,00063 C	0,00236 10,00 0,00067 C	0,00231 10,00 0,00070 G	0,00231 10,00 0,00070 G	0,00474 10,00 0,00067 B	0,00712 10,00 0,00056 B	0,00716 10,00 0,00050 B	0,00712 10,00 0,00056 B	0,00650 10,00 0,00043 B	0,00716 22,98 0,00036 B
	9	0,00552 22,36 0,00023 C	0,00501 22,36 0,00027 C	0,00264 22,36 0,00032 C	0,00211 22,36 0,00036 C	0,00174 10,00 0,00040 C	0,00119 10,00 0,00045 C	0,00061 10,00 0,00046 G	0,00061 10,00 0,00046 G	0,00174 10,00 0,00043 B	0,00211 10,00 0,00036 B	0,00264 10,00 0,00032 B	0,00501 10,00 0,00027 B	0,00552 10,00 0,00023 B	0,00552 22,36 0,00023 B
	8	0,00068 21,42 0,00008 CH	0,00077 21,42 0,00009 CH	0,00064 21,42 0,00011 CH	0,00057 21,42 0,00013 CH	0,00045 10,00 0,00014 CH	0,00031 10,00 0,00013 CH	0,00016 10,00 0,00016 A	0,00016 10,00 0,00016 A	0,00031 10,00 0,00014 H	0,00045 10,00 0,00013 H	0,00057 10,00 0,00011 H	0,00064 10,00 0,00009 H	0,00077 10,00 0,00008 H	0,00068 21,42 0,00008 H
	7	0,00068 20,57 0,00008 CH	0,00077 20,57 0,00009 CH	0,00064 20,57 0,00011 CH	0,00057 20,57 0,00013 CH	0,00045 10,00 0,00014 CH	0,00031 10,00 0,00013 CH	0,00016 10,00 0,00016 A	0,00016 10,00 0,00016 A	0,00031 10,00 0,00014 H	0,00045 10,00 0,00013 H	0,00057 10,00 0,00011 H	0,00064 10,00 0,00009 H	0,00077 10,00 0,00008 H	0,00068 20,57 0,00008 H
	6	0,00032 20,01 0,00023 D	0,00021 20,01 0,00027 D	0,00064 20,01 0,00032 D	0,00021 20,01 0,00036 D	0,00174 10,00 0,00040 D	0,00119 10,00 0,00045 D	0,00061 10,00 0,00046 F	0,00061 10,00 0,00046 F	0,00174 10,00 0,00043 E	0,00211 10,00 0,00036 E	0,00064 10,00 0,00032 E	0,00021 10,00 0,00027 E	0,00032 10,00 0,00023 E	0,00032 20,01 0,00023 E
	5	0,00716 19,70 0,00036 D	0,00650 19,70 0,00043 D	0,00712 19,70 0,00050 D	0,00474 19,70 0,00056 D	0,00372 10,00 0,00063 D	0,00236 10,00 0,00067 D	0,00231 10,00 0,00070 F	0,00231 10,00 0,00070 F	0,00474 10,00 0,00067 E	0,00712 10,00 0,00056 E	0,00716 10,00 0,00050 E	0,00712 10,00 0,00056 E	0,00650 10,00 0,00043 E	0,00716 19,70 0,00036 E
	4	0,01120 19,38 0,00047 D	0,01090 19,38 0,00053 D	0,00937 19,38 0,00063 D	0,00801 19,38 0,00072 D	0,00624 10,00 0,00079 D	0,00419 10,00 0,00085 D	0,00216 10,00 0,00088 F	0,00216 10,00 0,00088 F	0,00419 10,00 0,00085 E	0,00624 10,00 0,00079 E	0,00801 19,38 0,00072 E	0,00937 19,38 0,00063 E	0,01090 19,38 0,00053 E	0,01120 19,38 0,00047 E
	3	0,01767 18,77 0,00054 D	0,01390 18,77 0,00063 D	0,01192 18,77 0,00072 D	0,01184 18,77 0,00081 D	0,00907 10,00 0,00083 D	0,00622 10,00 0,00085 D	0,00316 10,00 0,00086 F	0,00316 10,00 0,00086 F	0,00622 10,00 0,00085 E	0,00907 10,00 0,00083 E	0,01184 18,77 0,00081 E	0,01192 18,77 0,00072 E	0,01390 18,77 0,00063 E	0,01767 18,77 0,00054 E
	2	0,02342 17,82 0,00059 D	0,02116 17,82 0,00068 D	0,01691 17,82 0,00077 D	0,0147 17,82 0,00086 D	0,01102 10,00 0,00094 D	0,00624 10,00 0,00089 D	0,00419 10,00 0,00102 F	0,00419 10,00 0,00102 F	0,00624 17,82 0,00094 E	0,01102 17,82 0,00086 E	0,0147 17,82 0,00086 E	0,01691 17,82 0,00077 E	0,02116 17,82 0,00068 E	0,02342 17,82 0,00059 E
	1	0,01801 17,06 0,00061 D	0,02644 17,06 0,00069 D	0,02310 17,06 0,00074 D	0,01927 17,06 0,00087 D	0,01496 10,00 0,00094 D	0,01024 10,00 0,00089 D	0,00631 10,00 0,00102 F	0,00631 10,00 0,00102 F	0,01024 17,06 0,00094 E	0,01496 17,06 0,00087 E	0,01927 17,06 0,00086 E	0,02310 17,06 0,00074 E	0,02644 17,06 0,00069 E	0,01801 17,06 0,00061 E
next next next next next next next next next next next next next next next next stop stop															
PODLAHA															
STĚNA PRAVÁ															

Obr. 3-6: Obrys balkónového okna s dveřmi a referenční kříž



Obr. 3-7: Přirázování barvy podle teploty čtverce

Teploty konstrukcí, které byly naměřeny infrateploměrem a termokamerou byly zapsány do tabulek podle směru ve kterém docházelo ke gradientu teplot. Podprogram „MNC“ sestaví aproximační polynomy šestého stupně pro aproximaci teploty v závislosti na poloze na konstrukci (Obr. 3-8). Další podprogram zajistí správné přiřazení teplot jednotlivým čtvercům (Obr. 3-7). Pro kontrolu jsou k teplotám přiřazovány i barvy z vygenerované RGB škály (Obr. 3-9).

```
-2,1 48,6 -82 55,73 -17 1,9577402 17,81  
-1,3 33,6 -56,8 39,1 -12,08421 1,395  
-4,5 16,87 -16 7,2455557 -1,8 0,193 19,276  
-0,92 27,6 -45,97602 31,95 -10,1 1,1951 20,55  
-4,7 38,172556 -66,63 51,42 -17,94 2,294 17,21  
-1,427697 6,662 -4,692 0,6549 0,338 -0,08 22,17  
0 0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 0 0 0  
#####  
#####  
#####  
#####  
#####  
#####
```

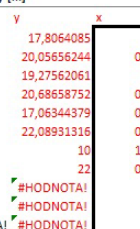
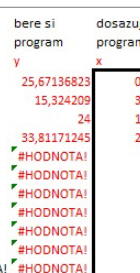
[illegible]

Diagram illustrating a sequence of steps (1 to 16) with associated numerical values and a 'stop' label.

Step	Value	Stop
1	-1,5	stop
2	0,34	stop
3	0,1	stop
4	-0,48	stop
5	0,28	stop
6	-0,048113	stop
7	31,6	stop
8		stop
9		stop
10		stop
11		stop
12		stop
13		stop
14		stop
15		stop
16		stop



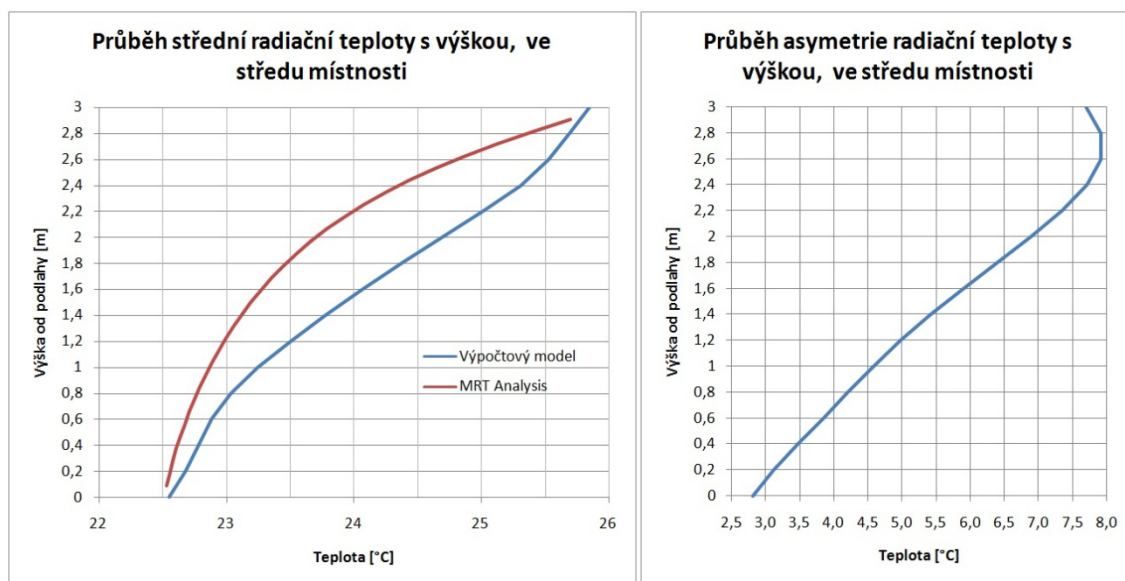
79

Konečným krokem, který je nutný pro výpočet střední radiační teploty, je součin poměru osálení řešeného čtverce a čtvrté mocniny jeho termodynamické teploty. Suma toho součinu se provede přes výpočtovou síť všech konstrukcí. Výsledek pak stačí odmocnit a převést na stupně Celsia. Při součtu program rozlišuje, jestli se řešený čtverec vyskytuje nad nebo pod referenčním bodem. Výsledkem jsou dvě radiační teploty a jejich rozdíl se nazývá asymetrie radiační teploty.

$$t_r = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n (\varphi_{ir} * T_i^4) - 273,15} \quad (3.3)$$

Tab. 3-1: Výpočet střední radiační teploty (účinné teploty)

$t_r = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n (\varphi_{ir} * T_i^4) - 273,15}$	mezi	výsledky	rozdíl
	nad	pod	
suma $(\varphi^*(t_k)^4)$	8,2E+09	7,6E+09	$\Delta t_{pr} =$
t_r	27,37	22,46	4,91 °C
t_r celkem	24,94 °C		všchny_ucina_teplota
suma F_i	1	1	
suma φ celkem	2,0000		všchny_suma_fi



Graf 3-1: Průběh střední radiační teploty

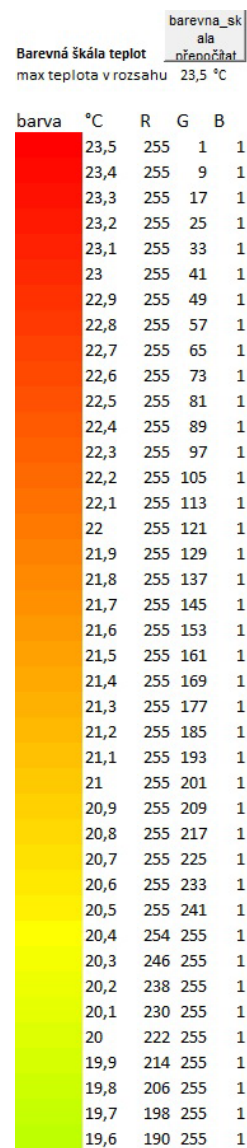
Z výsledků výpočtového modelu byly sestaveny předešlé grafy střední radiační teploty a radiační asymetrie. Pro srovnání je uveden průběh střední radiační teploty z programu MRT Analysis. Rozdílný průběh obou křivek se dá očekávat, protože vstupními údaji pro MRT Analysis jsou pouze střední teploty konstrukcí.

Další poprogram výpočtového modelu řeší střední teploty konstrukcí (Tab. 3-2). Ty ve výpočtech nejsou dále využity. Slouží pouze pro srovnání se střední radiační teplotou.

Tab. 3-2: Výpočet střední teploty povrchu

Str. tepl. konstr	Stř. teplota konstrukcí T_{pr} [°C]		
	nad	pod	celkem
stena leva	27,28	24,36	25,92
počet	160,00	140,00	
stena prava	26,44	23,19	24,93
počet	160,00	140,00	
SO	15,81	15,41	15,62
počet	112,00	98,00	
stena chodba	22,66	22,58	22,62
počet	112,00	98,00	
strop	28,75		28,75
počet	280,00		
podlaha		21,89	21,89
počet		280,00	
výsedná	25,43	21,84	
výsledná	23,71		

Střední radiační teplota měřená ve středu místnosti nabývá vyšších hodnot než střední teplota konstrukcí. Důvodem je absence poměru osálení, který snižuje vliv teploty vzdálených a často chladných konstrukcí.



Obr. 3-9: Část RGB škály teplot

3.3 Vytvoření vztahu pro výpočet přestupu tepla sáláním

Při analýze naměřených tepelných toků z otopného stropu jsem narazil na problém jak vypočítat součinitel přestupu tepla. Pro součinitel přestupu tepla konvekcí existuje mnoho vztahů v závislosti na teplotě a poloze otopné plochy. V případě stropní otopné plochy připadají v úvahu především vztahy (rov 3.4 a 3.5).

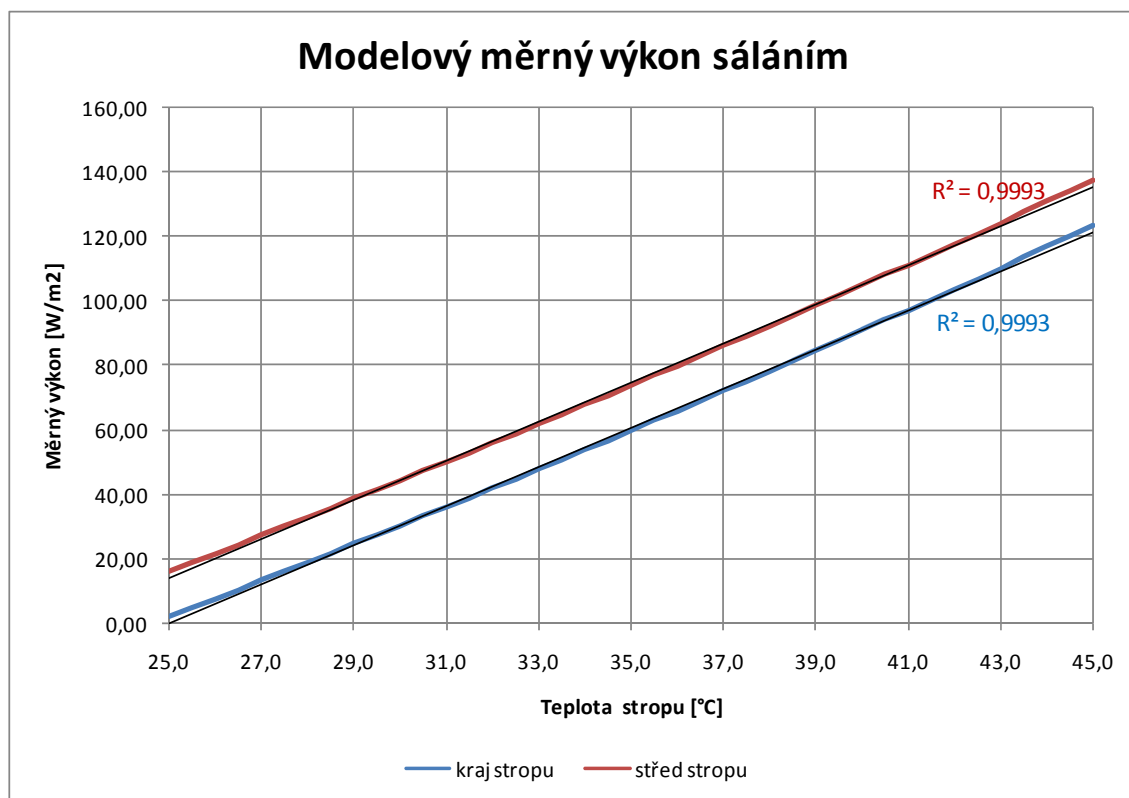
$$\alpha_k = 1,95 \quad \text{Wilkes, Peterson} \quad (3.4)$$

$$\alpha_k = 0,145 \sqrt[4]{\Delta t \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)} \quad \text{ASHVE} \quad (3.5)$$

Pro součinitel přestupu tepla sáláním ale žádné vztahy neexistují. K dispozici jsou pouze tabulkové hodnoty pro různé teploty otopné plochy. Měrný tepelný tok sdílením sálání vychází ze Stefan-Boltzmanova zákona (rov. 3.6). Emisivita obou povrchů je zahrnuta v koeficientu ε_n .

$$\dot{q} = \sigma_B \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j \cdot \sum (\varphi_{ij} \cdot (T_i^4 - T_j^4)) \quad (3.6)$$

Po drobné úpravě podprogramů pro výpočet střední radiační teploty je program schopen vypočítat sálavý výkon otopné plochy při různých teplotách povrchu.



Graf 3-2: Sálavý otopný výkon stropu

Protože výpočtový model umožňuje vypočítat střední radiační teplotu zvláště pro poloprostor nad i pod referenčním bodem, jsme schopni říci, jaká je účinná teplota povrchů se kterými otopný strop sdílí teplo. Posledním krokem je dosažení do rovnice (rov.3.7) a vypočítat součinitel přestupu tepla sáláním pro rozdíl teploty povrchu a střední radiační teploty (účinné teploty).

$$q_s = \alpha_s \cdot (t_p - t_r) \quad (3.7)$$

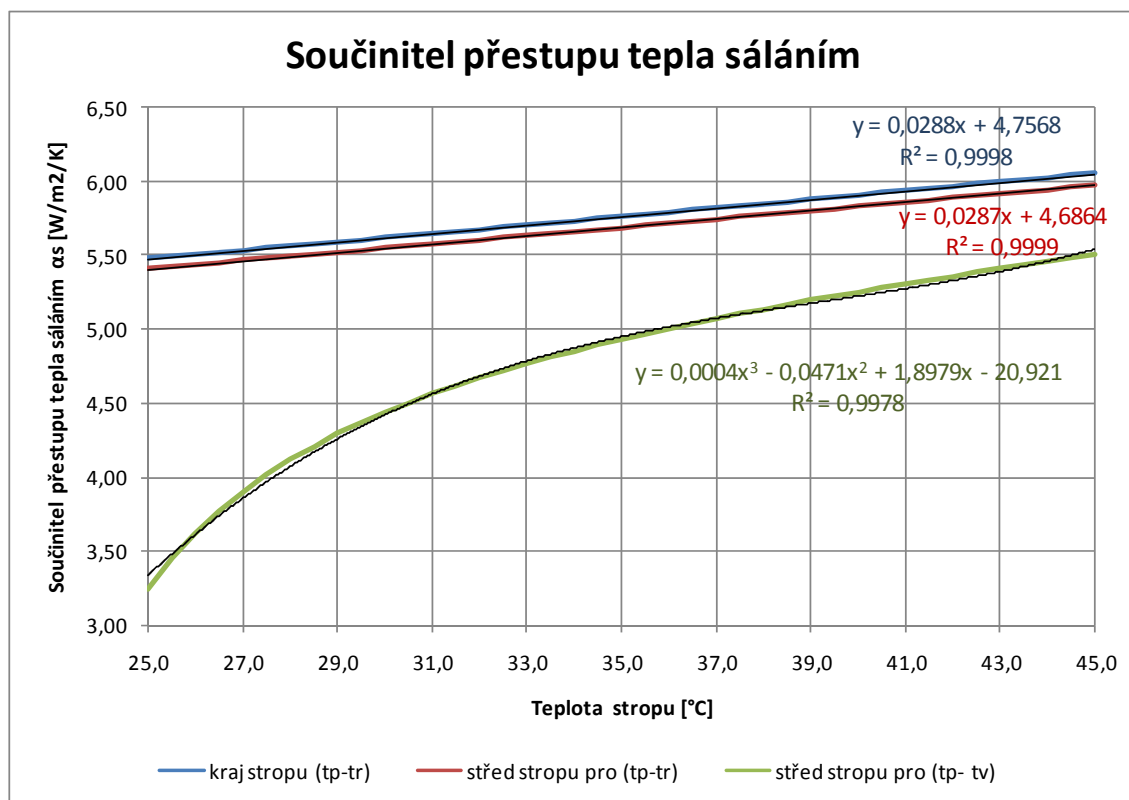
Celkový tepelný tok sdílený sáláním i konvekcí lze napsat ve tvaru:

$$q = \alpha_k \cdot (t_p - t_v) + \alpha_s \cdot (t_p - t_r) \quad (3.8)$$

V technické praxi se ovšem často setkáváme se zjednodušením zanedbávajícím střední radiační teplotu. Oba součinitele přestupu tepla jsou pak nahrazeny jedním (rov. 3.9).

$$q = \alpha_k \cdot (t_p - t_v) + \alpha_s \cdot (t_p - t_r) = \alpha \cdot (t_p - t_v) \quad (3.9)$$

S tímto jednotným součinitelem přestupu tepla se setkáváme nejčastěji, přestože, jak je z následujícího grafu vidět, není přesný.



Graf 3-3: Závislost součinitele α_s na teplotě povrchu

Z grafu 3-3 vyplývá, že součinitel přestupu tepla založený na rozdílu teploty otopné plochy a střední radiační teploty okolních ploch se dá s vysokou přesností linearizovat. Lineární průběh funkce mě zpočátku překvapil, protože tepelný tok je závislý na rozdílu čtvrtých mocnin teplot. Ale protože i účinná teplota je závislá na součtu čtvrtých mocnin teplot, zdá se být tento lineární průběh opodstatnitelný. Druhá křivka grafu znázorňuje průběh funkce součinitele přestupu tepla sáláním při rozdílu teploty otopné plochy a teploty vzduchu. Funkce má nelineární průběh a nabývá nižších hodnot. Tímto se vysvětluje celkově nižší hodnota součinitele přestupu tepla sáláním uváděná v technické literatuře. Pro srovnání uvádím tabulku 3-4.

Výkony a potažmo i vztahy pro součinitele přestupu tepla sáláním vychází přímo ze zákona sálání. Otopná plocha nemůže za stejných podmínek sdílet více tepla sáláním, než kolik vyjde z odvozených vztahů (rov 3.10 a 3.11). Proto je vhodné

sestavit graf (graf 3-4), ve kterém je tepelný tok sdílený sáláním pevně daný odvezenými vztahy a součinitel přestupu tepla konvekcí se dopočítává do naměřených hodnot tepelných toků. Graf je platný za předpokladu, že účinná teplota osálaných konstrukcí se nemění s teplotou stropu. Největším zdrojem nepřesností jsou chyby měřicího přístroje a skutečnost, že prostředí není stoprocentně průteplivé. Nutno podotknout, že výsledný součinitel přestupu, který byl použit pro srovnání s naměřenými hodnotami, byl o cca 23% nižší. Ve výpočtech jsem musel započítat emisivitu destičky pro měření tepelného toku, která je nižší než emisivita omítnutého stropu. Vztahy (rov 3.10 a 3.11) jsou platné pro emisivitu destičky $\varepsilon=0,75$ a emisivitu okolních ploch $\varepsilon=0,9$. Ostatní uvedené vztahy a grafy závislostí, které neslouží pro srovnání s naměřenými hodnotami, platí pro reálný omítnutý strop bez měřidla, tzn. emisivita stropu $\varepsilon=0,93$ a emisivita okolí $\varepsilon=0,9$.

Pro měřený strop:

$$\alpha_s = 0,0232t_p + 3,7925 \quad \text{pro:} \quad q_s = \alpha_s \cdot (t_p - t_r) \quad (3.10)$$

$$\alpha_s = -2 \cdot 10^{-5}t_p^4 + 0,0038t_p^3 - 0,22t_p^2 + 5,65t_p - 51,58$$

$$\text{pro:} \quad q_s = \alpha_s \cdot (t_p - t_v) \quad (3.11)$$

Pro reálný strop:

$$\alpha_s = 0,0287t_p + 4,6864 \quad \text{pro:} \quad q_s = \alpha_s \cdot (t_p - t_r) \quad (3.12)$$

$$\alpha_s = 0,0004t_p^3 - 0,047t_p^2 + 1,8979t_p - 20,921$$

$$\text{pro:} \quad q_s = \alpha_s \cdot (t_p - t_v) \quad (3.13)$$

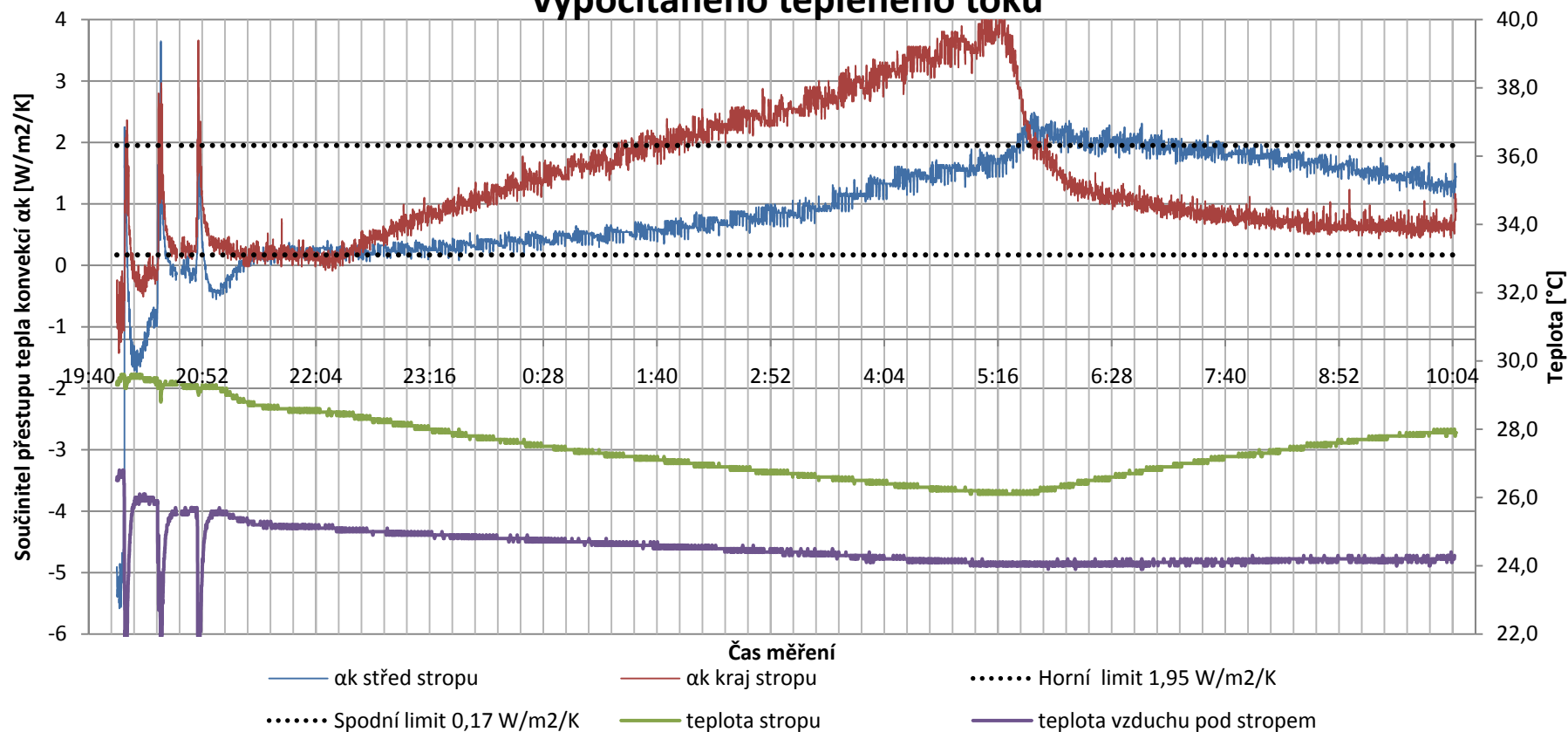
Legenda značek poměných v této kapitole:

- α_s - součinitel přestupu tepla sáláním [W/m²/K]
- α_k - součinitel přestupu tepla konvekcí [W/m²/K]
- α - celkový součinitel přestupu tepla [W/m²/K]
- t_p - teplota otopné plochy [°C]
- t_v - teplota vzduchu [°C]
- q_s - tepelný tok sdílený sáláním [W/m²]
- q_k - tepelný tok sdílený konvekcí [W/m²]
- q - celkový tepelný tok [W/m²]

Tab. 3-3: Porovnání modelu s hodnotami v technické literatuře

		Povrchová teplota [°C]					poznámka
		25	30	35	40	45	
Výsledky z modelu	α_s	3,24	4,44	5,00	5,25	5,55	Pro tv=20°C tr=22°C
	α_k	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
	$\alpha_s + \alpha_k$	5,24	6,44	7,00	7,25	7,55	
	q_s	16,2	44,4	73,9	105	137,6	
	$q_s + q_k$	26,2	64,4	103,9	145	187,6	
J. Cihleka Sálavé vytápění	α_s	-	4,80	4,90	5,00	5,10	Tabulka pro tv=18°C tr=18°C
	α_k	-	2,00	2,00	2,00	2,00	
	$\alpha_s + \alpha_k$	-	6,80	6,90	7,00	7,10	
	q_s	-	48	73,5	100	127,5	
	$q_s + q_k$	-	81,6	117,3	154	188,7	
J. Cihleka Sálavé vytápění	α_s	-	-	-	-	-	z návrhovéh. grafu
	α_k	-	-	-	-	-	
	$\alpha_s + \alpha_k$	-	-	-	-	-	
	q_s	-	-	-	-	-	
	$q_s + q_k$	50	75	120	155	180	
Topenářská příručka	α_s	-	-	-	-	-	Pro tv= - °C tr= - °C
	α_k	-	-	-	-	-	
	$\alpha_s + \alpha_k$	-	-	7,40	7,50	7,70	
	q_s	-	-	-	-	-	
	$q_s + q_k$	-	-	126	165	208	

Součinitel přestupu tepla konvekcí vycházející z rozdílu naměřeného a vypočítaného tepelného toku



Graf 3-4: Velikost součinitele přestupu tepla konvekcí v průběhu měření

3.4 Tepelná bilance místnosti se sálavým vytápěním^{7,8}

Sálavé vytápění se liší od vytápění konvekčního nejen způsobem sdílení tepla z povrchu otopné plochy do vytápěného prostoru, ale také způsobem, jímž je dosaženo tepelné pohody člověka. Při konvekčním způsobu vytápění ohřívají otopná tělesa umístěná uvnitř prostoru vnitřní vzduch, který potom předává teplo ochlazeným stěnám omezujícím vytápěný prostor. Teplota vzduchu je tedy vyšší než (střední) teplota povrchu stěn. Teplo sdílené mezi otopným tělesem a vnitřním vzduchem se rovná součtu tepla odváděného ochlazením stěn a tepla odváděného větracím vzduchem. Rozdíl teplot ochlazených stěn a vzduchu je závislý na izolačních schopnostech stěn. U stěn s dostatečně velkou izolační schopností je rozdíl mezi teplotou vzduchu a střední teplotou stěn i při nízkých venkovních teplotách velmi malý, nejvýše 2 °C.

U sálavého vytápění sdílí otopná plocha, která je v tomto případě jednou z ploch omezujících vytápěný prostor, jen menší část svého tepla konvekcí vnitřnímu vzduchu. Větší část tepla přechází sáláním přímo, tj. bez prostřednictví vzduchu, na ostatní nevytápěné plochy prostoru. Střední teplota ploch omezujících vytápěný prostor je u sálavého vytápění obvykle vyšší než teplota vzduchu. Poměr obou teplot musí odpovídat podmínce tepelné rovnováhy prostoru. Pokud jsou dobré izolační schopnosti stěn a výměna vzduchu větráním je malá, je i rozdíl mezi střední teplotou stěn a teplotou vnitřního vzduchu zanedbatelný. V takových případech se tepelný výkon sálavé otopné plochy může vypočítat obdobným způsobem jako u konvekčních otopných těles. Stačí znát teplotu vzduchu v místnosti, teplotu otopné plochy a její rozměry. Při intenzivní výměně vzduchu ale může dosáhnout rozdíl mezi střední teplotou okolních ploch a teplotou vzduchu významných hodnot, které se projeví tepelnou nepohodou člověka.

Metoda výpočtu sálavého vytápění vychází ze tří základních rovnic tepelné rovnováhy:

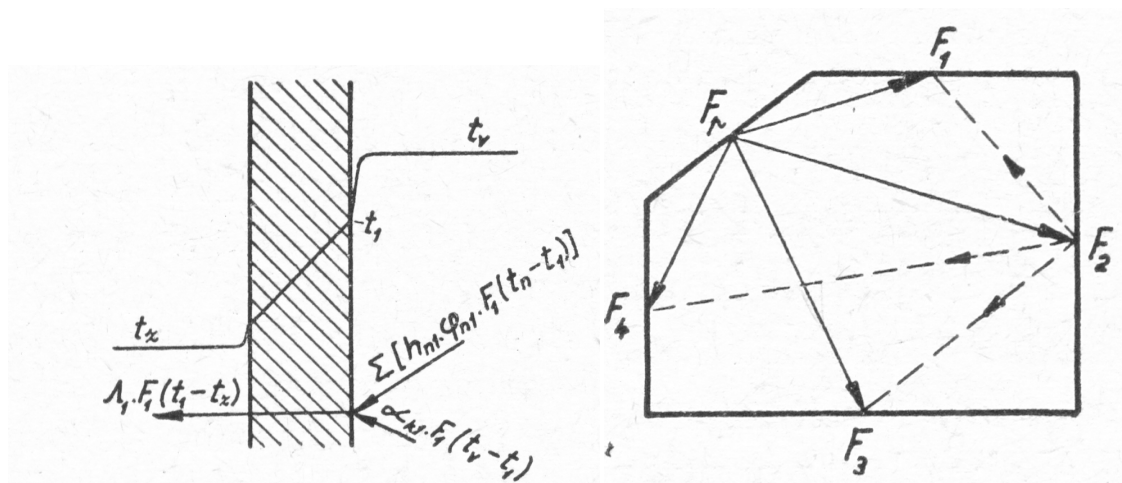
- a) rovnice rovnováhy nevytápěných stěn
- b) rovnice tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu
- c) rovnice tepelné pohody člověka

⁷ Vztahy a teorie uvedené v této kapitole jsou založeny na publikaci J.Cihelky [4]

⁸ V menším rozsahu byl výpočtový model popsán ve SVOČ práci L. Carbola

3.4.1 Tepelná rovnováha ochlazovaných stěn

Pro výpočet střední radiační teploty je nutné znát střední teplotu jednotlivých konstrukcí (stěn, podlahy a stropu) omezujících vytápěný prostor. Teplota vnitřního povrchu ochlazovaných stěn vyplývá z tepelné rovnováhy stěny (obr. 3.10). Teplo sdílené na vnitřním povrchu stěny sáláním a konvekcí je stejné jako teplo odváděné stěnou do vnějšího prostředí, to je rovnice tepelné rovnováhy nevytápěné konstrukce (rov. 3.54).



Obr. 3-10: Vlevo: tepelná rovnováha ochlazované stěny, vpravo: sdílení tepla sáláním v prostoru [4]

$$\alpha_{K,1} \cdot F_1 \cdot (t_v - t_1) + \sum [\varphi_{n1} \cdot \alpha_{S,n1} + F_1 \cdot (t_n - t_1)] = \Lambda_1 \cdot F_1 \cdot (t_1 - t_e) \quad (3.14)$$

Kde:

t_v – průměrná teplota vnitřního vzduchu

t_e – průměrná teplota venkovního vzduchu

t_1 – střední radiační teplota počítané konstrukce 1

t_n – střední radiační teplota osálaných konstrukcí 2 až n

F_1 – plocha počítané konstrukce 1

$\alpha_{K,1}$ – součinitel přestupu tepla konvekcí pro konstrukci 1

φ_{n1} – poměr osálení konstrukce 1 a n

$\alpha_{S,n1}$ – částečný součinitel přestupu tepla sáláním

Λ_1 – součinitel tepelné propustnosti

$$\Lambda_1 = \frac{1}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{\alpha_i \times U}{\alpha_i - U}$$

U – součinitel prostupu tepla

α_e - součinitel přestupu tepla na venkovní straně konstrukce

α_i - součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce

Rovnice tepelné rovnováhy lze psát pro všechny ostatní ochlazované konstrukce $F_2, F_3, \dots, F_n$, čímž dostaneme soustavu n lineárních rovnic. Kromě teplot konstrukcí $t_1, t_2, \dots, t_n$ je v těchto rovnicích ještě další neznámá veličina, a to teplota vnitřního vzduchu t_v .

3.4.2 Tepelná rovnováha vnitřního vzduchu

V prostoru omezeném stěnami se odehrává výměna tepla sáláním mezi jednotlivými konstrukcemi, ale také dochází ke sdílení tepla konvekcí na povrchu stěn. Teplota vnitřního vzduchu vyplývá z tepelné rovnováhy vyjádřené rovnicí rovnováhy vnitřního a větracího vzduchu (rov. 3.55). Čím větší je výměna vzduchu větráním G [kg/hod], tím větší je rozdíl mezi teplotou vzduchu a průměrnou teplotou stěn.

$$0,24 \cdot G \cdot (t_v - t_e) = \sum (\alpha_{kn} \cdot F_n \cdot (t_n - t_v)) + \alpha_{kp} \cdot F_p \cdot (t_p - t_v) \quad (3.15)$$

Kde:

G [kg/h] – množství větracího vzduchu

t_p – střední radiační teplota otopné plochy

F_p – plocha otopné plochy

3.4.3 Tepelná pohoda člověka

Aby bylo dosaženo tepelné pohody člověka, musí se t_p počítat spolu s ostatními neznámými teplotami stěn $t_1, t_2, \dots, t_n$ a teplotou vzduchu t_v . K rovnicím vyjadřujícím tepelnou rovnováhu prostoru je proto nutno připojit rovnici tepelné pohody člověka (rov. 3.58).

$$t_v + t_u = a \quad (3.16)$$

$$t_v + \varphi_{pR} \cdot t_p + \sum(\varphi_{nR} \cdot t_n) = a \quad (3.17)$$

Kde:

t_u – střední radiační teplota všech sálajících povrchů

a – koeficient tepelné pohody člověka podle typu činnosti a oblečení

Střední radiační teplota se obvykle vztahuje k bodu uprostřed vytápěného prostoru ve výšce 1,7 m nad podlahou. Ze soustavy $(n + 2)$ lineárních rovnic [n rovnic typu (3.54) a rovnice (3.55) a (3.57)] lze řešit sálavé vytápění, tj. stanovit teplotu sálavé otopné plochy t_p tak, aby bylo dosaženo tepelné pohody člověka. Současně se vypočítají i střední teploty všech ostatních stěn omezující prostor.

3.4.4 Tepelná ztráta místnosti a výkon otopné plochy

Z vypočítaných teplot ochlazovaných konstrukcí můžeme spočítat tepelnou ztrátu místnosti prostupem. Ztráta větráním se spočítá ze zadaného množství větracího vzduchu a vypočítané teploty vnitřního vzduchu. Výsledná tepelná ztráta je tedy rovna:

$$Q_{ztr} = \sum[\Lambda_n \cdot F_n \cdot (t_n - t_e)] + 0,24 \cdot G \cdot (t_v - t_e) \quad (3.18)$$

Uvedené rovnice platí pro ustálený stav a známé hodnoty součinitele přestupu konvekcí a sáláním. Oba součinitele jsou určeny především experimentálně a mění se s rozdílem teplot otopné plochy a vzduchu.

Nejpřesněji se tepelný výkon otopné plochy vypočítá podle rovnice 3.60.

$$Q = \alpha \cdot S_p \cdot (t_p - t_i) = q \cdot S_p \quad (3.19)$$

$$Q = \alpha_K \cdot S_p \cdot (t_p - t_i) + \sum \alpha_{s,pn} \cdot S_p \cdot (t_p - t_n) \quad (3.20)$$

3.4.5 Zjednodušený způsob vyjádření tepelné rovnováhy prostoru

Při větším počtu nevytápěných stěn je naznačený výpočet obtížný a zdlouhavý (zejména určení poměrů osálení pro sdílení tepla mezi jednotlivými plochami). Postup se může značně ulehčit nahrazením všech neochlazovaných stěn stěnou jednou. Toto je možné za předpokladu malých rozdílů teplot neochlazovaných stěn. Na druhou stranu se tímto zjednodušením naopak zkomplikuje výpočet poměrů osálení, protože vzniknou zalamované konstrukce. Často se zavádí druhé zjednodušení, a to použití střední teploty stěn, kterým se vyloučí z rovnic poměry osálení. Výsledná rovnice má tvar soustavy třech rovnic o třech neznámých na místo devíti rovnic o devíti neznámých. Můj výpočtový program žádné z těchto zjednodušení nevyužívá.

3.5 Výpočtový model pro návrh teploty stropní otopné plochy

Program je založený na třech rovnicích tepelné rovnováhy podle J. Cihelky. Původní rovnice pro ochlazované stěny zůstaly beze změny. Tyto rovnice jsou v programu použity pro všechny konstrukce, kromě otopné části stropu. Pokud se jedná o neochlazovanou konstrukci, pak je vnitřní teplota konstrukce vypočtená programem dosazena i na druhou stranu konstrukce. Vzniklá adiabatická stěna má nulový rozdíl teplot a nedochází u ní k žádné ztrátě prostupem. Z Tab. 3-9 (levý sloupec) je vidět, že tepelná ztráta všech konstrukcí kromě okna a vnější stěny je nulová. Pro otopnou část stropu se rovnice tepelné rovnováhy nevyužije. Tepelný tok z topného hada směrem nahoru totiž nemá vliv na povrchovou teplotu konstrukce uvnitř sledované místnosti. Je to takzvaný ztrátový výkon, který se zohledňuje při návrhu teplotního spádu pro otopnou plochu.

Rovnice tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu (rov 3.55) musela být upravena kvůli dnes už nepoužívané jednotce výkonu kcal/hod. Upravená rovnice (rov. 3.61) je ve watttech.

$$0,34 \cdot G \cdot (t_v - t_e) = \sum(\alpha_{kn} \cdot F_n \cdot (t_n - t_v)) + \alpha_{kp} \cdot F_p \cdot (t_p - t_v) \quad (3.21)$$

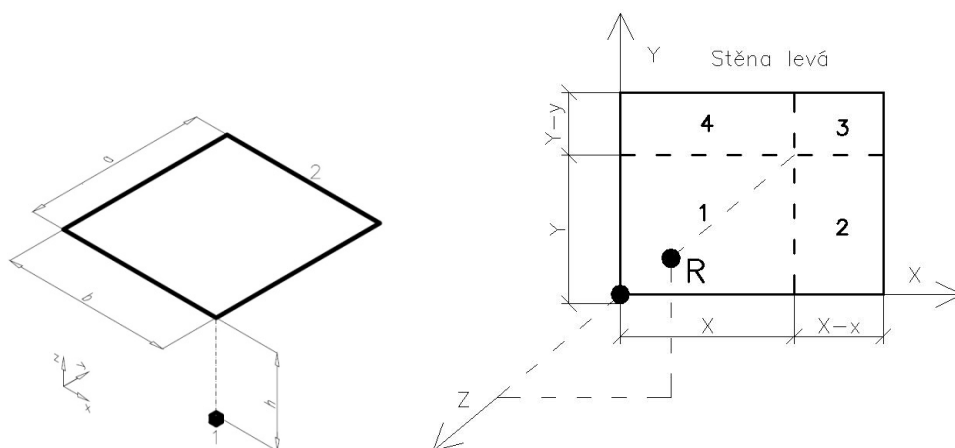
Ideální poměr mezi střední radiační teplotou a teplotou vzduchu podle J. Cihelky určuje rovnice tepelné pohody, nebo spíše koeficient tepelné pohody člověka. Dnes je ale legislativou dáno kritérium operativní teploty, která podle třídy práce určuje ideální poměr obou teplot. Operativní teplota je závislá z velké míry i na rychlosti proudění vzduchu, což se projeví především při nucené ventilaci. Aby byl program univerzální, byl zvolen vztah pro výpočet operativní teploty pro známou rychlost proudění vzduchu (rov 3.62).

$$t_o = \frac{t_a \cdot \sqrt{10 \cdot v_a + t_r}}{1 + \sqrt{10 \cdot v_a}} \quad (3.22)$$

Vstupními údaji programu je jednak geometrie řešené místnosti, včetně plochy okna a otopné plochy, poloha referenčního bodu (pro výpočet operativní teploty) a tepelně-technické vlastnosti konstrukcí obklopujících řešenou místnost. Pokud se jedná o ochlazovanou konstrukci, musí být zadána i teplota na druhé straně konstrukce. Výpočtový model je platný pro místnost obdélníkového půdorysu s oknem pouze

v jedné stěně. Přidání okna do další konstrukce by znamenalo další rovnici tepelné rovnováhy ochlazované konstrukce.

Program tepelné bilance je založený na S2S modelu výpočtu sálání. Prostředí se považuje za dokonale průteplivé a intenzita sdílení tepla sáláním je dána poměrem osálání. Pro výpočet střední radiační teploty se nejčastěji používá poměru osálání mezi sálajícím bodem a konstrukcí (rov 3.63). Sledovaný bod R se nachází v prostoru, a tak se jeho průmět do sálající konstrukce nemusí nutně promítnout do rohu, jak je tomu na obrázku 3-11 vlevo. V tom případě se využije adiční pravidlo pro výpočet celkového poměru osálání. Pro konstrukce, které se skládají z více částí (okno ve vnější stěně a neotopná část stropu), se poměr osálání počítá poměrným dílem k jejich ploše (tab.3-4).



Obr. 3-11: Výpočet poměru osálání k bodu R

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \arctg \frac{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}{a \cdot b} \quad (3.23)$$

Tab. 3-4: Výpočet poměru osálání k bodu R

	Celkem	1	2	3	4
$\Phi_{r,p}$	0,1727	0,0402	0,0416	0,0462	0,0446
$\Phi_{r,sl}$	0,2047	0,0545	0,0595	0,0472	0,0435
$\Phi_{r,sp}$	0,1951	0,0520	0,0570	0,0449	0,0412
$\Phi_{r,ch}$	0,1087	0,0303	0,0314	0,0239	0,0231
$\Phi_{r,sv}$	0,0354	0,0209	0,0218	0,0160	0,0154
$\Phi_{r,o}$	0,0386				
$\Phi_{r,ns}$	0,0859				
$\Phi_{r,ts}$	0,1590	0,0584	0,0599	0,0641	0,0625
Σ	1				

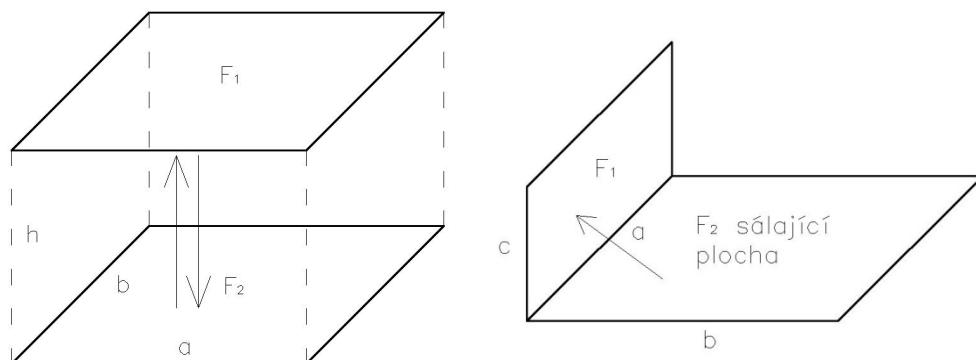
Další poměr osálání, který se v programu automaticky vypočítává, je pro dvě obdélníkové plochy. Tímto součinitelem se stanoví množství tepla, které je sdíleno mezi sálající konstrukcí a jednotlivými osálanými konstrukcemi. Pro výpočet existují dva vztahy závislé na vzájemné poloze (rov 3.64 a 3.65).

$$\varphi_{12} = \frac{2}{a \cdot b \cdot \pi} \cdot \left[b \cdot \sqrt{a^2 + h^2} \cdot \arctg\left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}}\right) + a \cdot \sqrt{b^2 + h^2} \cdot \arctg\left(\frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}}\right) - b \cdot h \cdot \arctg\left(\frac{b}{h}\right) - a \cdot h \cdot \arctg\left(\frac{a}{h}\right) - \frac{h^2}{2} \cdot \ln\left(\frac{(a^2 + b^2 + h^2) \cdot h^2}{(a^2 + h^2) \cdot (b^2 + h^2)}\right) \right]$$

pro dvě stejně velké rovnoběžné desky (3.24)

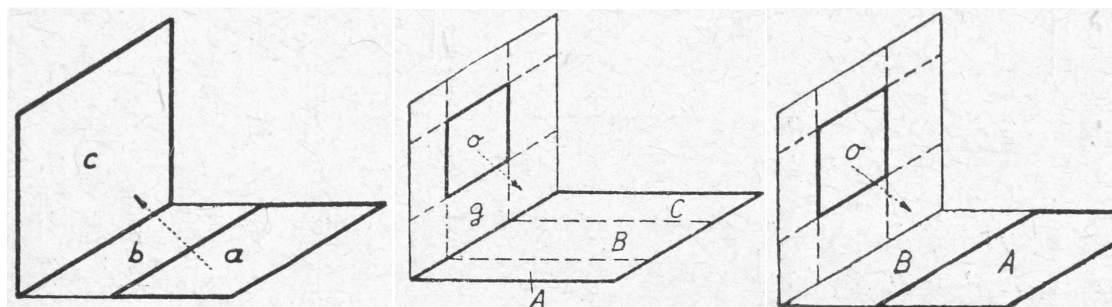
$$\varphi_{12} = \frac{1}{a \cdot b \cdot \pi} \cdot \left[a \cdot b \cdot \arctg\left(\frac{a}{b}\right) - a \cdot \sqrt{b^2 + c^2} \cdot \arctg\left(\frac{a}{\sqrt{b^2 + c^2}}\right) + a \cdot c \cdot \arctg\left(\frac{a}{c}\right) + \frac{b^2}{4} \cdot \ln\left(\frac{(a^2 + b^2 + c^2) \cdot b^2}{(a^2 + b^2) \cdot (b^2 + c^2)}\right) + \frac{c^2}{4} \cdot \ln\left(\frac{(a^2 + b^2 + c^2) \cdot c^2}{(a^2 + c^2) \cdot (b^2 + c^2)}\right) - \frac{a^2}{4} \cdot \ln\left(\frac{(a^2 + b^2 + c^2) \cdot a^2}{(a^2 + b^2) \cdot (a^2 + c^2)}\right) \right]$$

pro dvě sousedící kolmé desky (3.25)



Obr. 3-12: Vzájemná poloha desek pro vztah (3.64) vlevo a pro vztah (3.65) vpravo

Nutné je navíc rozlišit sálající a osálanou plochu. Adiční, substrakční i pravidlo reciprocit je platné stejně jako u sálající elementární plochy, či u sálajícího bodu. Jelikož mají plochy nenulové rozměry, musí se počítané poměry osálení navíc násobit plochami. Algoritmus, který by dokázal využít adiční a substrakční pravidla, stejně jako v modelu pro výpočet poměru osálení, by byl opravdu velmi složitý (obr 3-13).



Obr. 3-13: Naznačení exaktního výpočtu poměru osálení složení konstrukce

Proto je poměr osálení složených konstrukcí (okno ve stěně a netopný strop ve stropě) vypočítán z poměru ploch. Pro kontrolu správnosti určení poměru osálení slouží suma všech poměrů osálení pro každou z konstrukcí, která musí být rovna 1 (tab. 3-5). V případě složených konstrukcí, u kterých se poměry osálení rozpočítávají podle ploch, se součet 1 nerovná. Proto se dílčí poměry osálení vynásobí obrácenou hodnotou součtu jejich poměrů osálení.

Tab. 3-5: Výpočet poměru osálení k bodu R

	PDL		SL		SP		CH		SV		O		NS		TS
$\Phi_{p,p}$	0	$\Phi_{sl,p}$	0,2305	$\Phi_{sp,p}$	0,2305	$\Phi_{ch,p}$	0,2262	$\Phi_{sv,p}$	0,2262	$\Phi_{o,p}$	0,2262	$\Phi_{ns,p}$	0,2628	$\Phi_{ts,p}$	0,2628
$\Phi_{p,sl}$	0,2285	$\Phi_{sl,sl}$	0,0000	$\Phi_{sp,sl}$	0,2586	$\Phi_{ch,sl}$	0,2243	$\Phi_{sv,sl}$	0,2243	$\Phi_{o,sl}$	0,2243	$\Phi_{ns,sl}$	0,2285	$\Phi_{ts,sl}$	0,2285
$\Phi_{p,sp}$	0,2285	$\Phi_{sl,sp}$	0,2586	$\Phi_{sp,sp}$	0	$\Phi_{ch,sp}$	0,2243	$\Phi_{sv,sp}$	0,2243	$\Phi_{o,sp}$	0,2243	$\Phi_{ns,sp}$	0,2285	$\Phi_{ts,sp}$	0,2285
$\Phi_{p,ch}$	0,1401	$\Phi_{sl,ch}$	0,1402	$\Phi_{sp,ch}$	0,1402	$\Phi_{ch,ch}$	0	$\Phi_{sv,ch}$	0,0991	$\Phi_{o,ch}$	0,0991	$\Phi_{ns,ch}$	0,1401	$\Phi_{ts,ch}$	0,1401
$\Phi_{p,sv}$	0,0670	$\Phi_{sl,sv}$	0,0670	$\Phi_{sp,sv}$	0,0670	$\Phi_{ch,sv}$	0,0474	$\Phi_{sv,sv}$	0	$\Phi_{o,sv}$	0	$\Phi_{ns,sv}$	0,0670	$\Phi_{ts,sv}$	0,0670
$\Phi_{p,o}$	0,0731	$\Phi_{sl,o}$	0,0732	$\Phi_{sp,o}$	0,0732	$\Phi_{ch,o}$	0,0517	$\Phi_{sv,o}$	0	$\Phi_{o,o}$	0	$\Phi_{ns,o}$	0,0731	$\Phi_{ts,o}$	0,0731
$\Phi_{p,ns}$	0,0922	$\Phi_{sl,ns}$	0,0809	$\Phi_{sp,ns}$	0,0809	$\Phi_{ch,ns}$	0,0794	$\Phi_{sv,ns}$	0,0794	$\Phi_{o,ns}$	0,0794	$\Phi_{ns,ns}$	0	$\Phi_{ts,ns}$	0
$\Phi_{p,ts}$	0,1706	$\Phi_{sl,ts}$	0,1496	$\Phi_{sp,ts}$	0,1496	$\Phi_{ch,ts}$	0,1468	$\Phi_{sv,ts}$	0,1468	$\Phi_{o,ts}$	0,1468	$\Phi_{ns,ts}$	0	$\Phi_{ts,ts}$	0
$\Sigma \Phi_p$	1,0000	$\Sigma \Phi_{sl}$	1,0000	$\Sigma \Phi_{sp}$	1,0000	$\Sigma \Phi_{ch}$	1,0000	$\Sigma \Phi_{sv}$	1,0000	$\Sigma \Phi_o$	1,0000	$\Sigma \Phi_{ns}$	1,0000	$\Sigma \Phi_{ts}$	1,0000

V tomto programu jsou klíčové nejenom poměry osálení, ale také součinitele přestupu tepla. J. Cihelka sestavil tabulky těchto koeficientů v závislosti na typu konstrukce. Do výpočtového programu jsem převzal pouze hodnoty součinitele přestupu tepla konvekcí. Hodnoty součinitele přestupu tepla sáláním jsem spočítal podle Stefan-Boltzmanova zákona. Postup výpočtu je analogický s postupem uvedeným v kapitole 3.3. Není to standardní součinitel přestupu tepla sáláním, protože je záměrně upraven tak, aby se v jeho výpočtovém vztahu neobjevoval poměr osálení (rov. 3.28). Proto je tento součinitel stejný i pro sálanou konstrukci. Požitím součinitele přestupu tepla na místo obecné Stefan-Boltzmanovy rovnice je možné soustavu kubických rovnic zjednodušit na rovnice lineární.

$$\dot{q}_s = \sigma_B \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j \cdot \sum (\varphi_{ij} \cdot (T_i^4 - T_j^4)) \quad (3.26)$$

$$q_s = \alpha_s \cdot \varphi_{ij} \cdot (t_i - t_j) \quad (3.27)$$

$$\alpha_s = \frac{\sigma_B \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j \cdot (T_i^4 - T_j^4)}{(t_i - t_j)} \quad (3.28)$$

Tab. 3-6: Hodnoty součinitelů přestup tepla konvekcí a sáláním

$\alpha_{S,p,p}$	0	$\alpha_{S,sl,p}$	4,7543	$\alpha_{S,sp,p}$	4,7543	$\alpha_{S,ch,p}$	4,7583	$\alpha_{S,sv,p}$	4,5863	$\alpha_{S,o,p}$	3,4454	$\alpha_{S,ns,p}$	4,7258	$\alpha_{S,ts,p}$	5,0444
$\alpha_{S,p,sl}$	4,7543	$\alpha_{S,sl,sl}$	0	$\alpha_{S,sp,sl}$	4	$\alpha_{S,ch,sl}$	4,7056	$\alpha_{S,sv,sl}$	4,5355	$\alpha_{S,o,sl}$	3,4073	$\alpha_{S,ns,sl}$	4,6735	$\alpha_{S,ts,sl}$	4,9886
$\alpha_{S,p,sp}$	4,7543	$\alpha_{S,sl,sp}$	4	$\alpha_{S,sp,sp}$	0	$\alpha_{S,ch,sp}$	4,7056	$\alpha_{S,sv,sp}$	4,5355	$\alpha_{S,o,sp}$	3,4073	$\alpha_{S,ns,sp}$	4,6735	$\alpha_{S,ts,sp}$	4,9886
$\alpha_{S,p,ch}$	4,7583	$\alpha_{S,sl,ch}$	4,7056	$\alpha_{S,sp,ch}$	4,7056	$\alpha_{S,ch,ch}$	0	$\alpha_{S,sv,ch}$	4,5395	$\alpha_{S,o,ch}$	3,4103	$\alpha_{S,ns,ch}$	4,6775	$\alpha_{S,ts,ch}$	4,9927
$\alpha_{S,p,sv}$	4,5863	$\alpha_{S,sl,sv}$	4,5355	$\alpha_{S,sp,sv}$	4,5355	$\alpha_{S,ch,sv}$	4,5395	$\alpha_{S,sv,sv}$	0	$\alpha_{S,o,sv}$	3,2831	$\alpha_{S,ns,sv}$	4,5078	$\alpha_{S,ts,sv}$	4,818
$\alpha_{S,p,o}$	3,4454	$\alpha_{S,sl,o}$	3,4073	$\alpha_{S,sp,o}$	3,4073	$\alpha_{S,ch,o}$	3,4103	$\alpha_{S,sv,o}$	3,2831	$\alpha_{S,o,o}$	0	$\alpha_{S,ns,o}$	3,3862	$\alpha_{S,ts,o}$	3,6219
$\alpha_{S,p,ns}$	4,7258	$\alpha_{S,sl,ns}$	4,6735	$\alpha_{S,sp,ns}$	4,6735	$\alpha_{S,ch,ns}$	4,6775	$\alpha_{S,sv,ns}$	4,5078	$\alpha_{S,o,ns}$	3,3862	$\alpha_{S,ns,ns}$	0	$\alpha_{S,ts,ns}$	0
$\alpha_{S,p,ts}$	5,0444	$\alpha_{S,sl,ts}$	4,9886	$\alpha_{S,sp,ts}$	4,9886	$\alpha_{S,ch,ts}$	4,9927	$\alpha_{S,sv,ts}$	4,818	$\alpha_{S,o,ts}$	3,6219	$\alpha_{S,ns,ts}$	0	$\alpha_{S,ts,ts}$	0
$\alpha_{K,p}$	3	$\alpha_{K,sl}$	2,3	$\alpha_{K,sp}$	2,3	$\alpha_{K,ch}$	2,3	$\alpha_{K,sv}$	2,3	$\alpha_{K,o}$	3,5	$\alpha_{K,ns}$	1,95	$\alpha_{K,ts}$	1,95

3.5.1 Řešič systému algebraických rovnic

Ze zadaných parametrů program vytvoří maticovým zápisem soustavu 9 lineárních rovnic o 9 neznámých. Hodnoty matice jsou přeneseny do dalšího „listu“, kde je systém vyřešen Gaussovou eliminační metodou. Výsledné teploty konstrukcí jsou přeneseny zpět do „listu Tepelné Bilance“. Podle nových teplot konstrukcí se přepočítají součinitele přestupu tepla sáláním (rov. 3.28) a spočítá se rozdíl levých a pravých stran všech 9 rovnic. Pokud se hodnoty liší o větší než 10^{-8} , pak se musí celý

cyklus opět zopakovat. Pro řešení je tedy použita jak prostá iterace, tak Gaussova eliminační metoda.

Tab. 3-7: Maticový zápis soustavy lineárních rovnic

	Rovnice tepelné rovnováhy místnosti									Pravá Str. Rovnice	ZK GEM: Levá Str. Rovnice
	t_{pdl}	t_{sl}	t_{sp}	t_{ch}	t_{sv}	t_o	t_{ns}	t_{is}	t_v		
pro PDL	-158,44	14,37	14,37	8,82	4,06	3,33	5,76	11,38	39,68	-1222	-1222
pro SL	14,37	-115,98	13,56	8,65	3,99	3,27	4,96	9,79	30,15	-587,16	-587,2
pro SP	14,37	13,56	-115,98	8,65	3,99	3,27	4,96	9,79	30,15	-587,16	-587,2
pro CH	8,82	8,65	8,65	-74,25	1,76	1,45	3,04	6,01	18,85	-369,83	-369,8
pro SV	4,28	4,19	4,19	1,86	-36,65	0,00	1,48	2,92	9,48	98,97	98,971
pro O	3,51	3,44	3,44	1,52	0,00	-46,70	1,21	2,39	15,75	185,19	185,19
pro NS	5,71	4,91	4,91	3,02	1,39	1,14	-41,55	0,00	8,97	-234,21	-234,2
vzduch	39,68	30,15	30,15	18,85	9,48	15,75	8,97	16,59	-176,04	76,89	76,89
pohoda	0,17	0,20	0,20	0,11	0,04	0,04	0,09	0,16	0,77	38,15	38,154

Tab. 3-8: Gaussova eliminační metoda

1	-0,09068	-0,09068	-0,05565	-0,02565	-0,02103	-0,03637	-0,07181	-0,25041	7,713177
0	1	-0,12964	-0,08238	-0,03797	-0,03113	-0,04777	-0,09433	-0,29432	6,086603
0	0	1	-0,09465	-0,04362	-0,03577	-0,05488	-0,10838	-0,33815	6,993176
0	0	0	1	-0,03908	-0,03205	-0,06113	-0,12071	-0,38133	7,919963
0	0	0	0	1	-0,01423	-0,06426	-0,127	-0,41043	0,598737
0	0	0	0	0	1	-0,04173	-0,08252	-0,43894	-1,85959
0	0	0	0	0	0	1	-0,0631	-0,43286	9,603659
0	0	0	0	0	0	0	1	-3,18409	-30,5218
0	0	0	0	0	0	0	0	1	20,02016

3.5.2 Ověření správnosti programu

Dopočítávání poměru osálení podle poměrné části konstrukce vnáší do modelu chybu, což je patrné z tab. 3.9. V levém sloupci jsou vypočítané tepelné toky směrem z osálených konstrukcí do topného stropu a v pravém sloupci jsou toky ze stropu do osálených konstrukcí. V obou výpočtech se uplatňují jiné poměry osálení. Přesto je jejich rozdíl asi 1%. Protože program nepoužívá rovnici tepelné rovnováhy otopné části stropu, je shoda obou výsledků důkazem správnosti poměru osálení a součinitelů přestupu tepla. Teoreticky by rozdíl obou tepelných toků měl být roven nule v případě, že je místnost v tepelné rovnováze. Pokud je tepelný tok navíc roven i celkové tepelné ztrátě, pak je celý model fyzikálně správný.

Tab. 3-9: Vlevo: výpočet výkonu otopné plochy; vpravo: kritérium ukončení iterace

Výpočet výkonu otopné plochy			
Způsob sdílení tepla	Do	Z	
	ts	ts	
konvekce	219,1	219,1	W
sáláním do p	132,7	131,5	W
sáláním do sl	114,3	113,3	W
sáláním do sp	114,3	113,3	W
sáláním do ch	69,1	68,5	W
sáláním do sv	54,6	51,5	W
sáláním do o	54,3	51,2	W
sáláním do ns	0,0	0,0	W
celkem	758	748	W
Celkový měrný výkon	89	W/m²	

Ověření strávnosti výpočtu dosazením do původních rovnic tepelné rovnováhy			
Strana rovnice:	Levá	Pravá	Rozdíl
pro PDL	-8E-09	0	-8E-09
pro SL	3E-10	-8E-13	3E-10
pro SP	3E-10	8E-13	3E-10
pro CH	2E-10	0	2E-10
pro SV	218,51	218,51	5E-11
pro O	347,54	347,54	4E-11
pro NS	-2E-09	0	-2E-09
vzduch	205,17	205,17	-3E-13
pohoda	21,5	21,5	0

Tab. 3-10: Vlevo: výpočet tepelné ztráty; vpravo: výkon otopné plochy podle DIN

Tepelná ztráta místnosti		Srovnání výkonu otopné pl.	
prostupem	566 W	Podle DIN 4715 (rov.1.1)	
větráním	205 W		
celkem	771 W		109 W/m²

Tepelná ztráta místnosti se sálavým vytápěním vychází v programu o 1% vyšší než podle metodiky ČSN 12 831. To je způsobeno vyšší teplotou osálaných a zároveň ochlazovaných konstrukcí. Navíc program postihuje sdílení tepla v řešené místnosti mnohem přesněji, než pouhý součinitel přestupu tepla, který se v praxi s oblibou využívá.

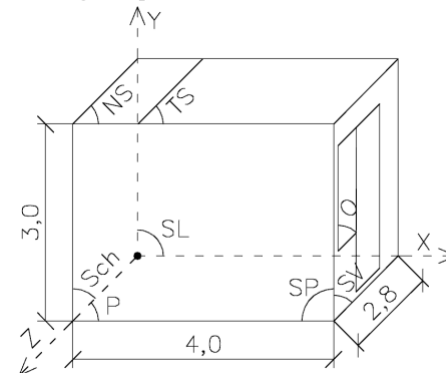
Tepelná bilance místnosti se stropním vytápěním

Rozměry místnosti

Délka X [m]	4,6
Výška Y [m]	2,85
Šířka Z [m]	2,875

Poloha referenčního bodu

X_R [m]	2
Y_R [m]	1,7
Z_R [m]	1,4



Množství větraného vzduchu [m3/hod]	18,85
Operativní teplota t_o [°C]	21,5
Rychlost proudění vzduchu v_a [m/s]	0,06
Stefan-Boltzmanova konstanta σ_B [-]	5,67E-08

Konstrukce	Index	Emisivita povrchu ϵ [-]	F plocha [m2]	Teplota za kcí. [°C]	U [W/m2/K]	α_i [W/m2K]	Λ	Teplota [°C]
Podlaha	p	0,91	13,23	21,56	2,50	6	4,286	21,56
Stěna levá	sl	0,90	13,11	21,55	1,65	8	2,079	21,55
Stěna pravá	sp	0,90	13,11	21,55	1,65	8	2,079	21,55
Stěna chodba	ch	0,90	8,19	21,71	1,65	8	2,079	21,71
Stěna vnější	sv	0,90	4,12	-12,00	1,60	8	2,000	14,49
Okno	o	0,69	4,50	-12,00	2,40	8	3,429	10,52
Nevytápěná část stropu	ns	0,90	4,60	20,37	2,00	10	2,500	20,37
Stropní otopná plocha	ts	0,90	8,51		2,00	10	2,500	33,22
Vnitřní vzduch	v							20,02
Vypočítaná střední radiační teplota k referenčnímu bodu R $t_{r,R}$								22,65
Venkovní vzduch	e							-12,00

Tab. 3-11: Vstupní údaje (žlutě) programu a výsledné teploty konstrukcí (zeleně)

ZÁVĚR

Cílem práce bylo analyzovat teplotní mikroklima místnosti se sálavým vytápěním. Dílčí výsledky této práce potvrzují vhodnost velkoplošného stropního vytápění především pro malé místnosti. S rostoucími požadavky na izolační schopnosti obálky budovy klesají tepelné ztráty, a tak nachází nízkoteplotní vytápění stále širší uplatnění. Z naměřených údajů vyplývá, že stropní sálavé vytápění je často obtížně regulovatelné, ale při správném návrhu otopné plochy a při použití vhodného systému MaR mohou tyto systémy nabídnout komfortní stav tepleného mikroklimatu.

Ze srovnání hodnot naměřených na reálném objektu a hodnot vypočítaných vyplývá, že jsou oba vytvořené programy vhodné pro analýzu stropního vytápění. S drobnými úpravami je možné tyto programy použít také u jiných objektů s velkoplošným sálavým vytápěním.

Program pro výpočet střední radiační teploty poskytuje také informace o radiační asymetrii, která je nutná v oblasti sálavého vytápění pro ověření návrhu. V tomto modelu byl vhodnou algoritmizací sestaven vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla sáláním otopného stropu, který v současné technické literatuře není dostupný.

Program tepelné bilance je schopen vypočítat optimální teplotu otopné plochy pro jakoukoliv venkovní teplotu. Podle takto sestavených ekvitemních křivek je možné regulovat systém celé budovy.

Podrobná analýza a návrh otopné plochy pro jediný pokoj se nemusí v praxi jevit příliš důležitě. Jestliže se však místnost v budově objevuje více než 500 krát, má výše uvedená detailní analýza význam. Správně provedený návrh se totiž odrazí ve vyšším komfortu všech ubytovaných.

SEZNAM OBRÁZKU A TABULEK A GRAFU

Seznam obrázků:

Obr. 1-1: Krbová kamna [9] a infračervený zářič [8]	4
Obr. 1-2: Prvky kapilárního segmentu INFRACLIMA [20]	8
Obr. 1-3: Detail umístění kapilárních rohoží na stropní desce, vlevo INFKLIMA vpravo G-TERM [21]	9
Obr. 1-4: Montáž KR na SDK podhled. [21]	10
Obr. 1-5: Montáž KR na omítnutou SDK desku [21].....	10
Obr. 1-6: Montáž KR do železobetonové stropní desky [21]	10
Obr. 1-7: Montáž kazet s kapilárními rohožemi v podhledovém stropě [21].....	10
Obr. 1-8: Zapojení kapilárních rohoží [21]	13
Obr. 1-9: Elektromagnetické spektrum záření [15].....	20
Obr. 1-10: Záření absolutně černého tělesa do poloprostoru	22
Obr. 1-11: Záření absolutně černého tělesa do poloprostoru [14].....	23
Obr. 1-12: Stanovení poměru osálení metodou strun [3]	24
Obr. 1-13: Nusseltova geometricko-analytická metoda [4].....	24
Obr. 1-14: Změna intenzity radiace po délce svazku [3]	25
Obr. 1-15: Znázornění sledovaných paprsků v metodě DTRM [3]	26
Obr. 1-16: MRT Analysis 3.7 zadání rozměru místnosti.....	28
Obr. 1-17: MRT Analysis 3.7 zadání aktivních povrchu pro výpočet.....	28
Obr. 1-18: MRT Analysis 3.7 zadání rozměru povrchu s teplotou.....	29
Obr. 1-19: MRT Analysis 3.7 zadání teplot povrchu.....	29
Obr. 1-20: MRT Analysis 3.7 volba výstupu programu.....	30
Obr. 1-21: Výpočet poměru osálení pro bod ležící na úrovni rohu obdélníku	30
Obr. 1-22: Využití substrakčního pravidla pro výpočet poměru osálení	31
Obr. 1-23: Geometrie pro výpočet.....	35
Obr. 1-24: Měřený pokoj.....	37
Obr. 1-25: Geometrie měřeného pokoje.....	38
Obr. 1-26: Vlevo: teplotní profil místnosti „izolace“; vpravo:rozmístění čidel.....	39
Obr. 1-27: Vlevo: rozmístění čidel na stropě, vpravo: čidla na potrubí.....	41
Obr. 1-28: IR snímek otopné části stropu měřeného pokoje	42
Obr. 1-29: IR snímek tepelných mostů	42
Obr. 1-30: IR snímek přívodního potrubí s kohouty pro otopnou plochu pokoje a chodby	42

Obr. 1-31: IR snímek napojení otopné plochy chodby	43
Obr. 1-32: měření hustoty tepelného toku	44
Obr. 1-33: Rozmístění čidel hustoty tepelného toku a teplot.....	45
Obr. 1-34: Přípustná povrchová teplota stropu při teplotě vzduchu 20 °C podle Kollmara. [4]	47
Obr. 2-1: Budova Listových kolejí v Brně	53
Obr. 2-2: IR snímek společné chodby	54
Obr. 2-3: Rozměry řešeného pokoje	56
Obr. 3-1: Poloha sálajícího elementu a osálané plochy pro výpočet poměru osálení..	72
Obr. 3-2: Výřez z výpočtové sítě levé stěny s referenčním křížem	74
Obr. 3-3: Podmínka skoku na další sloupec a ukončení podprogramu.....	75
Obr. 3-4: Barevná ilustrace 9 podmínek „když“ v závislosti na poloze referenčního bodu	76
Obr. 3-5: Vlevo: zadání řešeného bodu; vpravo:globální rozměry místnosti.....	76
Obr. 3-6: Obrys balkónového okna s dveřmi a referenční kříž	77
Obr. 3-7: Přiřazování barvy podle teploty čtverce	78
Obr. 3-8: Vygenerované aproximační polynomy z naměřených hodnot.....	79
Obr. 3-9: Část RGB škály teplot	81
Obr. 3-10: Vlevo: tepelná rovnováha ochlazované stěny, vpravo: sdílení tepla sáláním v prostoru [4]	89
Obr. 3-11: Výpočet poměru osálení k bodu R	94
Obr. 3-12: Vzájemná poloha desek pro vztah (3.64) vlevo a pro vztah (3.65) vpravo .	95
Obr. 3-13: Naznačení exaktního výpočtu poměru osálení složení konstrukce.....	96

Seznam tabulek:

Tab. 1-1: Parametry normovaných výkonů [21].....	11
Tab. 1-2: Zpravování naměřených dat pro vyhodnocení operativní teploty	40
Tab. 1-3: Rozdělení do kategorií podle ČSN EN ISO 7730 [6].....	49
Tab. 1-4: Výpočet intenzity osálení temene hlavy a asymetrie radiační teploty měřené místnosti	50
Tab. 1-5: Použité měřicí přístroje	51
Tab. 2-1: Výpočet tepelného výkonu řešené místnosti podle ČSN EN 12 831	57
Tab. 2-2: Výpočet tepelného výkonu řešené místnosti podle ČSN EN 12 831	58
Tab. 2-3: Návrh kapilárních rohoží	59
Tab. 2-3: Minimální tloušťka izolace potrubí.....	66
Tab. 3-1: Výpočet střední radiační teploty (účinné teploty)	80
Tab. 3-2: Výpočet střední teploty povrchu.....	81
Tab. 3-3: Porovnání modelu s hodnotami v technické literatuře	86
Tab. 3-4: Výpočet poměru osálení k bodu R	95
Tab. 3-5: Výpočet poměru osálení k bodu R	96
Tab. 3-6: Hodnoty součinitelů přestup tepla konvekcí a sáláním	97
Tab. 3-7: Maticový zápis soustavy lineárních rovnic	98
Tab. 3-8: Gaussova eliminační metoda.....	98
Tab. 3-9: Vlevo: výpočet výkonu otopné plochy; vpravo: kritérium ukončení iterace ...	99
Tab. 3-10: Vlevo: výpočet tepelné ztráty; vpravo: výkon otopné plochy podle DIN.....	99
Tab. 3-11: Vstupní údaje (žlutě) programu a výsledné teploty konstrukcí (zeleně)....	100

Seznam grafů:

Graf 1-1: Tlaková ztráty G-termálních kapilárních rohoží K.S15 (délka rohože 1-8m) [21].....	8
Graf 1-2: Přípustný topný výkon KR [21]	12
Graf 1-3: Vertikální a horizontální průběh teplot vzduchu ve vytápěné místnosti v závislosti na způsobu vytápění [11]	16
Graf 1-4: Spektrum hustoty záření [15]	21
Graf 1-5: MRT Analysis 3.7 výstup z programu.....	31
Graf 1-6: Teplotní profil obývané místnosti.....	40
Graf 1-7: Rozdíl naměřeného a vypočítaného tepelného toku	46
Graf 3-1: Průběh střední radiační teploty	80
Graf 3-2: Sálavý otopný výkon stropu	83
Graf 3-3: Závislost součinitele α_s na teplotě povrchu	84
Graf 3-4: Velikost součinitele přestupu tepla konvekcí v průběhu měření.....	87

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Význam
Q_c	[W]	celková tepelná ztráta
Q_p	[W]	tepelná ztráta prostupem tepla
Q_v	[W]	tepelná ztráta větráním
q	[W m ⁻²]	měrný tepelný výkon otopné plochy
q_s	[W m ⁻²]	hustota tepelného toku sáláním
q_k	[W m ⁻²]	hustota tepelného toku konvekcí
α_s	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla sáláním
α_k	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla konvekcí
$\alpha_{S,n1}$	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	částečný součinitel přestupu tepla sáláním
t_v	[°C]	teplota vnitřního vzduchu
t_e	[°C]	teplota venkovního vzduchu
t_r	[°C]	střední radiační teplota
t_u	[°C]	účinná teplota
t_o	[°C]	operativní teplota teplota
t_g	[°C]	výsledná teplota
t_p	[°C]	povrchová teplota
Δt	[°C]	rozdíl teplot
T	[K]	termodynamická teplota povrchu
F_1	[m ²]	plocha konstrukce
φ_{12}	[-]	poměr osálání
a	[°C]	koeficient tepelné pohody člověka
a	[m ² /s]	teplotní vodivost
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
l	[m]	charakteristický rozměr
a, b	[m]	rozměry osálané plochy
h	[m]	vzdálenost o osálané plochy
λ	[W/m/K]	součinitel tepelné vodivosti
Λ_1	[W/m/K]	součinitel tepelné propustnosti
U	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla
R	[m ² KW ⁻¹]	tepelný odpor zdiva

c	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
w	$[\text{m/s}]$	rychlost proudění
ε	$[-]$	emisivita povrchu
σ_B	$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)]$	Stefan-Boltzmanova konstanta
UT		ústřední topení
ZTI		profese zdravotní technika
VZT		profese vzduchotechnika
ELE		profese elektro
MaR		profese měření a regulace
KR		kapilární rohože
TV		teplá voda
TZ		technická zpráva
MRT		mean radiant temperature
RTE		Radiative Transfer Equation

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CARBOL, Ladislav. *Vytápění polyfunkčního objektu : bakalářská práce*. Brno, 2011. 74 s. , 58 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technických zařízení budov. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lucie Hořínková.
- [2] CARBOL, Ladislav. Měření stropního vytápění. In: *SVOČ 2012 XIII. Ročník soutěže stavebních fakult České a Slovenské republiky*. VUT v Brně, 17. května 2012, s. 16.
- [3] PLÁŠEK, Josef a Ondřej ŠIKULA. *Modelování tepelného sálání v budovách*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS - Advanced Materials, Structures and Technologies, 2012, 150 s. ISBN 978-80-214-4383-9.
- [4] CIHELKA, J. Sálavé vytápění, s. 376, Praha : SNTL, 1961. DT 697.35
- [5] ČSN EN ISO 7726: 2002 Tepelné prostředí – Přístroje a metody měření fyzikálních veličin, ČSNI 2002
- [6] ČSN EN ISO 7730: 2006 Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu, ČSNI 2006
- [7] ČSN EN ISO 12 831:2005 Tepelné soustavy v budovách - Výpočet tepelného výkonu, ČSNI 2005
- [8] KLECAN, Jiří. Infračervený zářič SUNLINE PROFESSIONAL SP1500. *Tepelné Zářiče.cz* [online]. [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: URL:<<http://www.tepelne-zarice.cz/infracerveny-zaric-sunline-professional-sp1500.html>>
- [9] Laudel ohniště 800. *BHS Praha s.r.o.* [online]. [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: URL:<<http://www.bhs-praha.com/krbove-vlozky/krbove-vlozky-laudel/laudel-ohniste-800/>>
- [10] ZAMRHAL V. MRT Analysis 3.01, ČVUT Praha 2005 Dostupné z URL: <<http://www.users.fs.cvut.cz/~zmrhavla/Programy/>>
- [11] BAŠTA, J. *Velkoplošné vytápění (I) - TZB-info* [online], poslední aktualizace 26.6.2006 [cit. 2012-08-12] Dostupné z URL: <<http://www.tzb-info.cz/3383-velkoplosne-vytapeni-i>>
- [12] BAŠTA, J. *Velkoplošné vytápění (III) - TZB-info* [online], poslední aktualizace 3.7.2006 [cit. 2012-08-12], Dostupné z URL: <<http://www.tzb-info.cz/3396-velkoplosne-vytapeni-iii>>

- [13] BAŠTA, Jiří. *Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách a na Moravě*. 1. vyd. Praha: GAS, 2001, 2395 s. ISBN 80-86176-82-71.
- [14] View factor - Wikipedia, the free encyclopedia. [online]. 13. prosince 2012 [cit. 2013-01-02]. Dostupné z URL:< http://en.wikipedia.org/wiki/View_factor>
- [15] Elektromagnetické záření - Wikipedie. [online]. 28. prosince 2012 [cit. 2013-01-02]. Dostupné z URL:< http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_z%C3%A1r%C5%99en%C3%AD>
- [16] Věstník Ministerstva zdravotnictví České republiky. In: [online]. Listopad 2004 [cit. 2013-01-02]. Dostupné z URL:< http://www.szu.cz/cekz/dokumenty/autorizace/Metodika_MKL_Vestnik_11.pdf>
- [17] MICHEJEV, Michail Aleksandrovič *Základy sdílení tepla*, Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952, 384 s. DT 536.2
- [18] SAZIMA, Miroslav a kol. *Sdílení tepla*. Praha: STNL, 1993, 720 s. ISBN 04-203-92
- [19] ZMRHAL, V. *Tepelné prostředí v prostoru s kapilárními rohožemi*. In Vytápění, větrání, instalace, 2007, roč. 16, č. 1, s. 37 - 41. ISSN 1210-1389.
- [20] Montážní návody : *Infraclima*:. *Topinfo.cz* [Online], poslední aktualizace 25.1.2010 [cit. 2012-08-12], Dostupné z URL: < <http://www.infraclima.cz/cz/montazni-navody>>
- [21] G-TERM. *Projekční podklady a montážní předpis pro kapilární rohože G-TERM* [CD-ROM], poslední aktualizace 20.11.2007 [cit. 2012-08-12]
- [22] Projekční podklady pro kapilární rohože G-TERM – Obecná teorie stropního systému [CD-ROM], poslední aktualizace 31.1.2008 [cit. 2012-08-12]
- [23] POČÍNKOVÁ, M. BT02-Vytápění. [Online] Brno: VUT, FAST, Ústav technických zařízení budov, 3.1.2001. Přednáška č.2 Dostupné z URL: <<http://www.fce.vutbr.cz/TZB/pocinkova.m/>>

SEZNAM PŘÍLOH

Výkres č. 1 - Výkres otopné plochy řešeného pokoje

Výkres č. 2 - Půdorys 1.PP