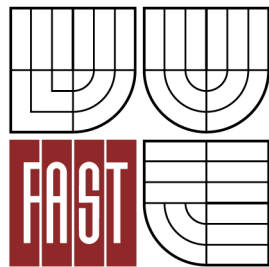


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

# OPTIMALIZACE CHLAZENÍ RD VYUŽÍVAJÍCÍHO ZEMNÍ VRTY

OPTIMIZATION OF COOLING OF A FAMILY HOUSE BY USING A GEOTHERMAL SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN BUCHTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ ŠIKULA, Ph.D.

BRNO 2014



# 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. Jan Buchta

**Název** Optimalizace chlazení RD využívajícího zemní vrty

**Vedoucí diplomové práce** doc. Ing. Ondřej Šikula, Ph.D.

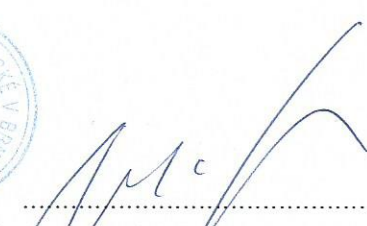
**Datum zadání diplomové práce** 31. 3. 2014

**Datum odevzdání diplomové práce** 16. 1. 2015

V Brně dne 31. 3. 2014



doc. Ing. Jiri Hirš, CSc.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
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)**

### **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 ve variantách v zadané specializaci (včetně doložených výpočtů) v rozpracovanosti rozšířeného projektu pro stavební povolení: půdorysy v měřítku 1:100, stručná technická zpráva

Hodnocení navržených variant řešení (např. z hlediska vnitřního prostředí, uživatelského komfortu, prostorových nároků, ekonomiky provozu, dopadu na životní prostředí apod.)

### **C. Experimentální a simulační řešení a zpracování výsledků.**

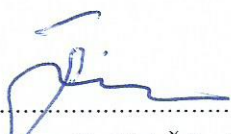
Experimenty realizované v laboratoři, nebo v reálném provozu postihující zadanou problematiku. Počítačová simulace souvisejících fyzikálních dějů.

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

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozdělte 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).

  
.....  
doc. Ing. Ondřej Šikula, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

**Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá optimalizací stávajícího systému stropního chlazení rodinného domu využívajícího jako zdroj chladu pouze zemní vrt. V rámci práce bylo v objektu provedeno dlouhodobé měření. Hlavní částí diplomové práce je tvorba a verifikace matematicko-fyzikálního modelu tepelného chování chlazené místnosti. Výsledkem jsou numerické simulace a zhodnocení jednotlivých scénářů a návrhové požadavky pro možnou optimalizaci systému měření a regulace. Teoretická část se obecně zabývá sálavými chladičnými systémy.

**Klíčová slova**

Chlazení, sálavé chladičny systémy, stropní chlazení, zemní vrt, matematicko-fyzikální model, počítačová simulace, tepelné chování chlazené místnosti, optimalizace, software CalA

**Abstract**

The master's thesis deals with optimization of cooling system of family house using borehole heat exchanger as a single cooling source. In the experimental part of the thesis was carried out long-term measurements. The main part of the master's thesis is the development and verification mathematical and physical model of thermal behavior chilled room. The result are computer simulations and evaluation of individual scenarios and design requirements for a potential optimization of measurement and control system. The theoretical part generally deals with radiant cooling systems.

**Keywords**

Cooling system, radiant cooling system, chilled ceilings, borehole heat exchanger, mathematical and physical model, computer simulations, thermal behavior chilled room, optimization, software CalA

### **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Jan Buchta *Optimalizace chlazení RD využívajícího zemní vrty*. Brno, 2014. 80 s., 3 s. příl.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení  
budov. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 5. 1. 2015

.....  
podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Moje poděkování patří vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ondřeji Šikulovi, Ph.D. za ochotu, odborné vedení a cenné rady. Dále děkuji Ing. Josefu Pláškovu za pomoc s experimentální částí práce a technickou podporu při práci se softwarem CalA. Rovněž děkuji Ústavu vodního hospodářství za poskytnutá data z meteorologické stanice a Janu Mezerovi za umožnění měření v jeho rodinném domě a poskytnutí všech potřebných podkladů.

Rád bych na tomto místě poděkoval i mé rodině za podporu během celého studia a děkuji také své přítelkyni a budoucí ženě za její porozumění a trpělivost.

# OBSAH

<b>ZADÁNÍ</b> .....	<b>2</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ</b> .....	<b>7</b>
<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
1.1 ÚVOD DO TEORETICKÉ ČÁSTI .....	12
1.2 HISTORIE .....	12
1.3 SÁLAVÉ CHLADICÍ SYSTÉMY .....	13
1.4 VÝHODY A NEVÝHODY SÁLAVÝCH CHLADICÍCH SYSTÉMŮ .....	15
1.4.1 VÝHODY .....	16
1.4.2 NEVÝHODY.....	17
1.5 ROZDĚLENÍ SÁLAVÝCH CHLADICÍCH SYSTÉMŮ .....	20
1.5.1 OTEVŘENÉ SÁLAVÉ CHLADICÍ SYSTÉMY .....	21
1.5.2 UZAVŘENÉ SÁLAVÉ CHLADICÍ SYSTÉMY .....	21
1.6 POUŽITÍ SÁLAVÝCH CHLADICÍCH SYSTÉMŮ.....	27
1.7 ZAJÍMAVÉ APLIKACE Z PRAXE.....	28
1.8 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI.....	30
<b>2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>31</b>
2.1 ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	32
2.2 ŘEŠENÝ OBJEKT.....	32
2.3 STÁVAJÍCÍ SYSTÉM CHLAZENÍ .....	34
2.3.1 CHLAZENÉ MÍSTNOSTI .....	34
2.3.2 POTRUBNÍ SYSTÉM CHLAZENÍ.....	35
2.4 DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ .....	35
2.4.1 FYZICKÝ MODEL A SLEDOVANÉ VELIČINY.....	35
2.4.2 POSTUP MĚŘENÍ A MĚŘICÍ PŘÍSTROJE .....	37
2.5 MĚŘENÍ TERMOKAMEROU.....	39
2.6 MĚŘENÍ PRŮTOKU.....	40
2.7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	41
2.7.1 TECHNICKÁ MÍSTNOST – PRŮBĚH TEPLIT.....	41
2.7.2 LOŽNICE – PRŮBĚH TEPLIT .....	42
2.7.3 LOŽNICE – PRŮBĚH TEPELNÝCH TOKŮ A RELATIVNÍ VLHKOSTI.....	43
2.8 OVĚŘENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	44
2.8.1 MĚRNÝ TEPELNÝ TOK .....	44
2.8.2 MĚRNÝ PRŮTOK CHLADICÍ VODY .....	44
2.9 ZÁVĚR EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI .....	45



<b>3. SIMULAČNÍ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>47</b>
3.1 ÚVOD DO SIMULAČNÍHO ŘEŠENÍ .....	48
3.2 MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL .....	48
3.2.1 GEOMETRIE MODELU .....	48
3.2.2 FYZIKÁLNÍ PŘEDSTAVA .....	50
3.3 VÝPOČET V SOFTWARE CALA .....	56
3.4 VERIFIKACE MODELU .....	57
3.5 SIMULACE.....	58
3.5.1 SIMULOVANÉ SCÉNÁŘE.....	58
3.5.2 ZASTAVENÍ PRŮTOKU CHLADICÍ VODY.....	59
3.5.3 SIMULACE BEZ VLIVU CHLAZENÍ.....	60
3.5.4 OPTIMALIZACE SYSTÉMU MAR .....	61
3.5.5 NOČNÍ VĚTRÁNÍ .....	64
3.6 ZÁVĚR SIMULAČNÍHO ŘEŠENÍ.....	65
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>66</b>
<b>5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>67</b>
<b>6. SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>69</b>
<b>7. PŘÍLOHY.....</b>	<b>70</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>71</b>

## ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací stávajícího systému stropního chlazení rodinného domu využívajícího jako zdroj chladu pouze zemní vrty. Rodinný dům se nachází v Brně v městské části Komín. V objektu je ve třech místnostech ve druhém nadzemním podlaží instalováno stropní chlazení ve formě potrubního systému.

V létě minulého roku bylo v rodinném domě provedeno dlouhodobé měření. Měření bylo prováděno v jedné ze tří chlazených místností – v ložnici. Zde byly měřeny parametry vnitřního vzduchu, povrchová teplota stropu a měrný chladicí výkon stropu. Dále bylo měřeno v technické místnosti, kde byl experimentálně zjištěn průběh teplot teplotnosné látky na přívodu i vratu primárního i chladicího okruhu. Cílem experimentální části bylo získání jasnější představy o chování stávajícího systému a shromáždění potřebných dat pro pozdější simulační řešení. V rámci této části práce byla také vytvořena termovizní dokumentace chladicího stropu.

Hlavní částí diplomové práce je tvorba matematicko-fyzikálního modelu tepelného chování místnosti chlazené chladicím stropem a následná verifikace tohoto modelu. Numerickou simulací vypočtený průběh byl tedy porovnán s hodnotami získanými experimentálním měřením v řešeném objektu, a to za stejných okrajových podmínek. Vlastní numerické řešení bylo provedeno metodou kontrolních objemů v softwaru CalA. Cílem simulačního řešení jsou numerické simulace jednotlivých scénářů možných optimalizací stávajícího systému a jejich zhodnocení.

Teoretická část práce se obecně zabývá sálavými chladicími systémy, jejich historií, rozdělením a popisem konkrétních typů. Dále objektivně porovnává výhody a nevýhody sálavých chladicích systémů a blíže ukazuje vybrané aplikace těchto systémů v praxi.

Diplomovou práci tvoří tři hlavní části: teoretická část, experimentální část a simulační řešení.

# **1. TEORETICKÁ ČÁST**

*Sálavé chladicí systémy*

## 1.1 Úvod do teoretické části

Teoretická část práce se obecně zabývá sálavými chladicími systémy, jejich historií, rozdělením a popisem konkrétních typů. Dále objektivně porovnává výhody a nevýhody sálavých chladicích systémů a blíže ukazuje vybrané aplikace těchto systémů v praxi.

V současné době, kdy moderní společnost klade stále vyšší nároky na interní mikroklima budov, se jako vhodné řešení z hlediska tvorby vnitřního prostředí v letním období jeví sálavé chladicí systémy. Tyto systémy zajišťují vysoký tepelný komfort osobám pobývajícím v takto chlazených prostorách.[8]

Systémy sálavého chlazení pracují s vyšší teplotou chladicí vody. Z toho důvodu jsou často nazývány jako systémy vysokoteplotního chlazení. Díky tomu jsou ideální variantou pro alternativní, vysokoteplotní zdroje chladu. Tyto systémy dílejší klimatizace rovněž umožňují přivádět pouze potřebné množství větracího vzduchu a tím snižují nároky na systém vzduchotechniky.

Systémy sálavého chlazení jsou u nás zatím stále spíše ojedinělé. Naopak velké oblibě se těší v zemích západní Evropy, kde můžeme v posledních letech vidět jejich výrazný rozvoj.

Mezi nejrozšířenější typ sálavých chladicích systémů patří chladicí stropy.

## 1.2 Historie

Z historického hlediska nejsou sálavé systémy žádnou novinkou. Avšak původně byly tyto systémy využívány zejména pro vytápění. První známý sálavý systém vytápění navrhl již ve starověkém Římě roku 80 př. n. l. Sergius Orata. Toto hypokaustum bylo navrženo tak, že v prostoru pod objektem bylo umístěno ohniště, jehož horké spaliny proudily dutinami v podlaze, kterou bylo teplo sdíleno do interiéru. Tento systém byl ve starověku hojně rozšířen a využíván například pro vytápění městských lázní. [1]



Obr. 1 Pozůstatky hypokausta Velkých městských lázní, Stobi, Makedonie [2]

Zabýváme-li se však chlazením dnešního typu, datují se počátky těchto systémů do doby výrazně mladší. První velký systém navrhl ve 30. letech minulého století anglický stavební inženýr Dr. Oscar Faber v rámci rekonstrukce budovy Bank of England. Faberův systém využíval měděných trubek vložených do betonové podlahy a do stropní omítky. Tento systém byl využíván pro vytápění i chlazení objektu.

V té době byly podobné systémy navrženy do několika dalších velkých budov. Například v budově Říšského sněmu v Německu.

Většina ze sálavých chladicích systémů vyvinutých ve 30. letech minulého století však selhala v důsledku časté kondenzace vodních par. Následné průzkumy ukázaly, že tomuto problému lze předejít spojením sálavého chladicího systému se systémem nuceného větrání navrženým pro snížení teploty rosného bodu v chlazené místnosti. Tyto kombinované systémy byly úspěšně instalovány například v obchodním domě v Curychu ve Švýcarsku postaveném v letech 1936-1937. [3]



Obr. 2 Budova Bank of England, Londýn, Velká Británie [4]

### 1.3 Sálavé chladicí systémy

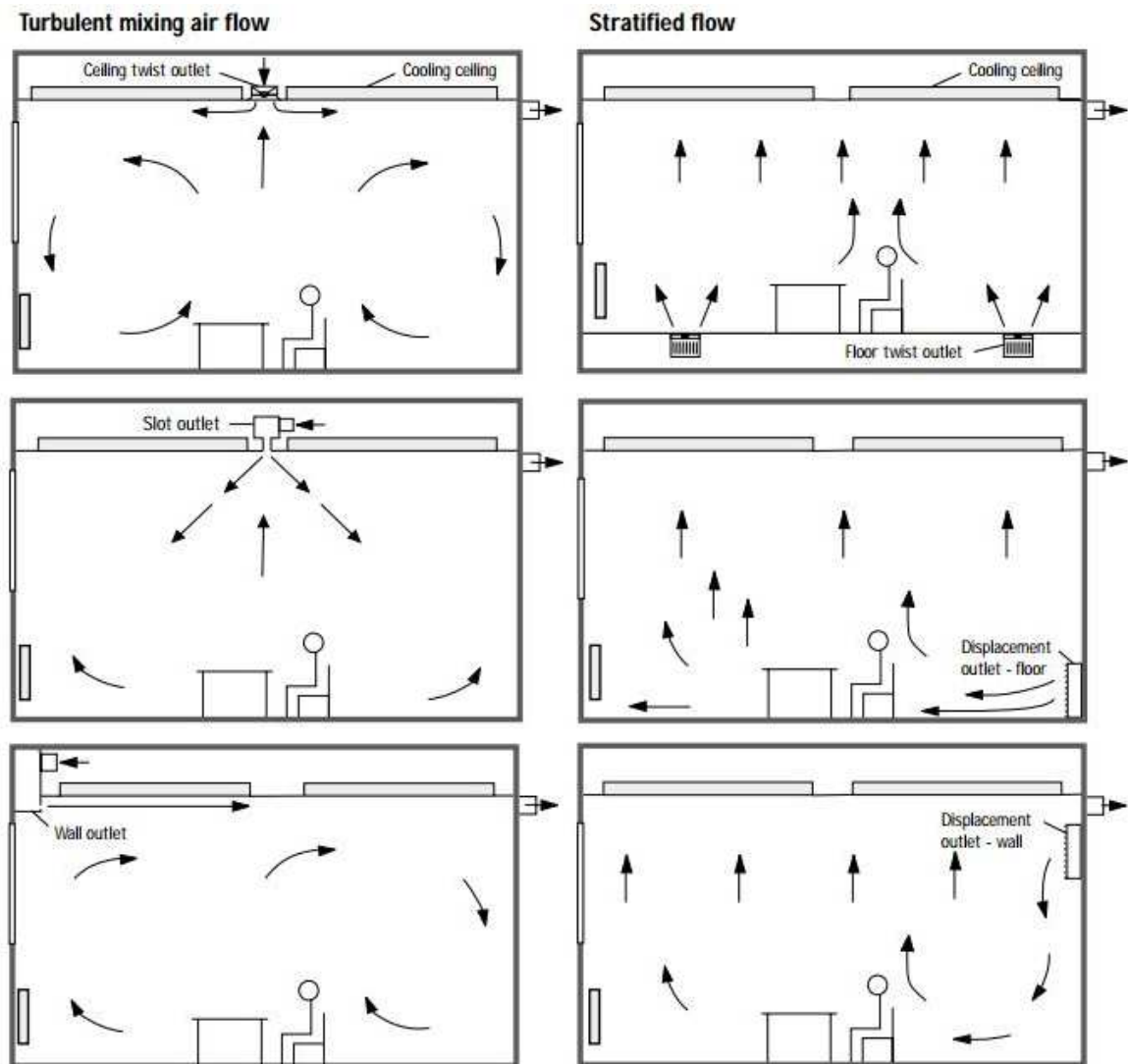
Sálavé chladicí systémy jsou moderní technická zařízení, která jsou navrhována jako systémy dílčí klimatizace pro tvorbu vnitřního prostředí. Vnitřní mikroklima vytvářené těmito systémy je velmi komfortní.

Z hlediska konstrukce rozlišujeme systémy na otevřené a uzavřené. Sdílení tepla do interiéru je realizováno zejména radiací (sáláním) a konvekcí. Největším rizikem těchto systémů je kondenzace vodní páry na povrchu teplosměnné plochy. Z toho důvodu je pro tyto systémy navrhována vyšší teplota přívodní vody (dle typu chladicího systému a parametrů vnitřního vzduchu chlazené místnosti). Hovoříme tedy o systému vysokoteplotního chlazení. Tento fakt umožňuje použití vysokoteplotních zdrojů chladu, což je z hlediska provozu ekonomicky výhodné. Současně se ale jedná o určité omezení chladicího výkonu.

Zřejmě zásadní nevýhodou těchto systémů jsou vyšší investiční náklady.

Nejčastějším typem sálavých chladicích systémů je chladicí strop.

Následující obrázky schematicky ukazují proudění vzduchu v místnosti s chladicím stropem a různými způsoby distribuce vzduchu.



Obr. 3 Kombinace chladicího stropu s různými způsoby distribuce vzduchu [5]

### ***Tepelná pohoda v prostoru chlazeném sálavým systémem***

Tepelná pohoda v prostoru je hodnocena operativní teplotou  $t_o$ , která kromě teploty vzduchu v interiéru  $t_a$  zahrnuje i rychlost proudění vzduchu  $w_a$  a střední radiální teplotu  $t_r$ . Operativní teplota je jednotná teplota černého tělesa (z hlediska sdílení tepla sáláním) uzavřeného prostoru, ve kterém by člověk sdílel konvekci a radiaci stejné množství tepla, jako ve skutečném teplotně nestejnorodém prostoru. [6]

Operativní teplota se vypočte ze vztahu:

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r \quad (1)$$

Kde hodnota A je závislá na relativní rychlosti proudění vzduchu.

Pokud je rychlost proudění vzduchu  $w_a < 0,2$  m/s lze nahradit operativní teplotu teplotou výslednou  $t_g$ , dle vztahu:

$$t_o = \frac{t_a + t_r}{2} \cong t_g \quad (2)$$

Z toho plyne, že střední radiační teplota  $t_r$  má na tepelnou pohodu v prostoru výrazný vliv. V místnostech se sálavými chladicími systémy lze tedy při zachování stejného tepelného komfortu uvažovat vyšší teplotu vzduchu než u konvekčních klimatizačních systémů, což je výhodné zejména z hlediska ekonomiky provozu. [7]

#### 1.4 Výhody a nevýhody sálavých chladicích systémů

Stejně jako každý systém mají sálavé chladicí systémy své výhody i nevýhody, které můžeme shrnout do několika bodů.

##### **Výhody:**

- kvalita tepelného komfortu
- hlukové parametry systému
- odpadá riziko vzniku průvanu
- snížení nároků na systém VZT
- energeticky úsporný provoz
- možnost využití alternativních, vysokoteplotních zdrojů chladu
- samoregulační schopnost systému
- možnost využití systému pro vytápění

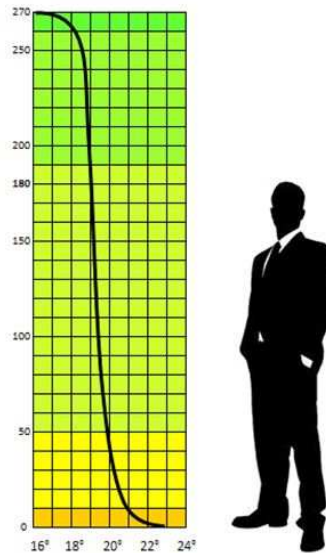
##### **Nevýhody:**

- nebezpečí vzniku kondenzace
- omezení výkonu
- systém neumožňuje odvádět latentní teplo
- nemožnost okamžité regulace systému
- investiční náklady systému
- velkoplošný systém – prostorová náročnost [8]

### 1.4.1 Výhody

#### *Komfortní prostředí*

Podíváme-li se na výhody sálavých chladicích systémů detailněji, zjistíme, že tyto systémy nabízejí vysokou kvalitu tepelného komfortu vnitřního prostředí. Tepelný výškový profil místnosti, ve které je interní mikroklima tvořeno chladicím stropem, se blíží profilu, který je pro člověka ideální.



Obr. 4 Ideální teplotní profil místnosti [9]

Dále odpadá riziko průvanu a obtěžování osob nízkými teplotami, což je velkou a z pohledu uživatele hlavní nevýhodou ventilátorových vodních či chladivových jednotek a mnohdy i vzduchotechnických výustí. Provoz sálavých chladicích systémů je prakticky bezhlučný a tím je ideální pro použití do prostor s vysokými hygienickými nároky na hlukové poměry vnitřního prostředí.



Obr. 5 Obtěžování průvanem u chladivových jednotek a jeho časté „řešení“ [Autor]



### ***Energeticky úsporný provoz***

Sálavé chladicí systémy jsou systémem vysokoteplotního chlazení a vyžadují tak vyšší teplotu chladicí vody, což je z hlediska energeticky úsporného provozu největší výhodou těchto systémů, neboť množství spotřebované energie a její cena bude vždy diskutovaným tématem.

Pro tyto systémy je možno využít zdroje s nižším potenciálem chlazení. Příkladem takových vysokoteplotních zdrojů je například zemský polomasiv, podzemní voda, vodní toky atd. [8]

Výhodou je i snížení investičních, provozních a prostorových nároků na systém vzduchotechniky přiváděním pouze požadovaného množství čerstvého vzduchu. Z tohoto hlediska je systém vhodný i do objektů s minimálním prostorem v pohledu. Této skutečnosti je možné s výhodou využít u rekonstrukcí.

### ***Samoregulační schopnost systému***

Samoregulační schopnost je typickou vlastností všech velkoplošných sálavých systémů vytápění i chlazení.

Vlivem velké teplosměnné plochy systémů se snižuje rozdíl mezi teplotou vzduchu v chlazené místnosti a teplotou povrchu teplosměnné plochy, a tím je samoregulační schopnost systému výraznější. [8]

V neposlední řadě je výhodou systému jeho možná využitelnost i pro vytápění.

## **1.4.2 Nevýhody**

### ***Riziko kondenzace, omezení výkonu***

Zřejmě hlavní nevýhodou sálavých chladicích systémů je riziko kondenzace. Povrchová teplota sálavé chladicí plochy musí být vyšší než teplota rosného bodu okolního vzduchu (obvykle bývá vyšší o 1 až 2 K).

Teplota přívodní vody  $t_{w1}$  by neměla klesat pod 16 °C. z toho důvodu hovoříme o tzv. vysokoteplotním chlazení. Rozdíl mezi teplotou chladicí vody odváděné a přiváděné je obvykle v rozmezí  $2 \leq \Delta T \leq 4$  K. [10]

Kondenzace je výrazným rizikem především u tepelně aktivovaných konstrukcí (aktivní beton), neboť systém na případnou regulaci reaguje s výraznější časovou prodlevou.

Vzhledem k tomu že systém fyzikálně pracuje jako suché chlazení, neumožňuje odvádět latentní teplo (teplo vázané ve vodní páře). Z tohoto důvodu také systém nedokáže řídit vzdušnou vlhkost v interiéru.

S vyšší teplotou přívodní vody a tím i vyšší teplotou sálavé chladicí plochy souvisí omezení chladicího výkonu. V tabulce je zobrazena závislost měrného chladicího výkonu kapilárních rohoží v závislosti na rozdílu povrchové teploty teplosměnné plochy a teploty vzduchu v místnosti.

**Chladicí výkon kapilárních rohoží**

$t_p - t_i$	[K]	2	5	10
Svislé stěny	$q$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]	16	40	80
Podlaha	$q$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]	14	36	72
Strop	$q$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]	17	43	89

Tab. 1 Závislost chladicího výkonu kapilárních rohoží [11]

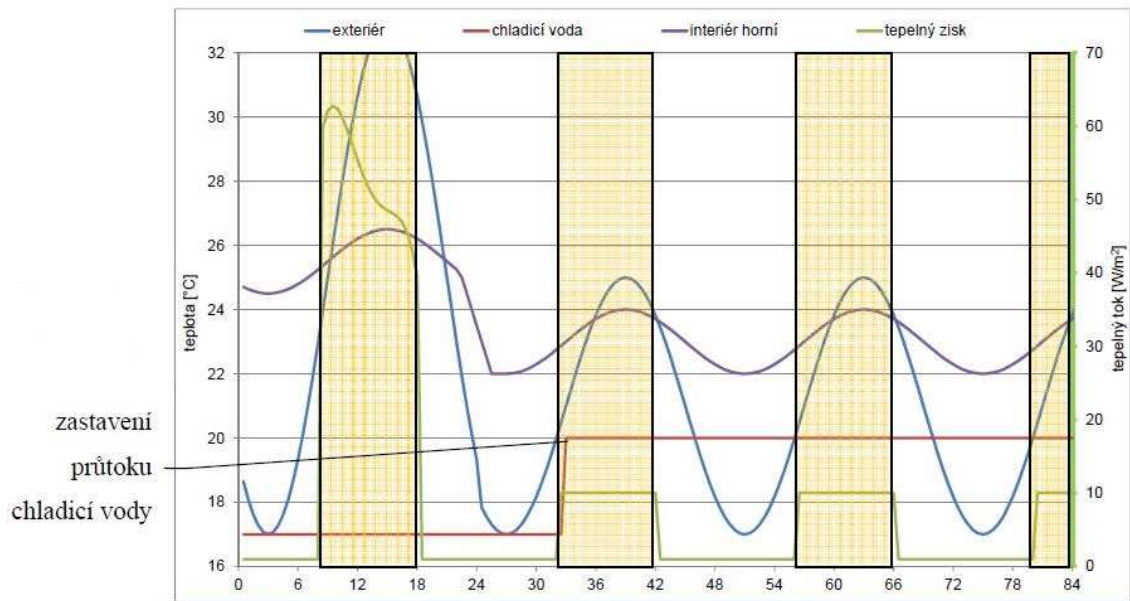
**Regulace systému**

Lehké uzavřené či otevřené chladicí systémy nejsou z hlediska regulace díky nedlouhé časové odezvě příliš náročné.

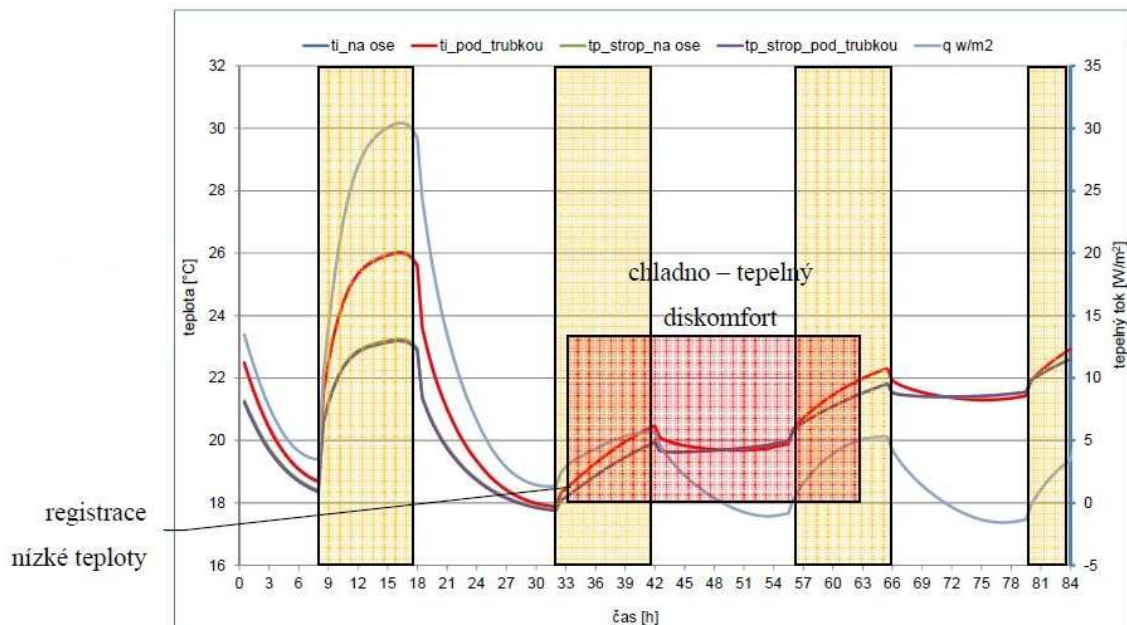
Problém nastává u masivních systémů, jejichž regulace je značně složitější, a to především z důvodu vysoké tepelné setrvačnosti. V případě tepelně aktivovaného betonu může systém vlivem vysoké schopnosti akumulace tepla pracovat řádově až s desetihodinovou odezvou. Z toho plyne, že tyto systémy mohou vlivem náhlé změny okrajových podmínek vykazovat bez včasného regulačního zásahu značný tepelný diskomfort. Je tedy nutné využívat inteligentních systémů regulace umožňujících řízení například dle předpovědi počasí.

Tento fakt graficky zobrazuje následující simulace tepelného chování místnosti při náhlé změně počasí (ochlazení) bez včasného zastavení průtoku chladicí vody. Na vodorovné ose je vyneseno čas a žlutými obdélníky je naznačena provozní doba objektu. Z důvodu pozdního regulačního zásahu vlivem výrazné akumulace chladu dochází k přechlazení místnosti.

Vysoké schopnosti akumulace lze naopak s výhodou využívat například pro systém nočního větrání.



Obr. 6 Okrajové podmínky [12]



Obr. 7 Odezva systému [12]

Pro pokrytí špičkové tepelné zátěže se masivní sálavý chladičí systém zpravidla doplňuje dalším systémem schopným rychlejší reakce na zvýšení potřeby chladu.

### **Investiční náklady systému**

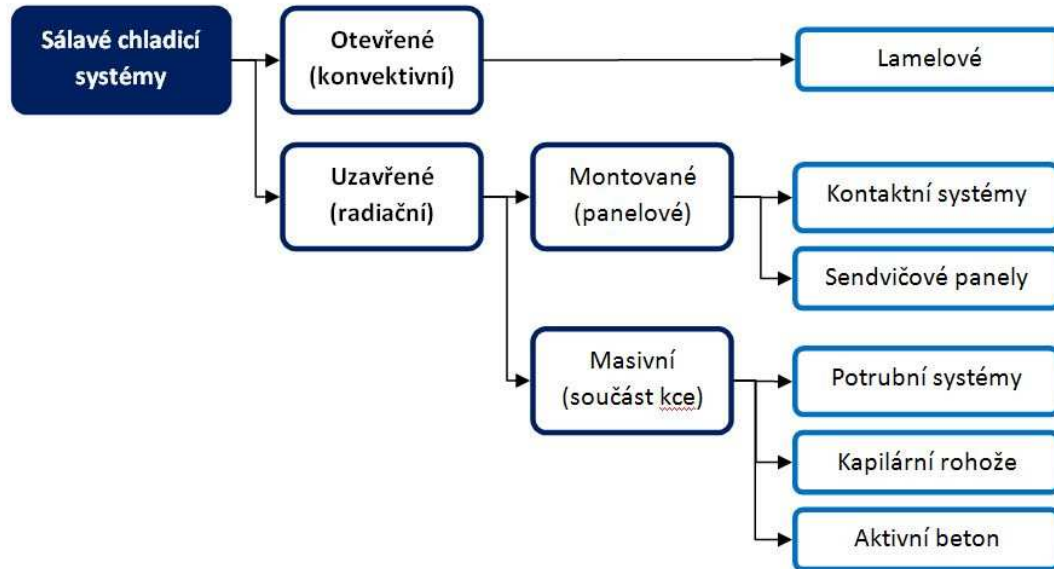
Hlavní nevýhodou sálavých chladičích systémů jsou jejich vyšší pořizovací náklady. A zřejmě právě tento fakt způsobuje, že tyto systémy jsou více rozšířeny především na západ od našich hranic a u nás jsou zatím navrhovány spíše ojediněle.

Velkoplošný systém s sebou nese i výrazné prostorové nároky. Chlazenou stěnu například není možné zakrýt nábytkem a při návrhu chladičího stropu je nutné řešit prostorovou koordinaci s umělým osvětlením místnosti a dalšími zařízeními, která mohou být umístěna v pohledu.

## 1.5 Rozdělení sálavých chladicích systémů

Systémy dělíme z hlediska provedení na otevřené (konvektivní) a uzavřené (radiační).

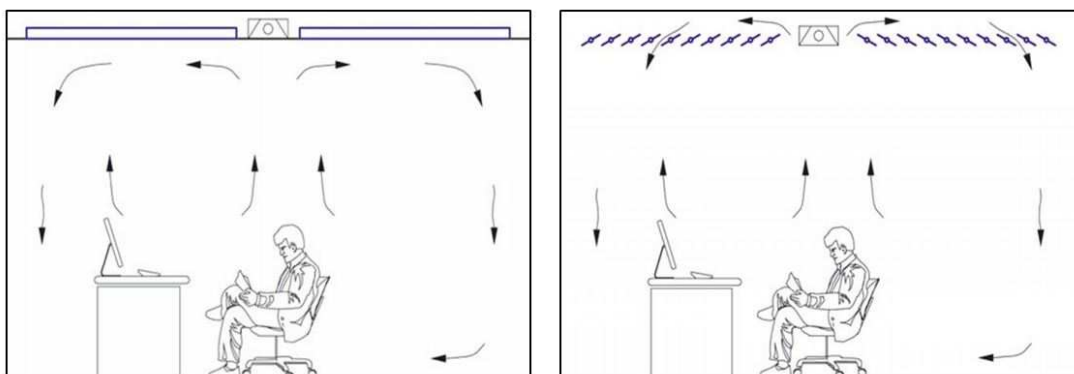
Rozdělení sálavých chladicích systémů je přehledně zobrazeno v následujícím diagramu:



Obr. 8 Rozdělení sálavých chladicích systémů [Autor]

Otevřené systémy se vyznačují především převažující konvektivní složkou tepelného toku. Tato složka přenosu tepla mezi chladicím stropem a vzduchem v interiéru může dosahovat 50 až 60 %. Jedná se o stropní systémy zpravidla lamelové konstrukce, které tvoří přiznaný pohled.

Systémy uzavřené také nazývané radiační či sálavé pracují, jak již název napovídá, převážně se sálavou složkou tepelného toku, která tvoří asi 60 % tepelného toku. Z důvodu správného sdílení tepla do místnosti by měly být systémy na zadní straně (pokud to není nežádoucí) tepelně izolovány. Tyto systémy můžeme dělit na lehké montované panely nebo masivní systémy tvořící součást stavební konstrukce. [8]



Obr. 9 Uzavřený a otevřený chladicí strop [8]

### 1.5.1 Otevřené sálavé chladicí systémy

Otevřené sálavé chladicí systémy jsou realizovány výhradně jako stropní chlazení a jak již bylo řečeno, jedná se o systémy zpravidla lamelové, jejichž konstrukce umožňuje lepší sdílení tepla mezi lamelami a obtékajícím vzduchem. Z toho důvodu je dominantním typem přenosu tepla konvekce (až 60 %). Lamelová konstrukce má rovněž větší teplosměnnou plochu, která spolu s efektivnějším způsobem sdílení tepla dává těmto systémům i větší měrný chladicí výkon a to až  $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  [5]



Obr. 10 High-capacity ceiling systems – Produkty firmy Krantz [5]

Z obrázků je dobře patrná typická konstrukce otevřených chladicích stropů. Teplonosná látka je distribuována do jednotlivých dílců. Tyto dílce jsou potom tvořeny meandrovitě uspořádaným potrubím, na které jsou z důvodu zvětšení teplosměnné plochy nalisovány lamely.

Za nevýhodu otevřených systémů lze považovat jejich poněkud průmyslový vzhled, který ovšem ve vhodném prostoru může působit velmi atraktivně.

### 1.5.2 Uzavřené sálavé chladicí systémy

Uzavřené sálavé chladicí systémy dělíme na lehké montované a masivní, které tvoří součást stavební konstrukce.

#### 1.5.2.1 Lehké montované chladicí systémy

Lehké montované chladicí systémy můžeme rozdělit na systémy kontaktní a sendvičové panely. Z hlediska konstrukce se jedná o panelové prvky s vestavěným, zpravidla meandrovitým rozvodem chladicí vody. Hlavní výhodou oproti masivním systémům je schopnost téměř okamžité reakce na změnu tepelné zátěže a také suchý montážní proces.

##### *Montované kontaktní systémy*

Montované kontaktní systémy jsou z hlediska konstrukce panelovými prvky s vestavěným meandrovitým rozvodem chladicí vody. Jednotlivé panely se kladou vedle sebe a připevňují se na kovové rošty nebo se lepí přímo na stropní konstrukci, takže vytvářejí hladký souvislý pohled.

Z hlediska materiálu se jedná o panelové prvky na bázi sádkokartonu, kovové panely nebo panely z akusticky pohltivých materiálů.



Obr. 11 Kovové panelové kontaktní systémy [5]



Obr. 12 Sádrokartonový chladicí panel [5]

### ***Chladicí sendvičové panely***

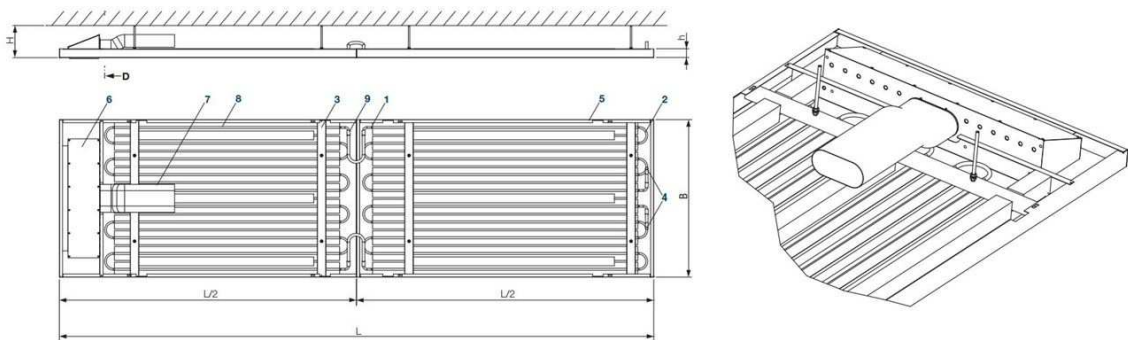
U zahraničních výrobců jsou tyto systémy zpravidla nazývány „sails“ tedy plachty. Z konstrukčního hlediska se jedná o montované panelové dílce, které obsahují chladicí registr. Jednotlivé dílce se potom zavěšují pod konstrukci podhledu (stropu).



**Obr. 13** Sendvičové chladicí panely [5]

Jednotlivé dílce jsou vyráběny v mnoha tvarových a konstrukčních provedeních a mnohdy zahrnují i prvky osvětlení. Výsledný pohled chlazeného prostoru pak může působit velmi moderním dojmem.

Některé sendvičové chladicí panely, jako například produkt firmy Krantz s obchodním názvem AVACS, obsahují i vzduchotechnické distribuční elementy.



**Obr. 14** Multifunkční sendvičový panel AVACS [5]

#### **1.5.2.2 Masivní sálové chladicí systémy**

Tyto systémy tvoří součást stavební konstrukce. Můžeme je tedy rozdělit dle umístění v obalové konstrukci chlazeného prostoru na systémy:

- stropní,
- stěnové,
- podlahové,
- celoplošné.

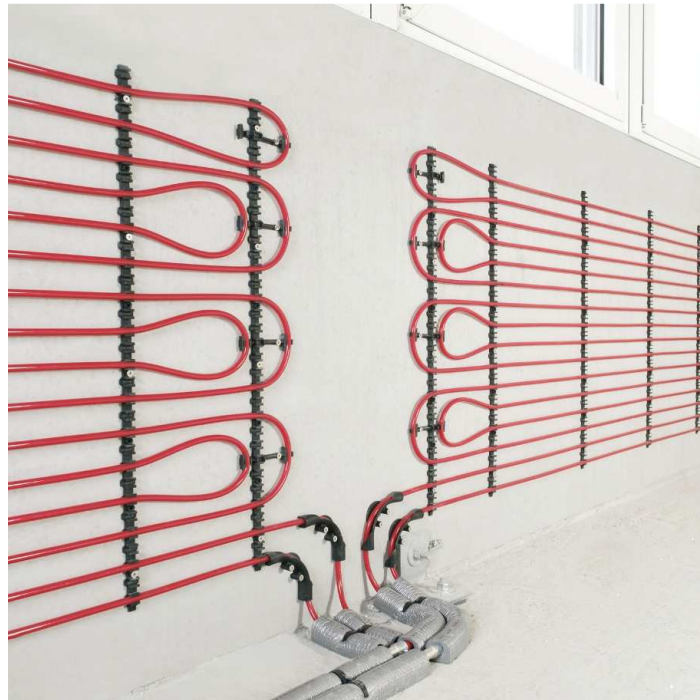
Dále můžeme masivní sálavé chladicí systémy dělit dle jejich vlastní konstrukce:

- potrubní systémy,
- systémy tvořené kapilárními rohožemi,
- tepelně aktivované konstrukce (aktivní beton).

### ***Potrubní systémy***

Tyto systémy jsou v současné době často využívány především pro podlahové vytápění. Systém je vytvořen potrubním „hadem“ vloženým do některé z vrstev stavební konstrukce ohraničující chlazený prostor.

Z důvodu zvýšení chladicího výkonu (neboť není možné snižovat teplotu chladicí vody – riziko kondenzace) se u chlazení využívá potrubí menší dimenze při menší rozteči potrubí. Tím se dosahuje i rovnoměrnější povrchové teploty chlazené konstrukce.



**Obr. 15** Stěnový potrubní systém chlazení [13]

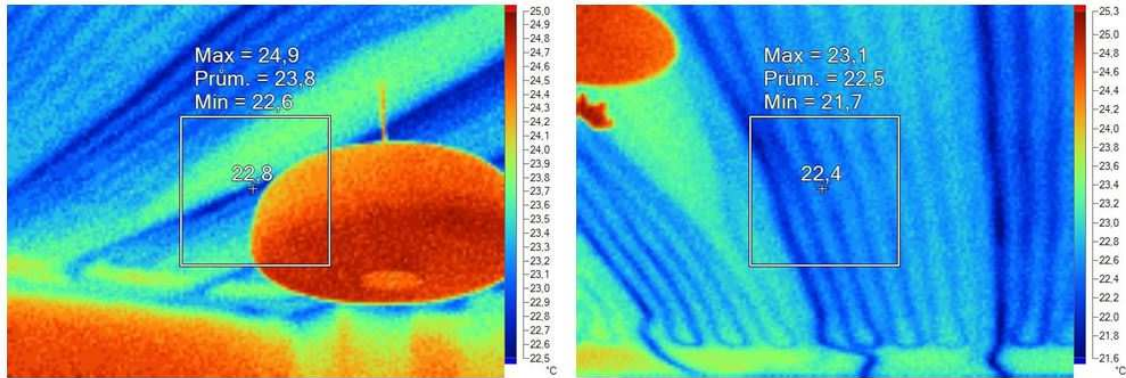
Podlahové chlazení se z důvodu nízkých výkonů příliš nenavrhuje. Jako vhodné se pro chlazení nabízí použití podlahové otopné plochy, a to zejména v prostorech, ve kterých osoby spíše procházejí, jako například vestibuly, chodby, galerie. Nicméně z důvodu omezení výkonu vlivem minimální požadované povrchové teploty podlahy lze očekávat, že podlahové chlazení odvede pouze část tepelné zátěže.[8]

Stropní a stěnové chlazení je tvořeno stejným způsobem jako podlahové. Pro uchycení potrubí se využívá například vodicích lišt. Finální povrchovou úpravu tvoří speciální omítky s dobrou tepelnou vodivostí (vhodné jsou například i hliněné omítky).



Z důvodu správného tepelného toku by měly být tyto systémy na zadní straně tepelně izolovány, aby nedocházelo ke snížení výkonu vlivem úniku tepla/chladu do okolních prostor (pokud to není žádoucí).

Většina potrubních systémů bývá s výhodou využívána pro chlazení i vytápění.



Obr. 16 Stropní chlazení – termovizní snímek [Autor]

### ***Systémy tvořené kapilárními rohožemi***

Jedná se o moderní systém, který využívá kapilární rohože – síť z tenkých plastových trubiček. Rohože jsou provedeny zpravidla z polybutenu a vnější průměr trubiček je cca 3,5 mm.

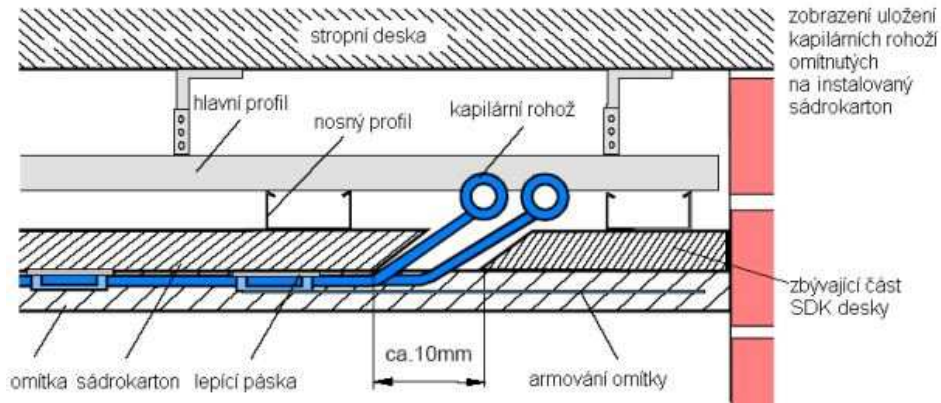


Obr. 17 Kapilární rohož [14]

Rohože mohou být instalovány mnoha způsoby:

- do omítky,
- nad sádrokarton,
- na stropní kazety,
- do samonivelační stěrky.

Nejčastějším způsobem instalace kapilární rohože je osazení do omítky na sádrokartonový podhled (obrázek 18).



Obr. 18 Schéma osazení kapilárních rohoží [14]

Rohože svojí konstrukcí zabírají minimální prostor a mohou se snadno přizpůsobit i složitým tvarům stavebních konstrukcí. Proto jsou s výhodou využívány například při rekonstrukcích historických objektů.

### ***Tepelně aktivované konstrukce***

Jedná se o zvláštní způsob potrubního systému, kdy je chladicí potrubí ve tvaru meandru uloženo přímo do betonové konstrukce – aktivace betonu. (Pro tento systém lze použít i kapilární rohože, nicméně tento způsob není příliš častý.)

Hlavním specifikem tohoto systému je velká akumulční schopnost. V důsledku toho nastává mnohahodinový časový posun tepelných zisků, a tím se vyrovnává tepelná zátěž během dne. Maximální potřeba chladu se přesouvá do doby mimo pobyt osob, do nočních hodin, kdy je volná kapacita zdrojů chladu. To je ekonomicky výhodné, neboť lze pro strojní chlazení využít levnějších tarifů za odběr elektrické energie a navíc chlazení při nižší teplotě venkovního vzduchu bude dosahovat vyšší účinnosti. [8]

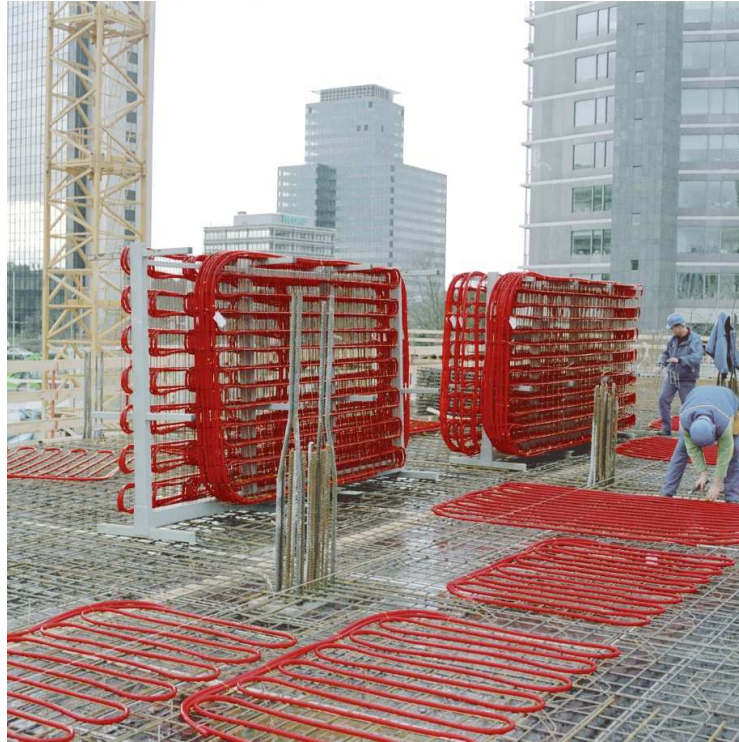
Výrazný časový posun vlivem akumulace tepla je ovšem problematický z hlediska řízení. Tyto systémy proto vyžadují sofistikované systémy řízení pracující například na principu předpovědi počasí.

Tepelně aktivovanou konstrukci je možné doplnit o elementy pro špičkovou tepelnou zátěž tzv. tepelné zásuvky.



Obr. 19 Tepelná zásuvka [14]

Tento systém chlazení je častý zejména v západní Evropě. Zkušenosti s provozem tepelně aktivovaných konstrukcí mají především v Rakousku, Německu či Švýcarsku. U nás je první větší stavbou využívající tento systém budova Národní technické knihovny v Praze, která je v provozu od roku 2009. [8]



Obr. 20 Montáž tepelně aktivované stropní konstrukce [15]

Nevýhodou tepelně aktivovaných konstrukcí je nutnost náročné koordinace s ostatními obory, a to jak v přípravné, tak v realizační fázi stavby.

## 1.6 Použití sálavých chladicích systémů

Použití sálavých systémů je určitým způsobem omezeno. Tato omezení plynou z již zmiňovaných nevýhod těchto systémů. Především ve většině případů nelze obložit těmito systémy celou plochu konstrukce. V praxi se u chladicích stropů počítá s obložením 50-70 % půdorysné plochy stropu. [16]

Přesto sálavé chladicí systémy a zejména potom chladicí stropy našly díky svým výhodám uplatnění v mnoha aplikacích.

### *Administrativní budovy*

Zřejmě nejčastěji bývají sálavé chladicí systémy navrhovány pro administrativní budovy. Systém vzduchotechniky bývá v těchto prostorech omezen na nucené 100% čerstvovzdušné větrání sloužící pro zajištění požadované dávky čerstvého vzduchu na osobu. Systém vzduchotechniky rovněž zajišťuje odvod tepla vázaného ve vodní páře.

### ***Nemocnice***

Zejména z důvodu hygienického provozu nacházejí chladicí stropy stále větší uplatnění v nemocnicích. Chladicí stropy mají v těchto aplikacích množství výhod:

- zajišťují teplotně stálé prostředí,
- neznečišťují prostor,
- jedná se o prakticky nehlukný systém,
- nezabírají místo uvnitř prostoru,
- nevyžadují údržbu uvnitř chlazeného prostoru,
- je možné je využít i pro vytápění.

Směšovací ventily potrubního systému na vstupu do chladicích stropů bývají situovány na chodbách, aby jejich případná údržba byla prováděna bez obtěžování pacientů.

Tyto systémy mohou být také s výhodou použity v zařízeních pro mentálně postižené pacienty. V těchto prostorech je vyžadována minimalizace vystupujících konstrukcí a zařízení, aby nedocházelo k jejich zničení eventuelně k sebepoškozování pacientů. [16]

### ***Průmyslové objekty***

V průmyslových objektech se tyto systémy využívají spíše zřídka. Přesto především v zemích západní Evropy našly tyto systémy uplatnění v některých odvětvích lehkého průmyslu, zejména v laboratořích.

### ***Ostatní aplikace***

Mezi další možné aplikace patří rekonstrukce starších objektů s malou konstrukční výškou, ve kterých není pro jiné systémy chlazení dostatek prostoru v podhledu. Mezi tyto objekty u nás patří i množství staveb z 50. a 60. let minulého století, které byly těmito systémy v minulosti chlazeny. [16]

## **1.7 Zajímavé aplikace z praxe**

### ***Národní technická knihovna v Praze – Aktivace betonového jádra***

Budova Národní technické knihovny v Praze je první velkou stavbou u nás, kde byla použita aktivace betonového jádra.

Stavební práce byly zahájeny v roce 2006. Veřejnosti je knihovna zcela zpřístupněna od září 2009. Jedná se o devítipodlažní objekt (6 NP + 3 PP) vystavěný na půdorysu zaobleného čtverce o rozměrech cca 75 x 75 m.

Chlazení objektu je řešeno tepelně aktivovanou konstrukcí stropu v kombinaci s automatickým systémem přirozeného větrání. Přirozené větrání se v nočních hodinách využívá pro předchlazení interiéru a betonových konstrukcí. Jedná se o systém tzv. nočního chlazení. V kombinaci s velkorozponovou nosnou konstrukcí z předpjatého betonu s modulem 15 m se patrně jedná o první stavbu tohoto druhu na světě.

Aktivace betonového jádra byla provedena na ploše téměř 10 000 m<sup>2</sup> a bylo položeno bez mála 50 000 m potrubí. [17][18]



Obr. 21 Budova Národní technické knihovny v Praze [18]

### ***Zámek Solms (Butzbach, Německo) – systém s kapilárními rohožemi***

Zámek Solms v německém Butzbachu byl zrekonstruován v letech 2009-2012. Do objektu byl citlivě začleněn systém vytápění a chlazení ve formě kapilárních rohoží a spojení historické budovy a moderních technologií je tak zcela přirozené a nijak nenarušuje původní charakter objektu.

Na zámku bylo instalováno celkem 750 m<sup>2</sup> kapilárních rohoží, které jsou umístěny ve stěnách, na stropěch i v podlahách, a to v omítkách či pod sádkartony. [19]



Obr. 22 Kapilární rohože na zámku Solms, Butzbach, Německo [19]

### ***Terminál letiště Suvarnabhumi (Bangkok, Thajsko) – potrubní systém***

Zřejmě nejrozsáhlejším potrubním systémem chlazení na světě je podlahové chlazení letištní haly v Bangkoku v Thajsku. Stavba letiště byla dokončena v roce 2006. Potrubní systém podlahového chlazení zde byl instalován na ploše téměř 150 000 m<sup>2</sup>.

Velká část střešní konstrukce haly je prosklená, což vzhledem k okrajovým podmínkám venkovního prostředí v Thajsku představuje výrazné tepelné zisky z exteriéru. Potrubní systém

podlahového chlazení s projektovanou povrchovou teplotou 21°C však teplo ve formě dopadajícího slunečního záření velmi efektivně odvádí.

Tento systém tak velmi účinně chladí třetí největší letištní terminál na světě. [8][20]



Obr. 23 Terminál letiště Suvarnabhumi, Bangkok, Thajsko [20]

## 1.8 Závěr teoretické části

Sálavé chladicí systémy jsou moderními systémy chlazení, které nabízejí zejména velmi komfortní prostředí. Tyto systémy dělíme především na otevřené (konvektivní) a uzavřené (radiační) a dále na systémy montované panelové konstrukce a systémy masivní, které tvoří zpravidla součást stavební konstrukce.

Na trhu je potom k dispozici velké množství různých typů, provedení a variant, které jsou schopny přizpůsobit se téměř jakékoliv aplikaci. Tyto systémy dílčí klimatizace se uplatňují u novostaveb i rekonstrukcí administrativních budov, nemocnic, laboratoří a v mnoha dalších aplikacích.

V současné době se tyto systémy používají zejména v zemích západní Evropy. V České republice se zejména kvůli vyšším investičním nákladům využívají spíše ojediněle. Nicméně v budoucnu lze očekávat, že z důvodu jejich energeticky úsporného provozu, stále rostoucích cen energií a možnosti využití alternativních zdrojů chladu, najdou sálavé chladicí systémy své uplatnění ve větší míře i v našich podmínkách.

## **2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

*Měření chlazení RD využívajícího zemní vrty*

## 2.1 Úvod do experimentální části

Tato část práce je věnována představení řešeného objektu a stávajícího systému stropního chlazení v objektu.

Dále je v této části charakterizován fyzický model experimentu, popsán postup měření a sledované veličiny. Výsledkem je grafická interpretace výsledků měření.

Cílem této části je získání potřebných informací pro jasnější představu o chování stávajícího systému a dále shromáždění potřebných dat pro pozdější numerické řešení tepelného chování chlazených místností při různých okrajových podmínkách.

## 2.2 Řešený objekt

Řešeným objektem je stávající rodinný dům nacházející se v Brně na katastrálním území městské části Komín. Jedná se dvoupodlažní objekt s plochou střechou zasazený do svažujícího se terénu.



Obr. 24 Pohled ze dvora – vizualizace [Investor]

Hlavním vstupem vcházíme do vstupní haly ve druhém nadzemním podlaží, ze které je přístup do garáže, šatny a schodišťového prostoru. Dále se zde nachází hygienické zázemí, šatny, dva pokoje a ložnice, z nichž je přístupný společný balkón.

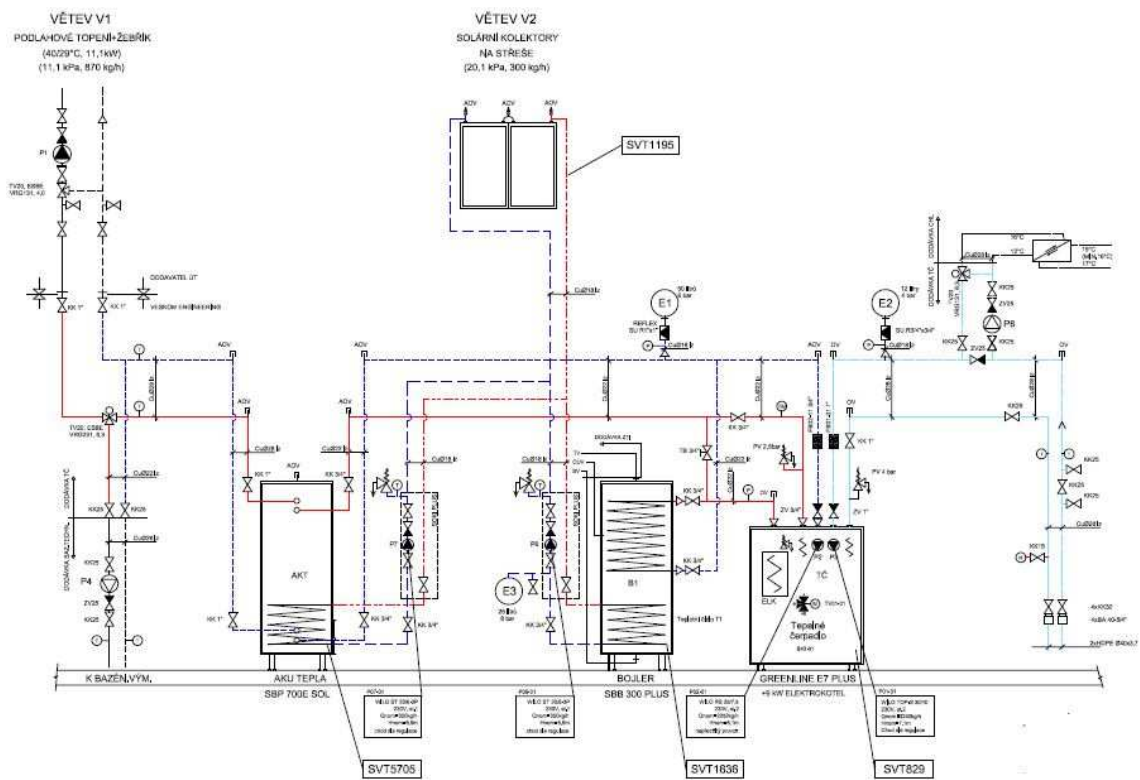
V prvním podlaží je situován hlavní obytný prostor zahrnující obývací pokoj, kuchyni a jídelnu, dále je zde pracovna, posilovna, sauna, prádelna, WC, sklad a technická místnost.





Obr. 25 Pohled z ulice – vizualizace [Investor]

Zdrojem tepla v objektu je tepelné čerpadlo GREENLINE E7 PLUS země-voda s vestavěným elektrokotlem s kaskádovým spínáním o výkonu 3 – 6 – 9 kW. V režimu chlazení je zdrojem chladu pouze zemní vrt.

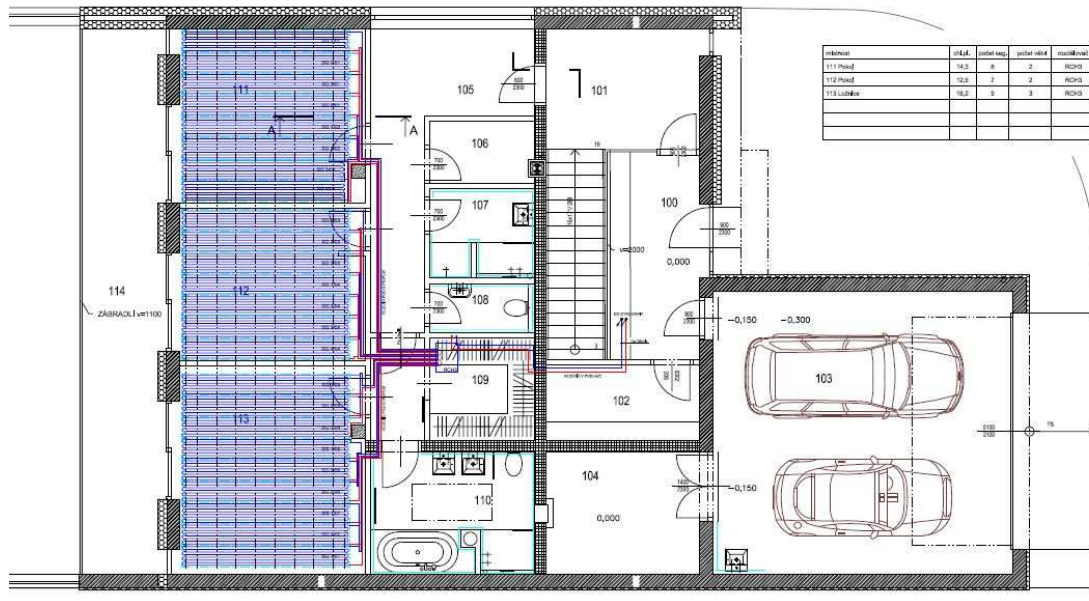


Obr. 26 Schéma zapojení strojovny [Investor]

## 2.3 Stávající systém chlazení

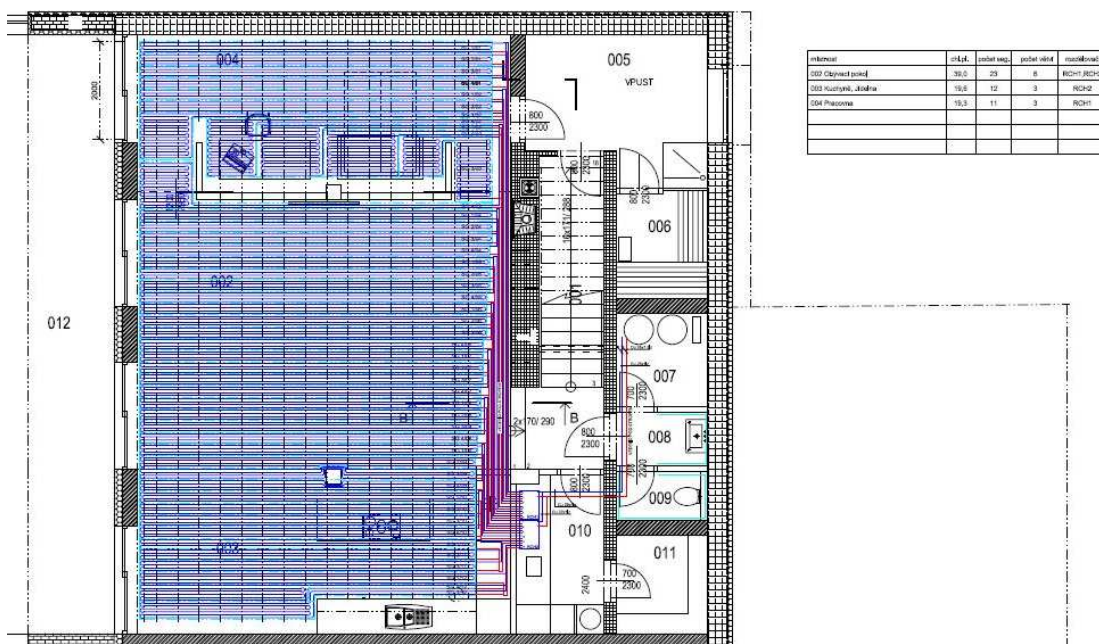
### 2.3.1 Chlazené místnosti

V objektu je instalováno stropní chlazení ve třech místnostech situovaných ve druhém podlaží. Jedná se o dva pokoje a ložnici. Prosklené plochy těchto místností jsou orientovány přibližně na jihozápad.



Obr. 27 Půdorys 2.NP [Investor]

V rámci projektové dokumentace bylo stropní chlazení navrženo i do hlavního obytného prostoru a pracovny v prvním podlaží. Nicméně tato část zařízení nebyla realizována. Jedním z důvodů byly i obavy o dostatečný chladicí výkon zemního vrtu.

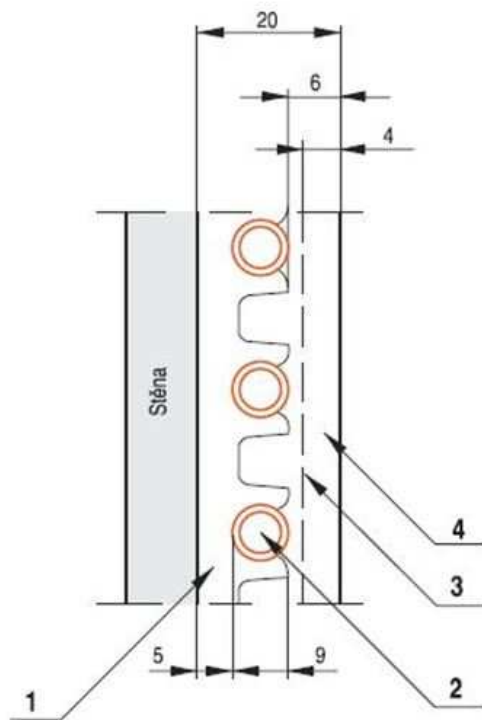


Obr. 28 Půdorys 1.NP – nerealizovaná část chlazení [Investor]

### 2.3.2 Potrubní systém chlazení

V objektu je instalován potrubní systém stropního chlazení. Jde tedy o mokrý proces. Konkrétně se jedná o systém WR8 od firmy Gabotherm.

Jednotlivé chladicí segmenty jsou tvořeny polybutenovými trubkami 8x1 mm, které jsou uloženy do vodících lišt a vytváří tak meandry s roztečí 60 mm. Výsledný potrubní had je následně zaomítán.



- 1 nástěnná upevňovací lišta GTH-WKS 8
- 2 polybutenová trubka gabotherm® 8 × 1,0 mm
- 3 sklotextilní výztuž
- 4 omítka

Obr. 29 Schéma uložení - systém Gabotherm [21]

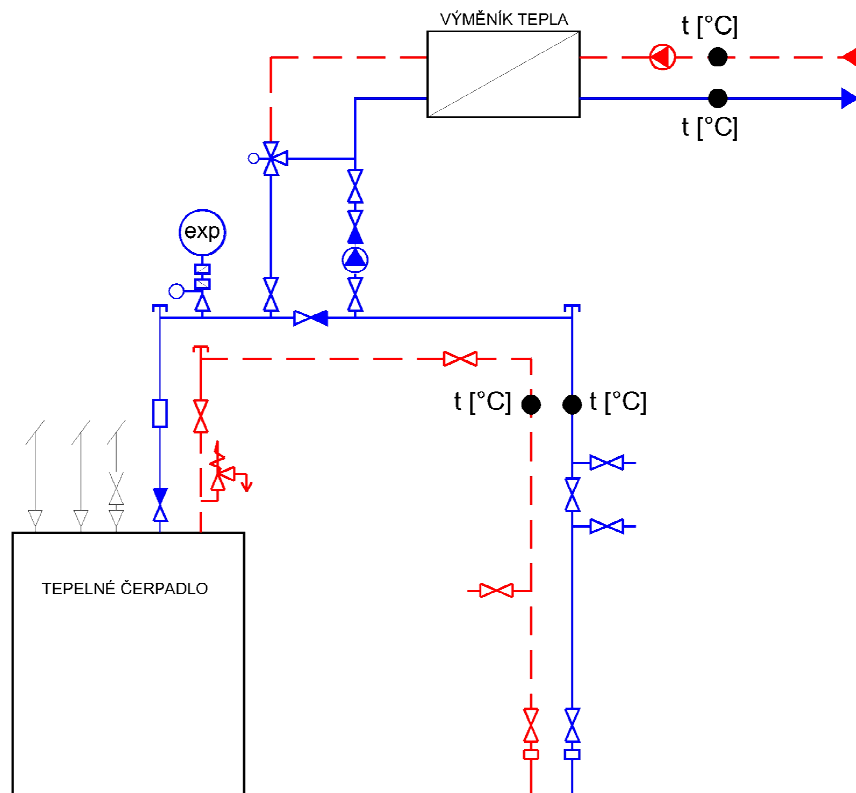
## 2.4 Dlouhodobé měření

V letních měsících roku 2014 bylo v objektu za účelem získání jasnější představy o chování systému provedeno dlouhodobé měření.

### 2.4.1 Fyzický model a sledované veličiny

Dlouhodobé měření bylo provedeno v technické místnosti a v jedné z chlazených místností – v ložnici.

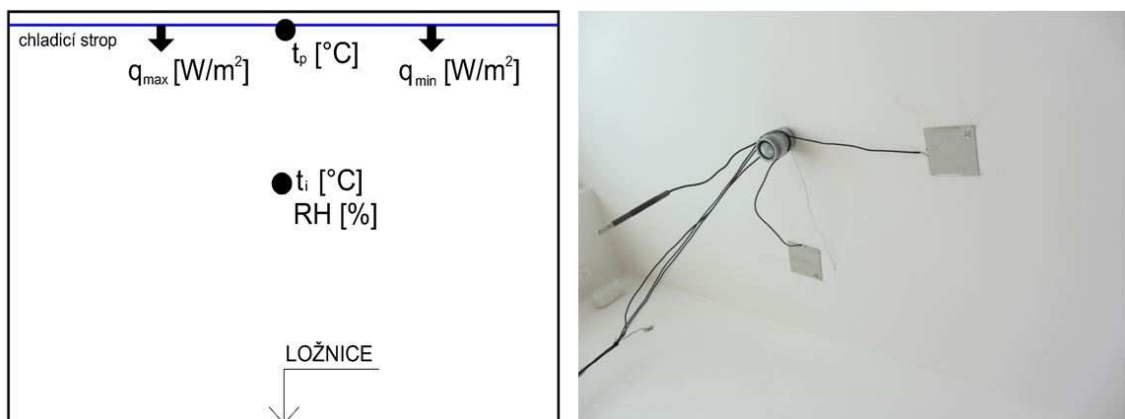
V technické místnosti byla příloženými čidly sledována teplota na přívodu a vratu primárního okruhu tepelného čerpadla (okruh zemního vrtu) a na přívodu a vratu okruhu stropního chlazení.



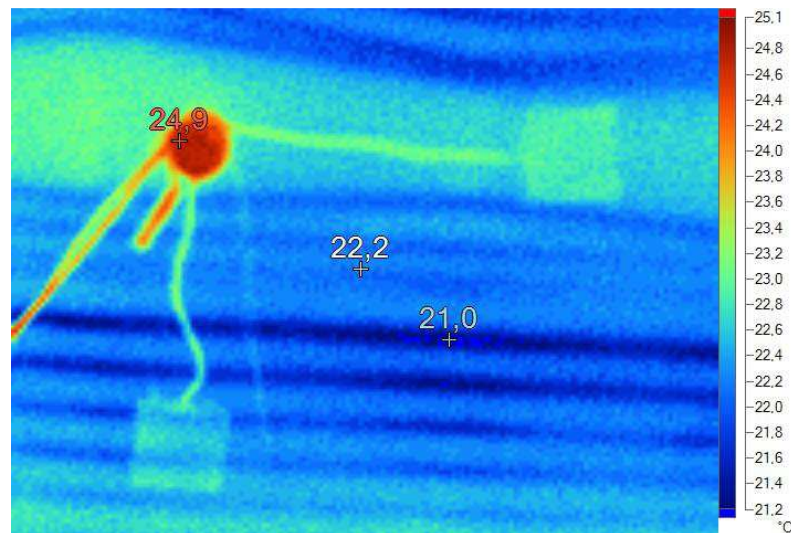
●  $t [^{\circ}\text{C}]$  ... PŘÍLOŽNÁ TEPLOTNÍ SONDY COMET

Obr. 30 Schéma osazení čidel v technické místnosti [Autor]

V jedné z chlazených místností (v ložnici) byla sledována teplota a relativní vlhkost vnitřního vzduchu, dále měrný tepelný tok v chladnější a teplejší části chladicího stropu a povrchová teplota chladicího stropu. (Teplejší a chladnější část stropu byla identifikována termokamerou.)



Obr. 31 Osazení měřicích čidel v ložnici [Autor]



$\epsilon = 95$ ,  $t_0 = 23,5 \text{ °C}$

Obr. 32 Osazení měřících čidel v ložnici [Autor]

## 2.4.2 Postup měření a měřicí přístroje

### *Měření v technické místnosti*

V technické místnosti byl instalován datalogger Comet řady S se čtyřmi vstupy. Pro snímání teplot byly použity příložné teplotní sondy Comet PST350-2/E určené pro provoz v chemicky neagresivním prostředí s rozsahem teplot -30 až +130 °C.

Přesnost čidla je  $\pm(0,15 + 0,002|t|)$  °C, tedy například při měřené teplotě 15 °C je přesnost čidla  $\pm 0,18$  °C.



Obr. 33 Datalogger a příložná teplotní sonda Comet [22]

**Měření v ložnici**

V ložnici byla instalována měřicí ústředna firmy Ahlborn – Almemo 3290.



Obr. 34 Měřicí ústředna a čidla Ahlborn [23]

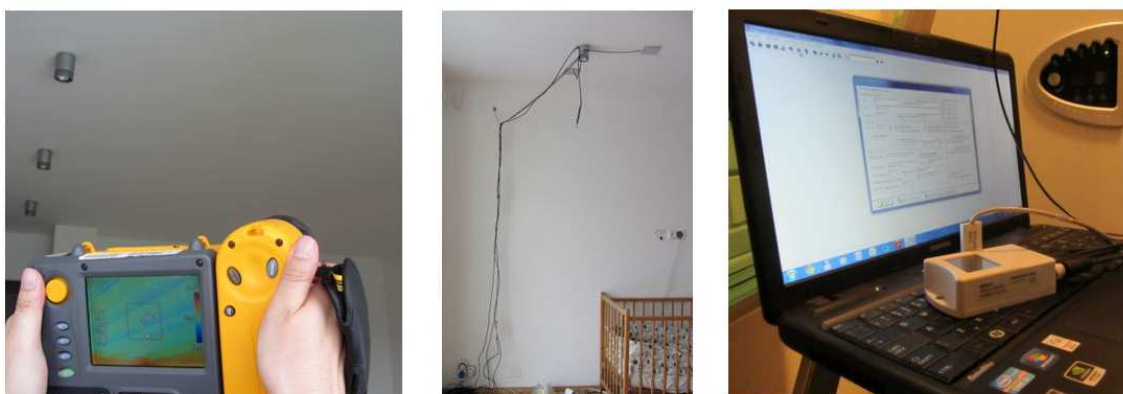
Pro snímání parametrů vnitřního vzduchu bylo použito digitální čidlo Ahlborn FHAD36RS zobrazující čtyři veličiny – teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, teplotu rosného bodu a atmosferický tlak. Pracovní teplota čidla je -40 až +100 °C

Přesnost čidla:

- relativní vlhkost       $\pm 1,3 \%$  v rozsahu 0 až 100 % při teplotě 23 °C,
- teplota                     $\pm 0,2 \text{ °C}$  při 23 °C,
- atmosferický tlak       $\pm 2,5 \text{ mbar}$  v rozsahu 700 až 1100 mbar.

Měrný tepelný tok byl snímán dvěma snímači FQA018C o rozměrech 120 x 120 x 1,5 mm od firmy Ahlborn s odolností do +80 °C. Přesnost snímače je  $\pm 1 \%$  z naměřené hodnoty.

Povrchová teplota stropu byla měřena termočláňkovým drátem typu K firmy Ahlborn s rozsahem použití -50 až +400 °C s přesností  $\pm 1,1 \text{ °C}$  nebo 0,75 % (platí vyšší hodnota).



Obr. 35 Fotografie z měření [Autor]

Krok měření byl v obou případech nastaven na 15 minut. Měření probíhalo od 22. července do 14. srpna loňského roku, tedy přibližně tři týdny. Po dokončení měření byla data z ústředny a dataloggeru stažena přes USB rozhraní do počítače a následně zpracována.

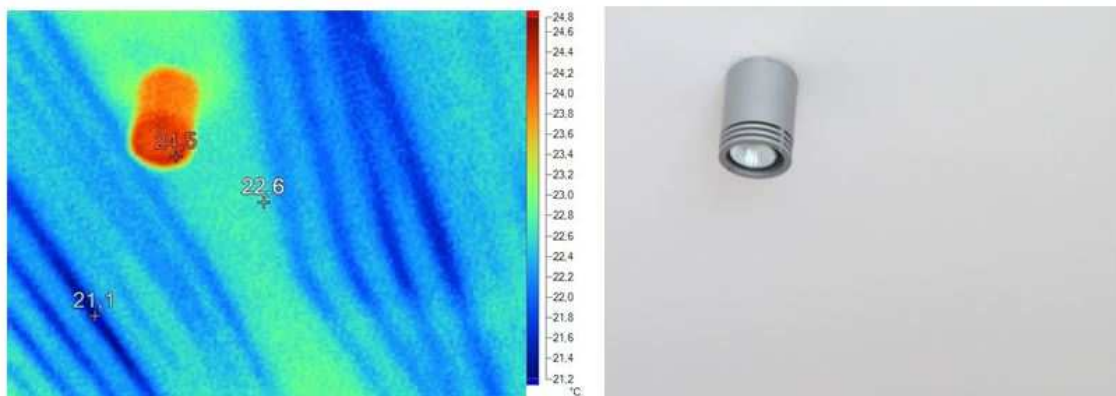
## 2.5 Měření termokamerou

Pro zjištění aktuální funkčnosti chlazení, přesného umístění potrubí chladicího stropu a polohy chladnějších a teplejších částí stropu byla vytvořena termovizní dokumentace chladicího stropu. Pro tyto účely byla použita termokamera Fluke TI-55FT s rozsahem  $-20$  až  $+600$  °C a citlivostí  $0,05$  °C při  $30$  °C. Přesnost měření termokamerou je  $\pm 2$  °C nebo  $\pm 2$  % (platí vyšší hodnota). Termokamera má vysokou citlivost pro zobrazení teplotních rozdílů ( $< 0,07$  °C).



Obr. 36 Termokamera Fluke TI-55FT [24]

### Ukázka z termovizní dokumentace



$$\epsilon = 0,95, t_0 = 23,5 \text{ °C}$$

Obr. 37 Detail stropu okolo bodového světla [Autor]

Další snímky termovizní dokumentace stropu jsou součástí příloh.

## 2.6 Měření průtoku

Programovatelným přenosným příložným ultrazvukovým průtokoměrem CONTROLTRON Uniflow 1010DP3 byl změřen průtok chladicí vody v okruhu stropního chlazení. Měření bylo provedeno v technické místnosti na potrubí HDPE 32x3.

Průtokoměr pracuje na principu měření času průchodu ultrazvukového signálu kapalinou (princip Transit time). Použitý typ přístroje umožňuje měření průtoku v potrubí DN 6 až DN 125.

### *Naměřené rychlosti v potrubí*

Nastavení čerpadla	[m/s]
minimální průtok	0,47
<b>Průtok po dobu dlouhodobého měření</b>	<b>0,67</b>
maximální průtok	1,20

Tab. 2 Rychlost v potrubí HDPE 32x3

Přesnost měření odpovídá  $\pm 1\%$  z naměřené hodnoty

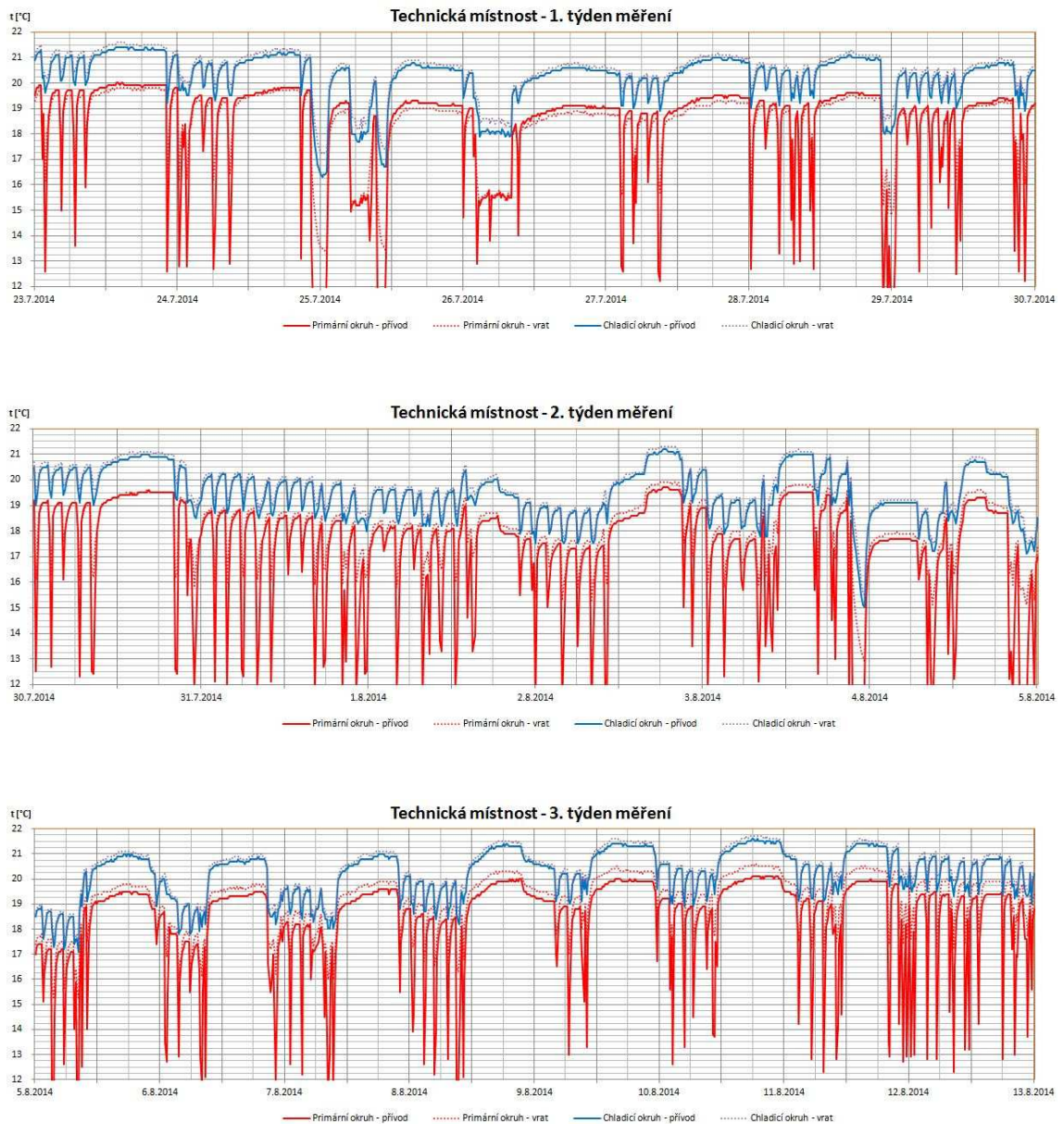
Následující strany této části práce jsou věnovány grafickému zobrazení naměřených hodnot a jejich zhodnocení.



## 2.7 Výsledky měření

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky dlouhodobého měření ze strojovny a z technické místnosti v průběhu celého měřeného období.

### 2.7.1 Technická místnost – průběh teplot

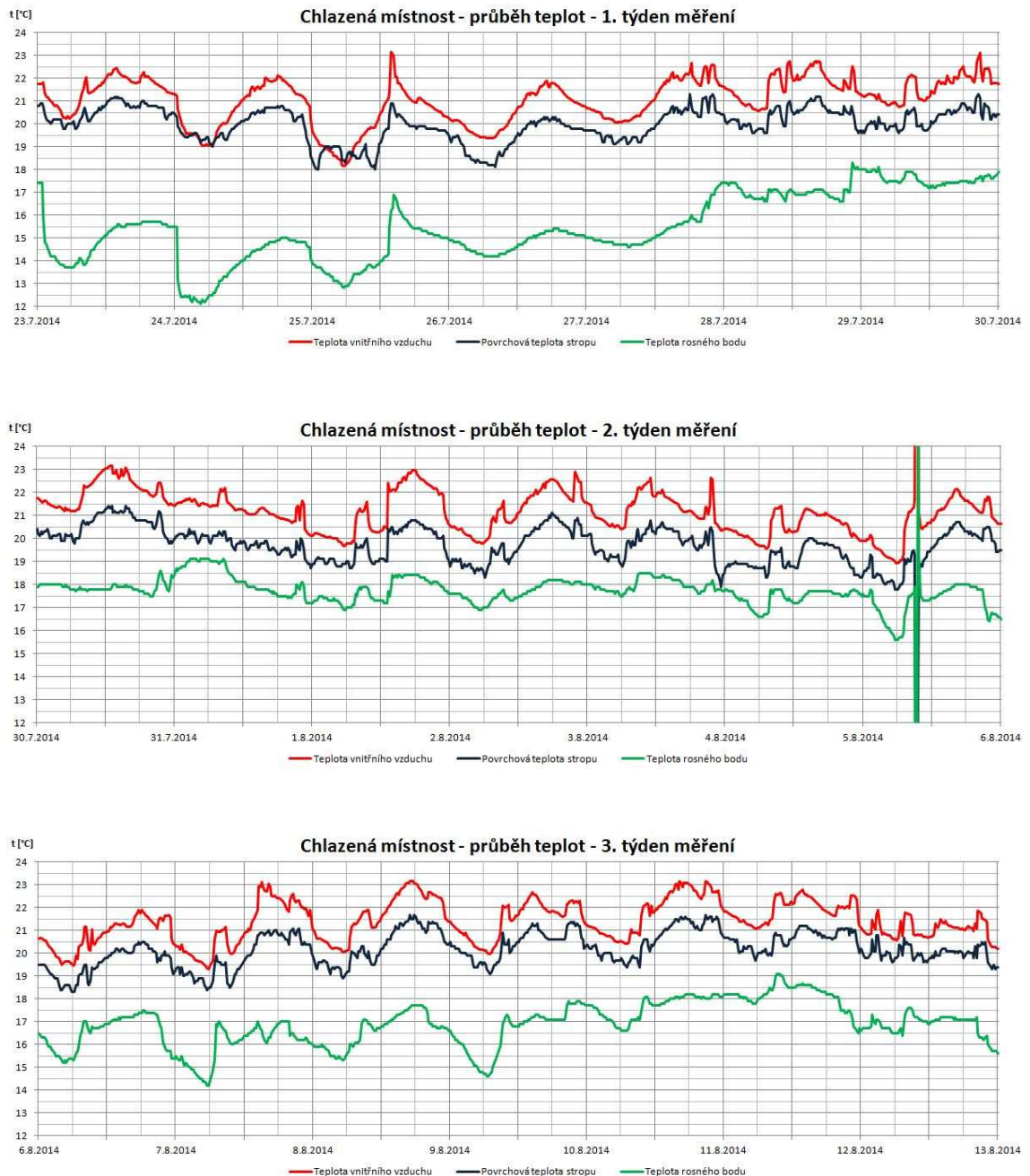


**Obr. 38** Technická místnost – průběh teplot [Autor]

Z grafické interpretace výsledků dlouhodobého měření v technické místnosti je patrné, že systém stropního chlazení pracuje s velmi malým teplotním spádem, který po celou dobu měření nepřekročil 0,5 K. Průběh teplot na primárním okruhu také ukazuje, že chlad je z vrtu odebírán značně nesouvisle a s výjimkou 31. července až 1. srpna téměř minimálně.

Z výše uvedeného lze říci, že stávající systém stropního chlazení je vzhledem k chladicímu výkonu zemního vrtu značně předimenzovaný. Nicméně v projektové dokumentaci bylo počítáno se stropním chlazením i v prvním podlaží.

## 2.7.2 Ložnice – průběh teplot



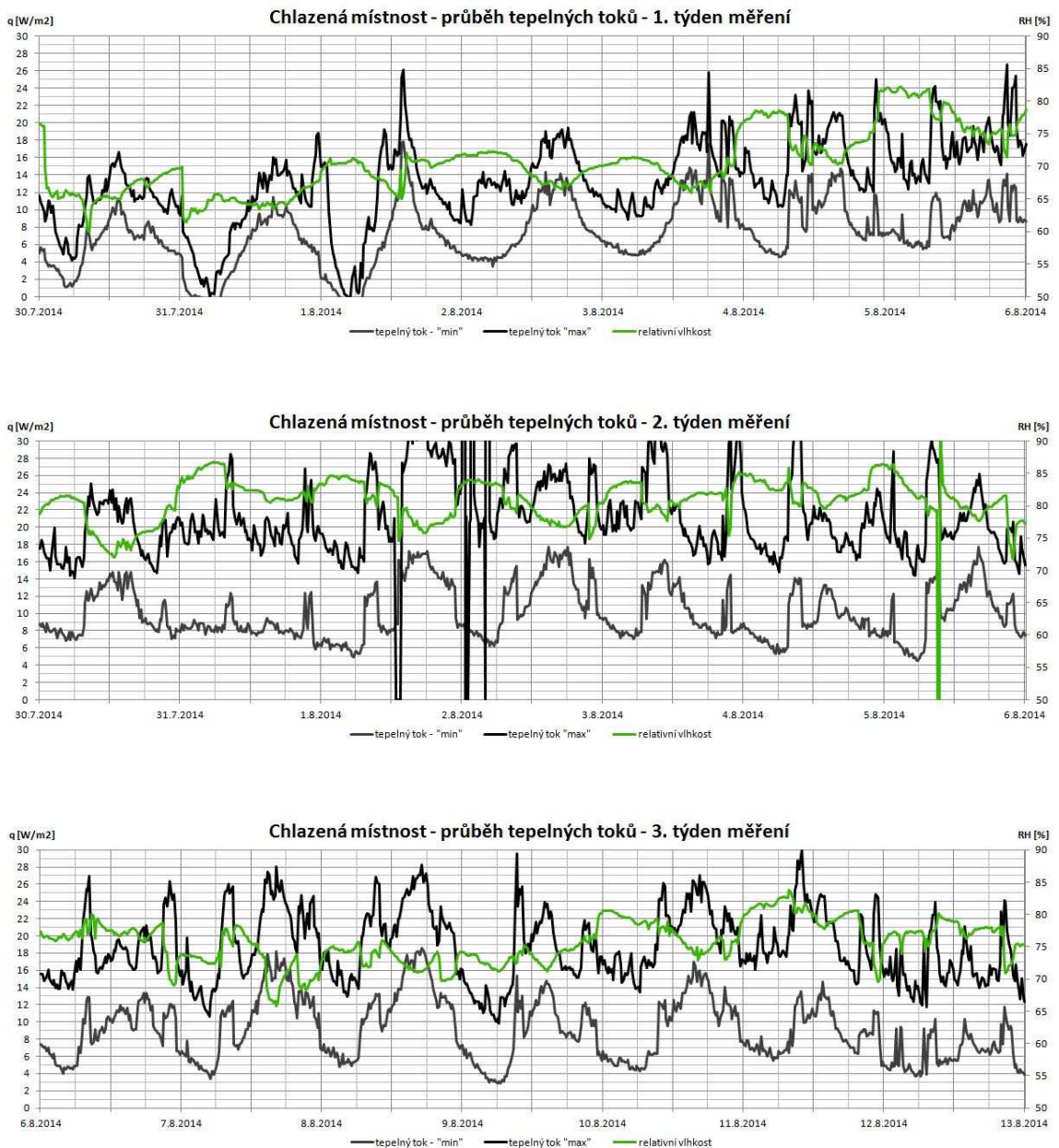
Obr. 39 Ložnice – průběh teplot [Autor]

Z průběhu teplot naměřených v chlazené místnosti – v ložnici je patrné, že teplota interiéru v měřeném období výrazně nepřesáhla 23 °C a tedy, že stropní chlazení má dostačující chladicí výkon. Téměř po celou dobu měření je povrchová teplota chladicího stropu nižší než teplota vnitřního vzduchu, a tedy strop po celé měřené období místnost chladí. (Měřena povrchová

teplota není průměrnou hodnotou, neboť byla měřena pouze v jedné, spíše v chladnější části stropu.)

Zelená křivka znázorňující teplotu rosného bodu se místy nebezpečně blíží povrchové teplotě stropu a reálně tak hrozí kondenzace vodní páry na chladicí ploše. Tento problém pak 5. srpna v dopoledních hodinách po určitou dobu skutečně nastal.

### 2.7.3 Ložnice – průběh tepelných toků a relativní vlhkosti



**Obr. 40** Ložnice – průběh tepelných toků a relativní vlhkosti [Autor]

Z výsledků měření je patrné, že v chlazené místnosti je poměrně vysoká relativní vlhkost vzduchu, která v extrémech dosahuje až 85 % a v praxi tak ukazuje jednu z velkých nevýhod sála-

vých chladicích systémů, a to neschopnost odvádět teplo vázané ve vodní páře, díky čemuž tyto systému neumožňují řízení vlhkosti v interiéru.

Z průběhu tepelných toků je zřejmý poměrně malý měrný výkon chladicích stropů. Chladicí strop se tak jeví jako předdimenzovaný.

## 2.8 Ověření naměřených hodnot

Naměřené hodnoty byly následně vzájemně početně porovnány.

### 2.8.1 Měrný tepelný tok

Měrný tepelný tok chladicím stropem byl v řešené místnosti měřen v „chladnější“ a „teplejší“ části stropu alfametry. Průběh tepelného toku získaný těmito čidly byl vzájemně porovnán s tepelným tokem vypočteným z teploty vnitřního vzduchu a povrchové teploty chladicího stropu.

$$q_{str} = \alpha \cdot (t_{str} - t_i) \quad (3)$$

Vzhledem k předpokladu, že průběh vypočteného tepelného toku bude ležet mezi průběhem naměřeného „maximálního“ a „minimálního“ tepelného toku, byl predikován součinitel přestupu tepla stropu  $\alpha_i = 9 \text{ W.m}^{-2}$ . Tato hodnota tepelného toku byla rovněž vstupní hodnotou pro matematicko-fyzikální model.



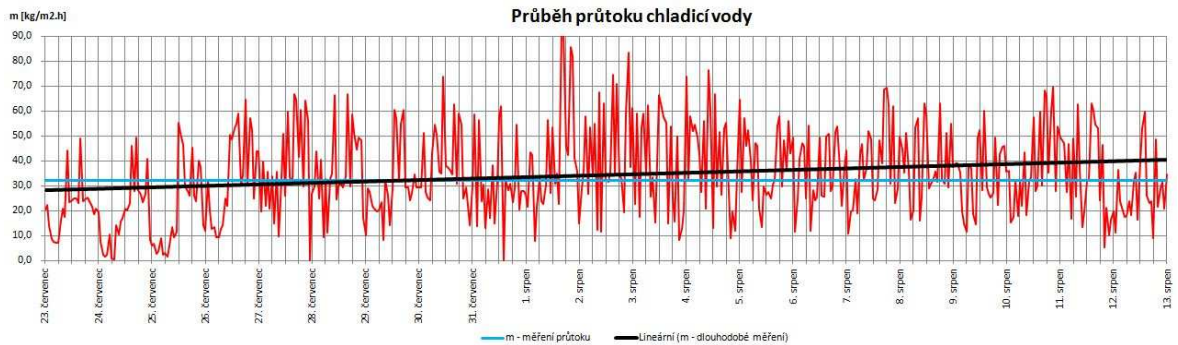
Obr. 41 Průběh měrného tepelného toku [Autor]

### 2.8.2 Měrný průtok chladicí vody

Průtok chladicí vody byl měřen ultrazvukovým průtokoměrem na vstupu do okruhu stropního chlazení. Z předpokladu rovnoměrného průtoku chladicími stropy byl vypočten měrný průtok chladicí vody v chladicím stropu.

$$m_{spec} = \frac{q_{str}}{1,163 \cdot (t_{w2} - t_{w1})} \quad (4)$$

Tato hodnota byla porovnána s měrným průtokem chladicí vody stanoveným z vypočtené hodnoty měrného tepelného toku a naměřeného teplotního spádu chladicí vody.



Obr. 42 Měrný průtok chladicí vody [Autor]

Graf ukazuje, že hodnota průtoku chladicí vody vypočtená z měrného tepelného výkonu a teplotního spádu značně kolísá, přestože čerpadlo na okruhu stropního chlazení bylo nastaveno na konstantní výstupní tlak. Tato chyba je zřejmě způsobena velmi malým teplotním spádem chladicí vody, který se pohybuje na hranici přesnosti použitých čidel.

Nicméně lineární aproximace takto vypočtených hodnot poměrně dobře odpovídá měrnému průtoku získaného z objemového průtoku chladicí vody, který byl naměřen ultrazvukovým průtokoměrem. Měrný průtok chladicí vody se tedy pohybuje okolo  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .

## 2.9 Závěr experimentální části

V rámci experimentální části práce byl představen řešený objekt, kterým je stávající rodinný dům nacházející se v Brně a popsán současný stav systému stropního chlazení.

Dále bylo v této části popsáno provedené měření, měřicí přístroje a sledované veličiny. V ložnici a v technické místnosti bylo za účelem získání jasnější představy o chování systému instalováno dlouhodobé měření. Chladicí stropy byly zdokumentovány termokamerou a v technické místnosti byl ultrazvukovým průtokoměrem zjištěn objemový průtok chladicí vody v okruhu stropního chlazení. Naměřené hodnoty byly následně početně vzájemně porovnány a byla tak ověřena jejich relevantnost.

Z grafické interpretace naměřených hodnot je dobře patrné tepelné chování systému v měřeném období.

Vzhledem k tomu, že teplota interiéru po celou dobu měření výrazně nepřekročila  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , teplotní spád chladicí vody je minimální (pohybuje se v desetinách stupně) a naměřený chladicí výkon stropu je relativně malý, lze říci, že stávající systém chlazení je značně předimenzovaný.

V chlazené místnosti byla naměřena vysoká relativní vlhkost, která v extrémech překračovala hranici 85 %. Tento fakt je způsoben skutečností, že sálavé chladicí systémy obecně neumožňují odvádět latentní teplo a regulovat tak vlhkost. S vysokou relativní vlhkostí roste i riziko kon-

denzace vodních par na povrchu chladicího stropu. V průběhu měřeného období (5. srpna) dokonce kondenzace reálně nastala.

Díky tomu, že chlad je ze zemního vrtu odebírán minimálně, nedochází v měřeném období k výraznějšímu ohřívání vrtu. Chladicí výkon zemního vrtu tedy převyšuje potřebu chladu v chlazených místnostech. V praxi se tak ukazuje vhodnost zemského polomasivu, jako zdroje chladu pro sálavé systémy chlazení. (Pro jasnější představu o tepelném chování zemního vrtu by bylo vhodné dlouhodobější například celoroční měření.)

### **3. SIMULAČNÍ ŘEŠENÍ**

*Optimalizace chlazení RD využívajícího zemní vrty*

### 3.1 Úvod do simulačního řešení

Předmětem této části diplomové práce je tvorba matematicko-fyzikálního modelu tepelného chování místnosti chlazené chladicím stropem v softwaru CalA. Model tvoří charakteristický výřez chlazené místnosti a konstrukcí ve styku s vnějším prostředím. Výpočet tepelného chování místnosti je založen na numerickém řešení nestacionárního sdílení tepla vedením ve 2D.

Vytvořený model byl následně verifikován. Numerickou simulací vypočtený průběh tepelného chování chlazené místnosti byl porovnán s hodnotami získanými experimentálním měřením v řešeném objektu za stejných okrajových podmínek.

Vybrané naměřené hodnoty, výpočty okrajových podmínek a výstup z numerického řešení tepelného chování jsou součástí příloh.

Cílem simulačního řešení je verifikace fyzikálního modelu při známých okrajových podmínkách a následné numerické simulace jednotlivých scénářů možných optimalizací stávajícího systému a jejich zhodnocení (např. tepelné chování místnosti bez vlivu stropního chlazení, optimalizace systému MaR).

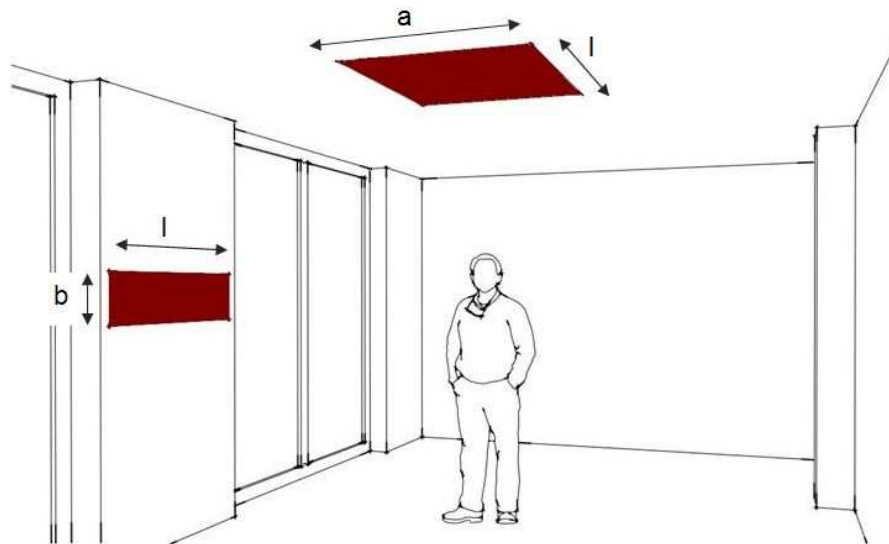
## 3.2 Matematicko-fyzikální model

### 3.2.1 Geometrie modelu

Geometrie modelu vychází ze skutečné geometrie chlazené místnosti (ložnice) v řešeném rodinném domě.

Matematicko-fyzikální model je založen na dvojdimenzionálním výpočtu vedení tepla. Geometrie modelu je tvořena charakteristickým výsekem chladicího stropu, ke kterému je přiřazen ekvivalentní výsek obvodové stěny. Mezi tyto vrstvy je potom vložena vrstva vnitřního vzduchu odpovídající z hlediska geometrie kvádrů o podstavě shodné s výsekem stropu a výšce shodné se světlou výškou místnosti. Reálná místnost je tak pro výpočet zjednodušena ze 3D na 2D.



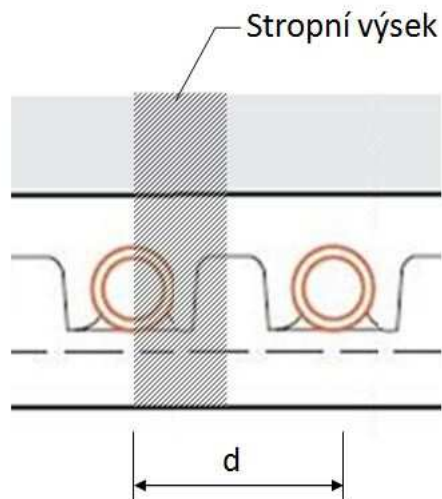


Obr. 43 Ekvivalentní plocha [Autor]

Poměr ploch jednotlivých výšek odpovídá vzájemnému poměru ploch stropu (střechy) a obvodové stěny.

$$\frac{A_{stropu}}{A_{stěna}} = \frac{a}{b} \quad (l = 1 \text{ m}) \quad (5)$$

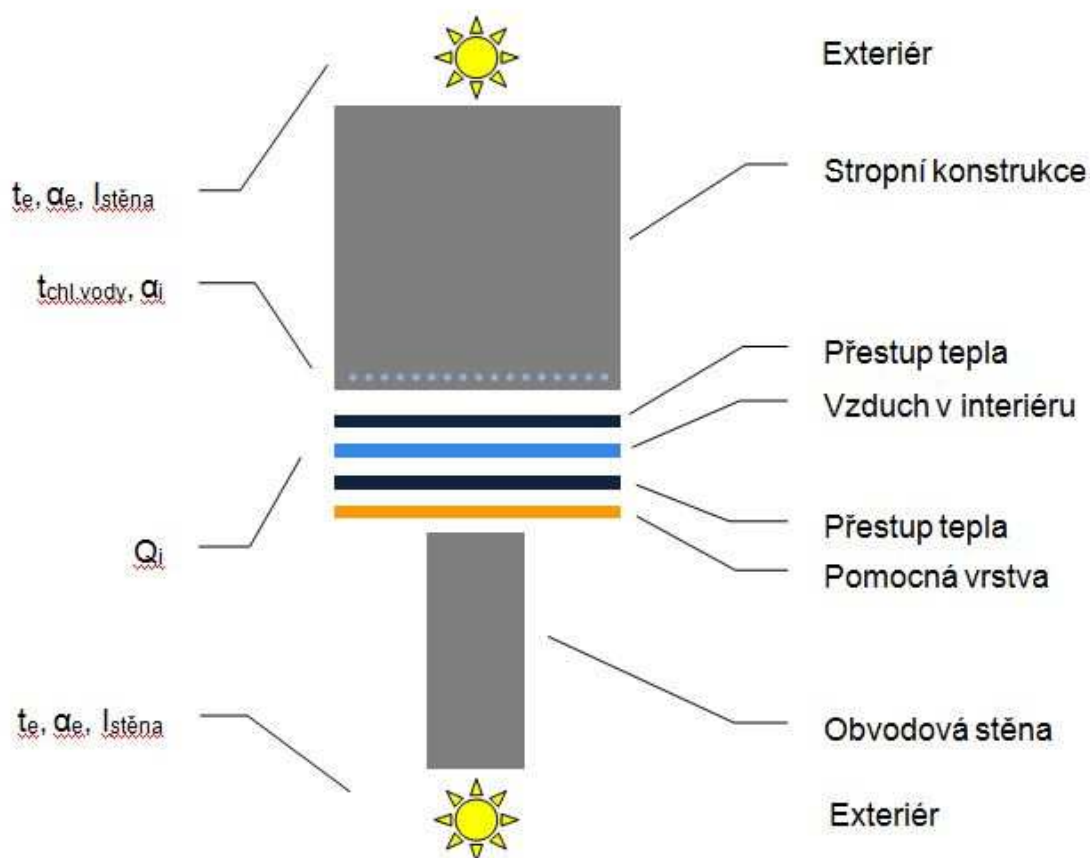
Z důvodu optimalizace modelu a snížení časové náročnosti numerického výpočtu byla šířka stropního výseku „a“ zvolena jako polovina osové vzdálenosti potrubí stropního chlazení „d“. Z hlediska prostorové diskretizace byl model rozdělen čtvercovou sítí 1,5 x 1,5 mm.



Obr. 44 Charakteristický výsek chladicího stropu [Autor]

### 3.2.2 Fyzikální představa

Fyzikální model tedy vychází z geometrie reálné místnosti, kterou zjednodušuje pro výpočet ve 2D. Model se sestává z jednotlivých vrstev a okrajových podmínek:



Obr. 45 Model – fyzikální představa [Autor]

Z obrázku je patrná fyzikální představa modelu a přijatá zjednodušení. Model je tvořen zejména konstrukčními vrstvami ve styku s vnějším prostředím, mezi které je vložena vrstva vnitřního vzduchu. Numerický model tak přímo zohledňuje vliv akumulace tepla v těchto konstrukcích a umožňuje výpočet povrchových teplot. Nevýhodou tohoto geometrického zjednodušení je zanedbání tepelného toku vnitřními konstrukcemi z místností s jinou teplotou vzduchu.

Dalšími vrstvami jsou vrstvy charakterizující přestup tepla a vrstva pomocná, která zajišťuje správné sdílení tepla mezi vrstvami, jež mají z důvodu geometrické idealizace rozdílnou šířku.

Optimalizovanému modelu jsou potom přiřazeny jednotlivé okrajové podmínky. Na hranici s exteriérem je to intenzita celkové dopadající sluneční radiace  $I_D + I_d$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ], teplota vnějšího vzduchu  $t_e$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] a součinitel přestupu tepla  $\alpha_e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]. V místě potrubí stropního chlazení je okrajovou podmínkou teplota chladicí vody  $t_{\text{chl.vody}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] a součinitel přestupu tepla  $\alpha_i$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]. Vrstvě vnitřního vzduchu je potom přiřazena tepelná zátěž místnosti [ $\text{W}$ ]. Jedná se tedy o okrajové podmínky typu Neuman a Newton. Zbývající hranice modelu pak tvoří adiabatická okrajová podmínka.

### 3.2.2.1 Konstrukční vrstvy

Konstrukce byly zadány dle souvrství uvedených v projektové dokumentaci stavby. Fyzikální vlastnosti jednotlivých vrstev jsou převzaty z technických listů navržených materiálů, případně zadány v obvyklých mezích. Folie, asfaltový pás a textilní rohože byly v modelu zanedbány.

#### *Souvrství střešní konstrukce*

Vrstva	d [mm]	$\lambda$ [W/m.K]	c [J/kg.K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Kačírek	100	0,65	750	1650
Filtek 300 g/m <sup>2</sup>	-	-	-	-
TI - XPS	40	0,034	2060	30
Filtek 300 g/m <sup>2</sup>	-	-	-	-
Folie Alkor 1,5 mm	-	-	-	-
TI - EPS 100S	80	0,037	1270	40
TI - EPS 70S	160	0,039	1270	40
Glastek 40	-	-	-	-
ŽB deska	200	1,58	1020	2400
Stropní omítka	20	0,45	840	1450

Tab. 3 Střešní konstrukce

#### *Souvrství obvodová konstrukce*

Vrstva	d [mm]	$\lambda$ [W/m.K]	c [J/kg.K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Omítka	20	0,45	840	1450
PTH 30 P+D	300	0,23	960	850
TI - minerální vlákna	180	0,04	960	150
Omítka	20	0,45	840	1450

Tab. 4 Obvodová konstrukce

### 3.2.2.2 Speciální vrstvy

#### *Přestup tepla*

Součástí modelu jsou dvě vrstvy nahrazující přestup tepla ze stropu a ze stěny do vrstvy vnitřního vzduchu. Tyto vrstvy jsou zadány ekvivalentním součinitelem tepelné vodivosti a zanedbatelnou měrnou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností.

Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti je vypočten dle vztahu:

$$\lambda = \alpha \times d \quad (6)$$

Kde „d“ je tloušťka vrstvy odpovídající jednomu dílku rastru.

Hodnota součinitele přestupu tepla u chladicího stropu byla predikována z průběhu naměřeného a dopočteného měrného tepelného toku a následně optimalizována při validaci modelu.

Součinitel přestupu tepla u stěny byl zjednodušeně uvažován dle návrhových parametrů normy ČSN 73 0540-3 *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové parametry* a tedy  $\alpha_i = 8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

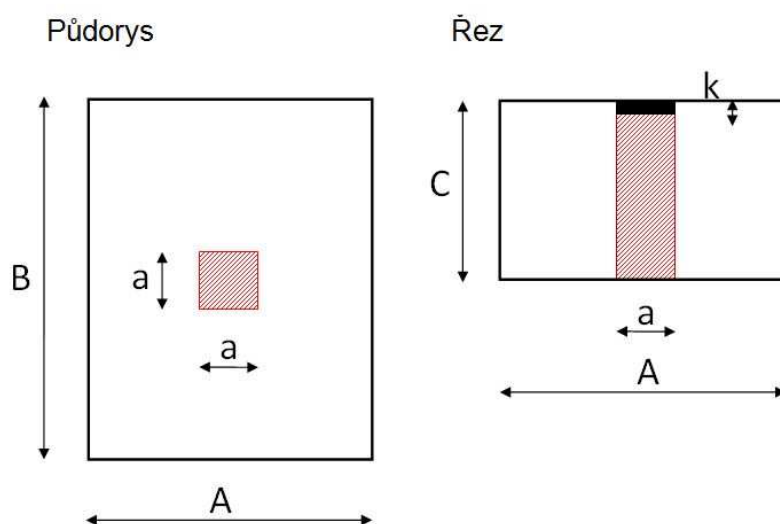
Pro zjednodušení výpočtu byly hodnoty součinitelů přestupu tepla uvažovány jako konstantní.

### **Vrstva vnitřního vzduchu**

Zásadní částí modelu je vrstva reprezentující vzduch v interiéru. Tloušťka této vrstvy odpovídá jednomu dílku rastru a je tedy nutné zavést ekvivalentní fyzikální vlastnosti vzduchu. Této vrstvě je navíc přiřazena okrajová podmínka zahrnující tepelné zisky interiéru.

Součinitel tepelné vodivosti vrstvy je volen  $\lambda = 0,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a zjednodušeně tak zahrnuje vedení i konvekci v interiéru.

Ekvivalentní objemová hmotnost je odvozena z geometrie místnosti, tak aby hmotnost této vrstvy reprezentovala hmotnost celého charakteristického výseku.



**Obr. 46** Geometrie místnosti [Autor]

Ekvivalentní objemová hmotnost je vypočtena dle vztahu:

$$\rho_{ekv.} = \rho_{vzd} \times \frac{C}{k} \quad (7)$$

Kde „k“ je velikost kontrolního objemu (jeden dílek rastru)

Měrná tepelná kapacita vrstvy vnitřního vzduchu se rovná součtu měrné tepelné kapacity vzduchu ( $c = 1010 \text{ J/kg.m}^3$ ) a měrné tepelné kapacity konstrukcí akumulujících teplo (především horní vrstvy podlahy). Akumulace tepla v obvodové stěně a ve střešní konstrukci je z principu modelu přímo zohledněna výpočtem.

**Pomocná vrstva**

Z důvodu rozdílných ploch konstrukcí, tedy rozdílné šířky střešní konstrukce a obvodové stěny v modelu, je zavedena pomocná vrstva zajišťující rovnoměrné sdílení tepla mezi konstrukcemi.

Tato vrstva je zadána zanedbatelnou měrnou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností a relativně vysokou tepelnou vodivostí ( $\lambda = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

**3.2.2.3 Okrajové podmínky****Teplota venkovního vzduchu -  $t_e$ ,  $\alpha_e$** 

Teplota venkovního vzduchu je zadána jako reálná teplota venkovního vzduchu v měřeném období získaná z meteorologické stanice.

Součinitel přestupu tepla je ve skutečnosti závislý na čase a je funkcí mnoha veličin, zejména pak rychlosti proudění tekutiny, respektive vzduchu. Pro potřebu modelu byl součinitel přestupu tepla zjednodušeně uvažován jako konstantní s hodnotou dle návrhových parametrů normy ČSN 73 0540-3 *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové parametry* a tedy  $\alpha_e = 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

**Intenzita sluneční radiace -  $I_{str}$ ,  $I_{stěna}$** 

Sluneční radiace je v modelu definována jako intenzita dopadající celkové sluneční radiace na plochou střechu a na rovinu obvodové stěny. Hodnoty sluneční radiace v měřeném období byly získány z meteorologické stanice na Stavební fakultě a byly přepočteny dle metodiky ČSN 73 0548 *Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů*.

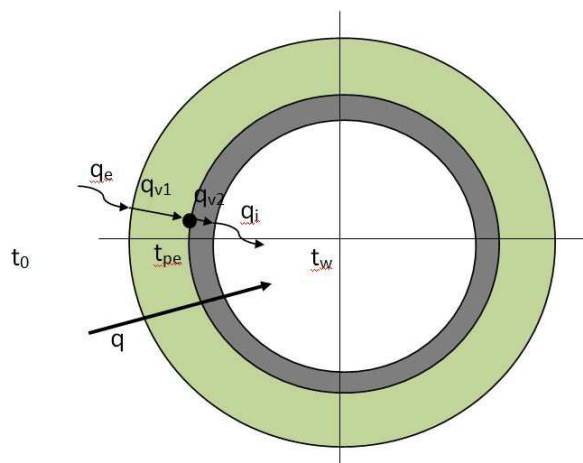
Pro potřebu modelu v softwaru CalA bylo nutné vypočítat ekvivalentní sluneční radiaci působící na jeden dílek zvoleného rastru. Přepočet byl proveden dle vztahu:

$$I_{ekv.} = I_{dop} \times k \quad (8)$$

Kde „k“ je velikost kontrolního objemu (jeden dílek rastru)

**Teplota chladicí vody -  $t_{chl.vody}$ ,  $\alpha_i$** 

Teplota chladicí vody vychází z experimentálně získaných hodnot a byla zadána jako průměr naměřených povrchových teplot na vstupu a na výstupu ze systému stropního chlazení. Tato hodnota byla následně snížena z důvodu zohlednění tepelného odporu potrubí.



Obr. 47 Prostup tepla válcovou stěnou [Autor]

$$\dot{q} = \dot{q}_e = \dot{q}_{v1} = \dot{q}_{v2} = \dot{q}_i \quad (9)$$

Součinitel přestupu tepla je odvozen ze vztahů pro Nusseltovo kritérium, rychlost proudění chladicí vody v potrubí byla přibližně vypočtena z měrného průtoku chladicí vody.

$$Nu = \frac{\alpha \times l}{\lambda} \quad (10)$$

$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4} \quad (11)$$

**Tepelná zátěž místnosti -  $Q_i$** 

Tepelná zátěž místnosti je vypočtena metodikou ČSN 73 0548 *Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů*. Bez započtení tepelných zisků střešní konstrukce a obvodové stěny. Tyto zisky jsou zohledněny při samotné simulaci, což vychází z podstaty modelu. Tepelné zisky od osob jsou uplatněny dle typického obsazení místnosti.

Tepelné zisky větráním jsou odvozeny sekundárně. Doba, kdy je předpokládáno větrání (přirozené větrání okny), vychází z difference mezi primární simulací, ve které bylo větrání zanedbáno a experimentálně zjištěnými hodnotami.

Jedná se o přirozené větrání okny, které vychází z následujících vztahů [25]:

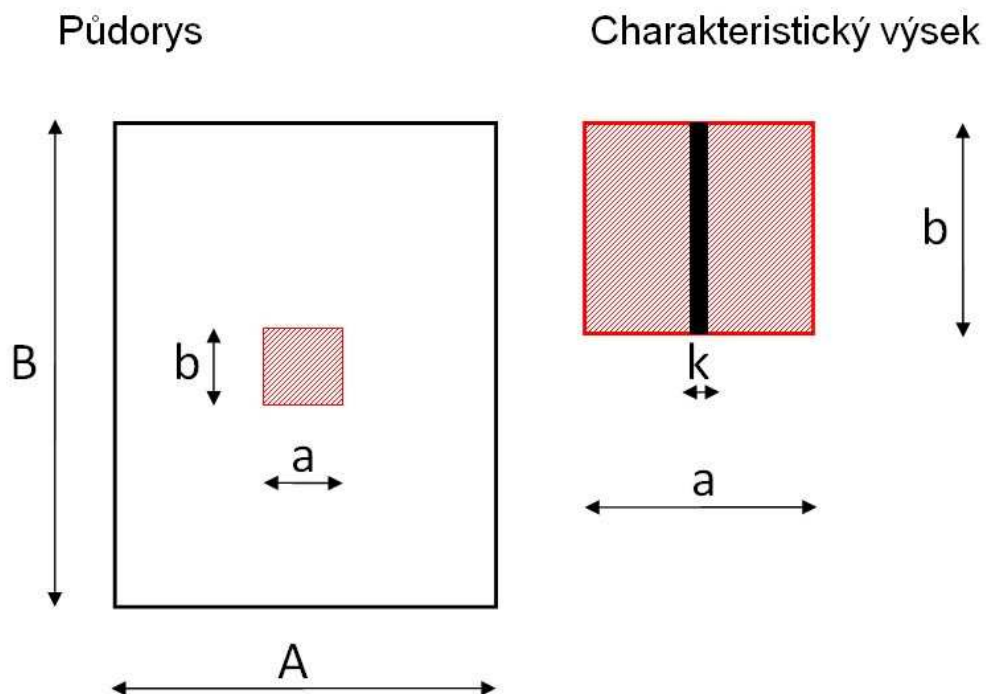
$$p_D'' = \exp\left(23,58 - \frac{4044,6}{235,6 + t}\right) \quad (12)$$

$$\rho = \frac{1}{287 \cdot T} \cdot (p - 0,378 \cdot rh \cdot p_D'') \quad (13)$$

$$V_p = \frac{2 \cdot \mu \cdot a}{3 \cdot \rho_s} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_e \cdot \rho_i \cdot (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot b^3}{(\rho_i^{0,33} - \rho_e^{0,33})^3}} \quad (14)$$

Tepelné zisky z místností s jinou teplotou vzduchu jsou zanedbány.

Tepelná zátěž místnosti je zadána do vrstvy vnitřního vzduchu. Je tedy nutné zavést ekvivalentní tepelnou zátěž zohledňující charakteristický výsek místnosti a tloušťku vrstvy vnitřního vzduchu tedy tloušťku jednoho dílku rastru.



Obr. 48 Ekvivalentní tepelná zátěž místnosti [Autor]

Ekvivalentní tepelná zátěž je vypočtena dle vztahu:

$$Q_{i,ekv.} = \frac{Q_i}{A \times B} \times k \times a \quad (15)$$

Kde „k“ je velikost kontrolního objemu (jeden dílek rastru), „a“ je šířka modelu v softwaru CalA a „A“ a „B“ jsou půdorysné rozměry místnosti.

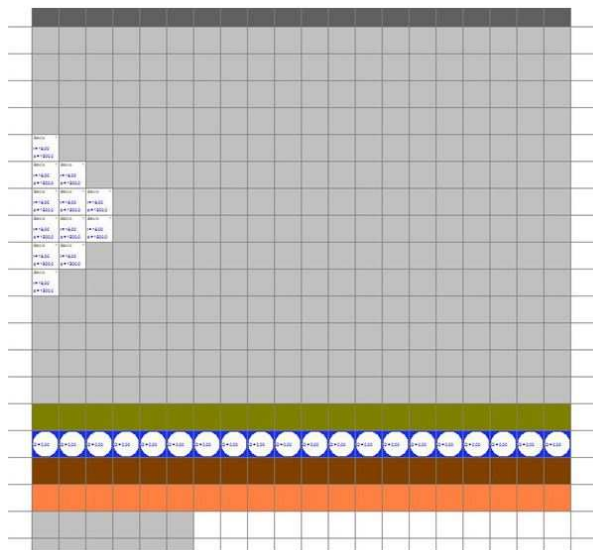
### 3.3 Výpočet v softwaru CalA

Vlastní numerické řešení nestacionárního vedení tepla ve dvojdimenzionálním poli bylo provedeno metodou kontrolních objemů v softwaru CalA.

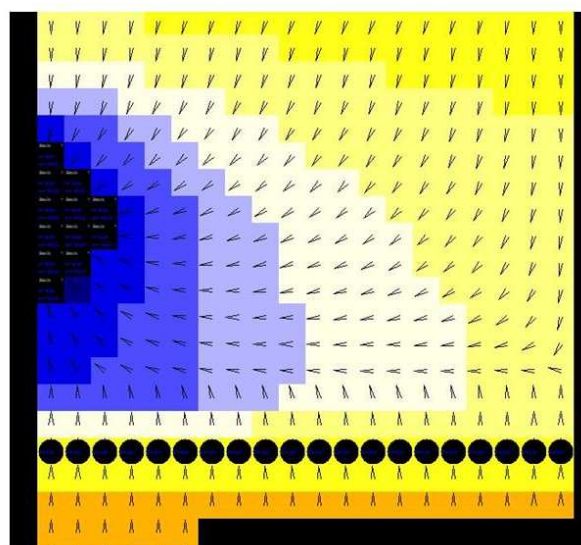
Fourierova parciální diferenciální rovnice pro 2D vedení tepla v kartézských souřadnicích:

$$\frac{\delta}{\delta x} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta y} \right) + Q_{zdr} = \rho \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta \tau} \quad (16)$$

Na prvním obrázku je vidět detail geometrie zadané v softwaru CalA. Na druhém je schematicky (bez teplotní škály) zobrazeno vypočtené teplotní pole v konkrétním kroku výpočtu, šipkami je potom znázorněn tepelný tok.



Obr. 49 Detail potrubí v softwaru CalA [Autor]



Obr. 50 Detail potrubí – vypočtené teplotní pole [Autor]

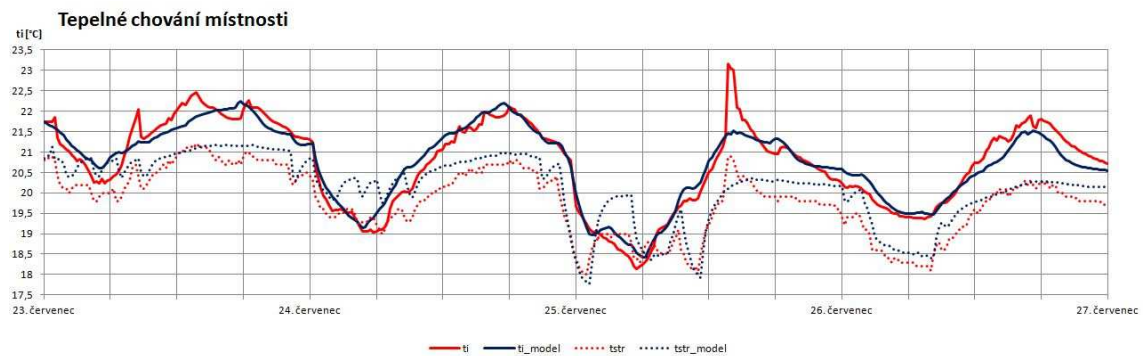


### 3.4 Verifikace modelu

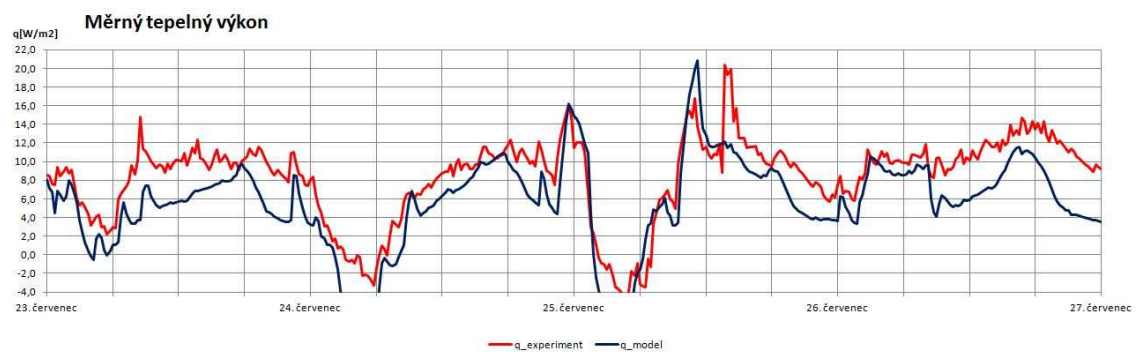
Vytvořený matematicko-fyzikální model byl verifikován experimentem. Vypočtená simulace tepelného chování místnosti byla porovnána s naměřenými hodnotami při stejných okrajových podmínkách v průběhu čtyř dnů z měřeného období.



Obr. 51 Verifikace modelu – okrajové podmínky [Autor]



Obr. 52 Verifikace modelu – tepelné chování místnosti [Autor]



Obr. 53 Verifikace modelu – měrný tepelný výkon [Autor]

Z grafu tepelného chování místnosti je patrná velmi dobrá shoda simulace s experimentálně získanými hodnotami.

Průběh simulovaného tepelného chování odpovídá realitě a rozdíl mezi naměřenou teplotou interiéru a teplotou simulovanou se pohybuje do 0,5 °C. Výjimkou je výraznější odchylka 25. července odpoledne, která je způsobena patrně nárazovým krátkodobým větráním, které ale nemá výrazný vliv na další průběh vnitřní teploty.

Poměrně dobrou shodu vykazuje i průběh povrchové teploty stropu. Měřenou hodnotou je povrchová teplota v jednom konkrétním místě stropu, zatímco simulovaná povrchová teplota je hodnotou průměrnou, tedy průměrem teplot zahrnujícím teplotu povrchu stropu přímo pod trubkou chlazení i mezi nimi.

U průběhu měrného tepelného výkonu je shoda simulace s experimentem opět poměrně dobrá, přestože v simulovaném období dosahuje chladicí strop velmi malých měrných výkonů. Zde se opět ukazuje, nakolik je chladicí strop předdimenzovaný.

Díky dobrým výsledkům verifikace modelu lze předpokládat, že i při odlišných okrajových podmínkách se bude výsledná simulace tepelného chování místnosti blížit realitě. Je tedy možné tímto matematicko-fyzikálním modelem predikovat tepelné chování místnosti při různých okrajových podmínkách teoretických optimalizací systému.

## 3.5 Simulace

### 3.5.1 Simulované scénáře

Cílem jednotlivých simulací je zobrazení tepelného chování místnosti při různých okrajových podmínkách a posouzení jednotlivých scénářů se stávajícím řešením a možnosti jeho optimalizace.

Tepelné chování místnosti bylo simulováno pro následující scénáře:

- zastavení průtoku chladicí vody,
- simulace bez vlivu chlazení,
- optimalizace systému MaR,
- simulace nočního větrání.

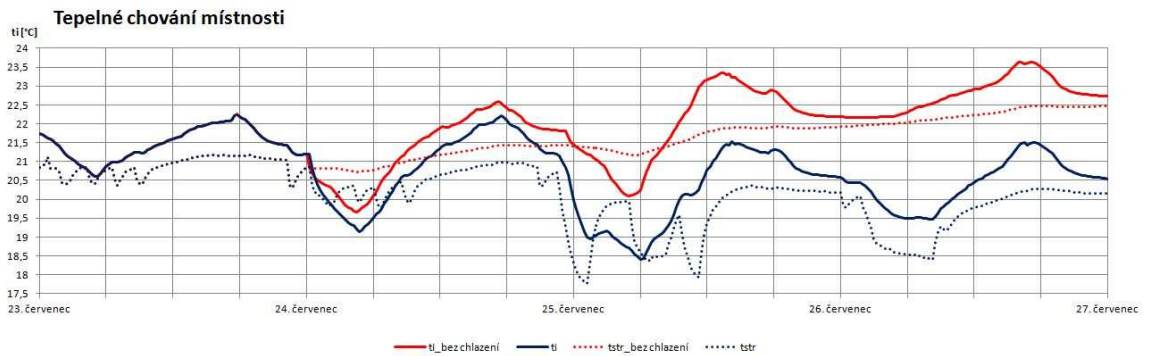
(Z důvodu větší přehlednosti je grafické zobrazení okrajových podmínek a o odezvy systému jednotlivých scénářů umístěno vždy na jedné straně.)

### 3.5.2 Zastavení průtoku chladicí vody

Tímto scénářem je simulováno tepelné chování místnosti při zastavení průtoku chladicí vody ve zvoleném okamžiku. Cílem toho scénáře je zobrazení chladicího účinku stávajícího systému chlazení na řešenou místnost.



Obr. 54 Scénář 1 – okrajové podmínky [Autor]



Obr. 55 Scénář 1 – odezva systému [Autor]

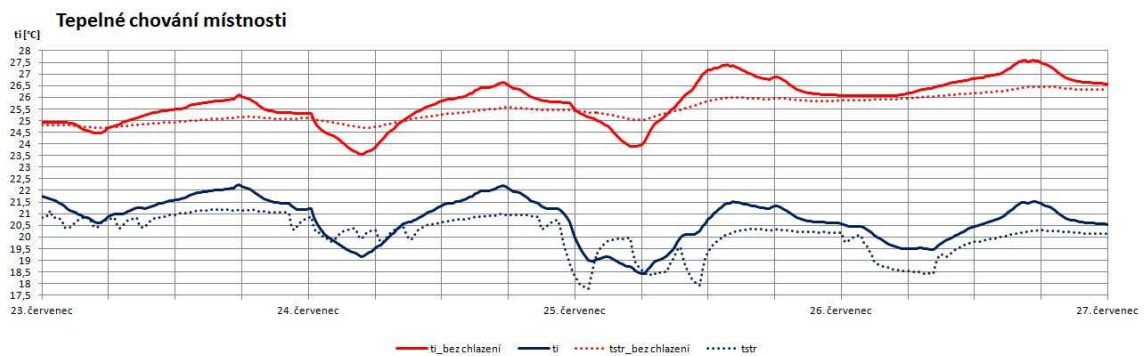
Z výstupu simulace tohoto scénáře je patrný vliv stávajícího chladicího stropu na tvorbu tepelného mikroklima měřené místnosti. Při zastavení průtoku chladicí vody v okruhu stropního chlazení dochází k postupnému ohřívání místnosti. Při této simulaci stejně jako při experimentu má na teplotu interiéru výrazný vliv tepelná ztráta větráním v noci na 24. a na 25. července.

### 3.5.3 Simulace bez vlivu chlazení

Cílem toho scénáře je zobrazení tepelného chování místnosti bez vlivu chlazení. Výsledkem je potom průběh teploty interiéru a povrchu stropní konstrukce v případě vypnutého chlazení za stejných okrajových podmínek jako při experimentu.



Obr. 56 Scénář 2 – okrajové podmínky [Autor]



Obr. 57 Scénář 2 – odezva systému [Autor]

Simulací bez vlivu chlazení je zobrazen průběh tepelného chování nechlazené místnosti. Z grafického vyjádření je vidět výrazný vliv stávajícího systému stropního chlazení na tvorbu tepelného mikroklima řešené místnosti.

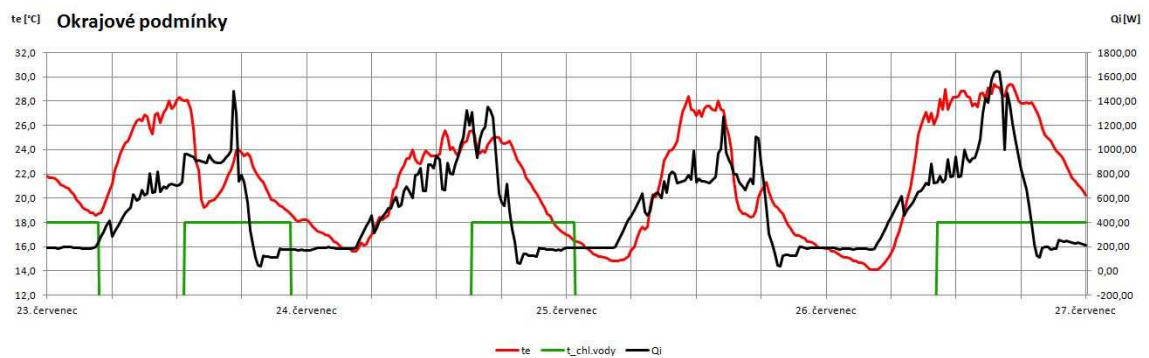
Bez vlivu chlazení by teplota interiéru v ložnici byla v simulovaném období o 3 až 6 °C vyšší.

### 3.5.4 Optimalizace systému MaR

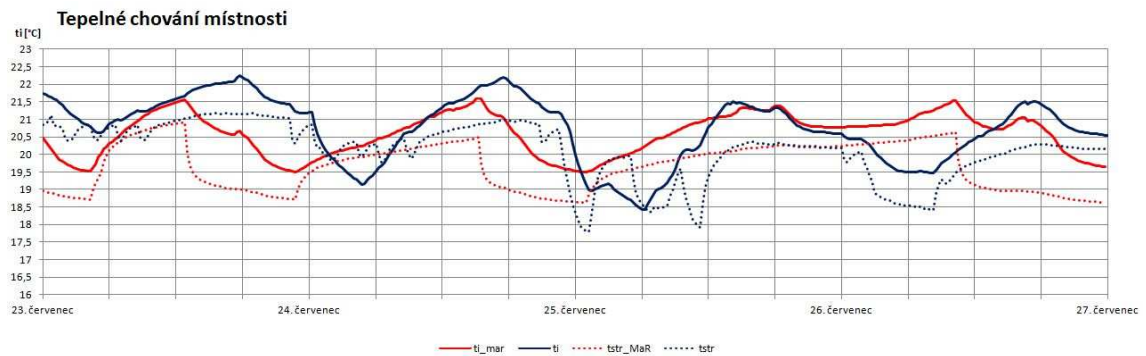
Jako vhodná optimalizace stávajícího systému se jeví sofistikovanější systém měření a regulace. Tímto scénářem je simulováno tepelné chování místnosti řízené optimalizovaným systémem MaR. Do systému stopního chlazení je přiváděna chladicí voda o teplotním spádu 17/19 °C (pro simulaci je zadána střední teplota chladicí vody 18 °C). Požadovaná teplota vzduchu v interiéru je  $(20,5 \pm 1,0)$  °C

Ostatní okrajové podmínky jsou shodné s experimentálním měřením s výjimkou zanedbání tepelných ztrát větráním v nočních hodinách.

Cílem simulace je ukázat důležitost správné funkčnosti systému MaR a ověřit, zda-li je stávající systém schopen zajistit požadovanou teplotu vnitřního vzduchu. Výstupem jsou potom návrhové požadavky pro optimální systém MaR.



Obr. 58 Scénář 3 – okrajové podmínky [Autor]



Obr. 59 Scénář 3 – odezva systému [Autor]

Z odezvy systému je vidět, že stávající systém stropního chlazení s optimalizovaným systémem MaR dokáže bez problému udržovat v simulovaném období teplotu vzduchu v chlazené místnosti v požadovaném pásmu.

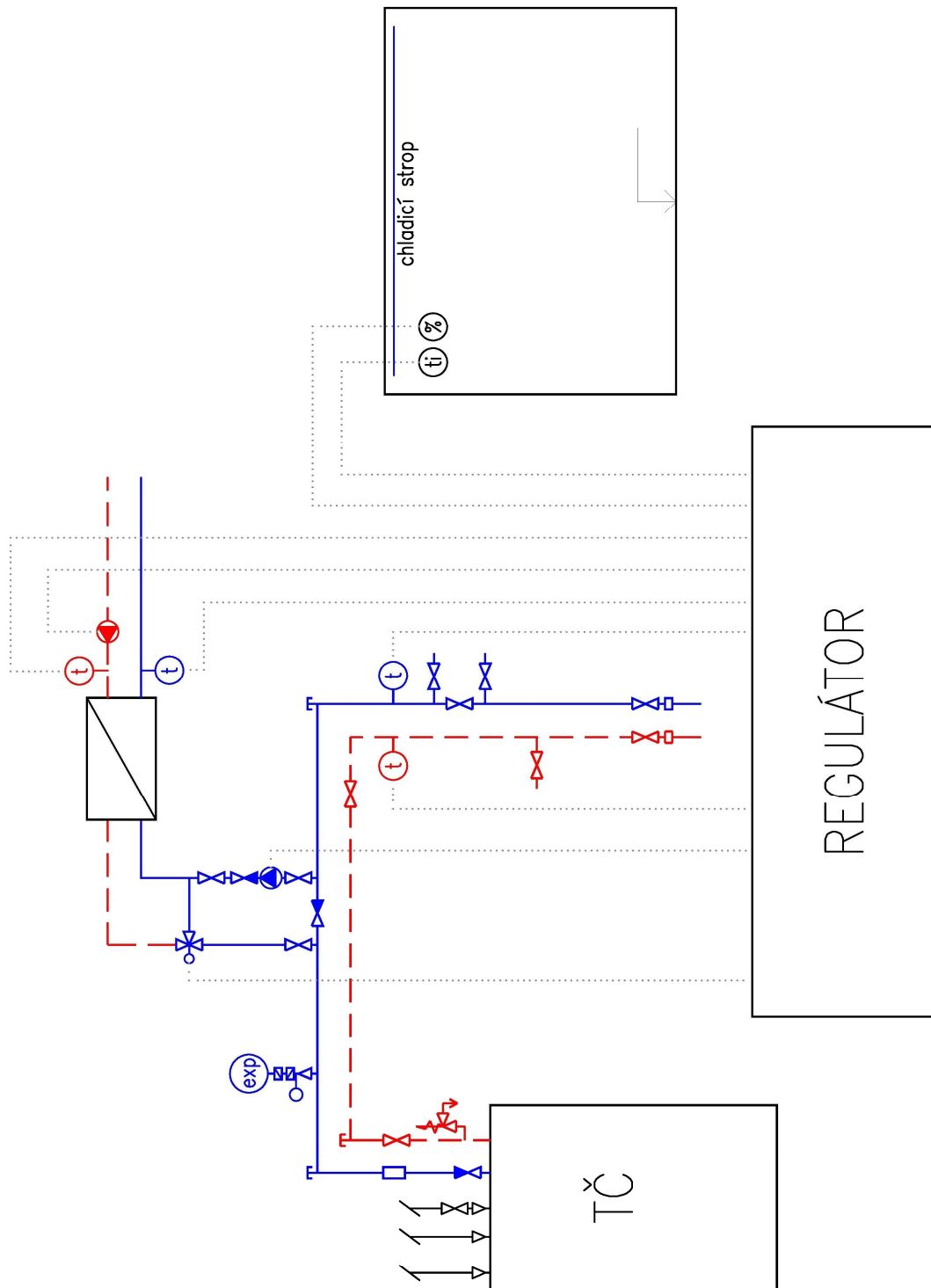
Dále je z výsledků tohoto scénáře patrné, že systém reaguje na změnu teploty chladicí vody téměř okamžitě a nedochází zde k takové setrvačnosti a mnohahodinovým zpožděním, jaké lze očekávat u systémů s tepelně aktivovaného betonu.

Při simulaci není zohledněna vlhkost vzduchu v interiéru a není tedy možné říci, zda-li by při tomto řešení docházelo ke kondenzaci vodní páry na chladicí ploše stropu. Nebezpečí vzniku kondenzace je ošetřeno v následujících požadavcích na systém měření a regulace.

### **Požadavky na systém MaR**

- Čerpadla na primárním (okruh zemního vrtu) i chladicím okruhu budou nastavena na konstantní výstupní tlak a budou ovládána – zapnout/vypnout
- Na potrubí primárního okruhu budou osazena teplotní čidla, a to na přívod i vrat zemního vrtu – bude zajištěn monitoring tepelného chování zemního vrtu.
- V chlazených místnostech budou osazena teplotní a vlhkostní čidla. Na základě aktuálních výsledků bude prováděn výpočet teploty rosného bodu. Dále bude těmito čidly zajištěna zpětná vazba regulace.
- Na potrubí okruhu stropního chlazení budou na přívod i vrat osazena teplotní čidla, jimiž bude zajištěn monitoring provozu stropního chlazení.
- Teplota chladicí vody na přívodu do systému stropního chlazení je akční veličinou.
- Regulace systému bude zajištěna trojcestným ventilem. Tento ventil bude zajišťovat požadovaný průtok chladicí směsi výměníkem tak, aby byla zajištěna požadovaná teplota chladicí vody na přívodu do chladicích stropů.
- V případě nárůstu teploty vzduchu v chlazené místnosti nad 21,5 °C bude navýšen průtok chladicí směsi výměníkem tepla tak, aby se teplota chladicí vody na přívodu do chladicích stropů rovnala vypočtené teplotě rosného bodu + 2 K, ale minimálně 17 °C.
  - $t_1 = \max(t_{rb} + 2 \text{ K}; 17) \text{ [}^\circ\text{C]}$
  - V případě poklesu teploty vzduchu v chlazené místnosti pod 19,5 °C bude průtok chladicí směsi výměníkem tepla zastaven.
  - V případě že relativní vlhkost v chlazené místnosti přesáhne hranici 80 %, bude průtok chladicí směsi výměníkem tepla zastaven a to i v případě, že teplota vnitřního vzduchu v chlazené místnosti přesáhne 21,5 °C.

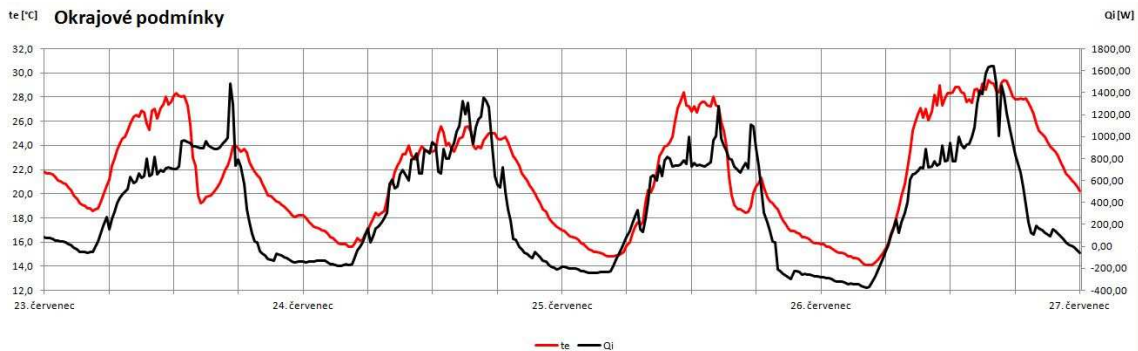
**Sálavé chladicí systémy neodvádí latentní teplo, samostatně neumožňují řízení vlhkosti vzduchu v chlazených místnostech a svým charakterem tak nejsou schopny zajistit požadovanou teplotu vnitřního vzduchu při vysoké relativní vlhkosti vzduchu.**

**Blokové schéma systému MaR****Obr. 60** Blokové schéma MaR [Autor]

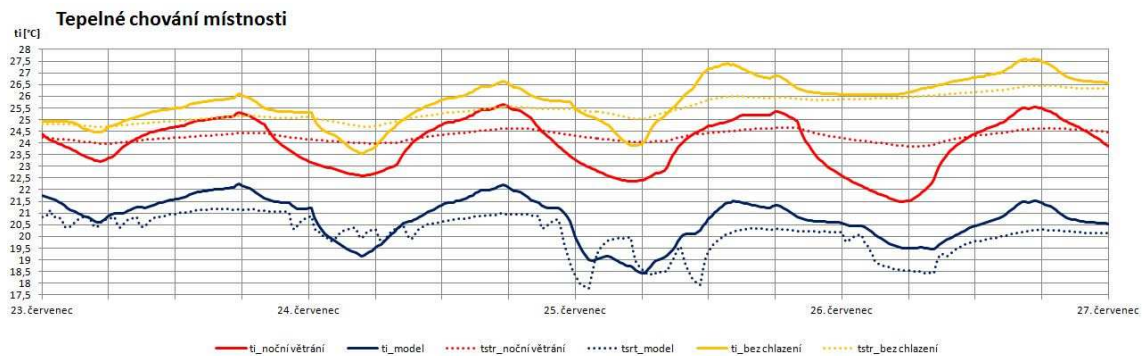
### 3.5.5 Noční větrání

Jednou z možností pasivního chlazení je tzv. noční větrání, kdy je do vnitřního prostoru v nočních hodinách přiváděn chladný venkovní vzduch a dochází k akumulaci chladu do vnitřních konstrukcí.

Tento teoretický scénář využívá pro tvorbu vnitřního tepelného mikroklima výhradně tohoto pasivního chlazení. Do místnosti je tedy nuceně přiváděn venkovní vzduch (200 m<sup>3</sup>/h). Cílem je porovnání tohoto způsobu pasivního chlazení se stávajícím systémem stropního chlazení a se simulací bez vlivu chlazení.



Obr. 61 Scénář 4 – okrajové podmínky [Autor]



Obr. 62 Scénář 4 – odezva systému [Autor]

Výsledný průběh tepelného chování místnosti při tomto systému pasivního chlazení je graficky porovnán s průběhem teplot při stávajícím systému chlazení a s výsledky simulace scénáře bez vlivu chlazení. Z výsledků je patrný zejména vliv akumulace chladu do konstrukcí při nočním větrání oproti průběhu teplot při scénáři bez vlivu chlazení.

Scénář bez vlivu chlazení byl simulován za stejných okrajových podmínek jako experiment. Značně se zde tedy projevuje větrání v nočních hodinách 24. a 25. července a právě z tohoto důvodu není rozdíl průběhu teplot v porovnání se scénářem nočního větrání v těchto dnech příliš výrazný.



### 3.6 Závěr simulačního řešení

V rámci této části diplomové práce byl vytvořen matematicko-fyzikální model tepelného chování místnosti chlazené chladicím stropem. Vlastní numerické řešení nestacionárního vedení tepla bylo provedeno metodou kontrolních objemů v softwaru CalA.

Navržený model byl verifikován. Výsledky numerické simulace tepelného chování chlazené místnosti byly porovnány s hodnotami získanými experimentálním měřením za stejných okrajových podmínek.

Následně byly za účelem získání jasnější představy o chování systému simulovány jednotlivé scénáře s různými okrajovými podmínkami. Z jejich výsledků je patrné, nakolik se stávající systém podílí na tvorbě tepelného mikroklima v chlazené místnosti. Stávající systém je značně předimenzovaný a je tedy při optimalizaci systému MaR schopen zajistit i nižší teploty, než které byly experimentálně zjištěny v průběhu měřeného období.

Výsledkem jsou návrhové požadavky pro možnou optimalizaci systému měření a regulace.

## 4. ZÁVĚR

Výsledkem diplomové práce jsou simulace tepelného chování místnosti chlazené chladicím stropem při různých okrajových podmínkách, možnosti optimalizace stávajícího systému chlazení, jeho zhodnocení a návrhové požadavky pro možnou optimalizaci systému měření a regulace.

Vlastním simulacím předcházela tvorba a verifikace matematicko-fyzikálního modelu tepelného chování chlazené místnosti. Model vychází z geometrie řešené místnosti a jeho výpočet je založen na numerickém řešení nestacionárního sdílení tepla vedením ve 2D. Samotné numerické řešení bylo provedeno metodou kontrolních objemů v softwaru CalA.

V objektu bylo v létě minulého roku provedeno za účelem získání jasnější představy o chování systému dlouhodobé měření. Jeho výsledkem bylo experimentální zjištění parametrů vnitřního vzduchu v chlazené místnosti, povrchové teploty chladicího stropu a průběh chladicího výkonu stropu. Dále pak byl zjištěn průběh teplot na přívodu i vratu okruhu zemních vrtů a okruhu stropního chlazení. Výsledky měření byly použity jako okrajové podmínky simulačního řešení. V rámci experimentální části byl chladicí strop také zdokumentován termokamerou.

V teoretické části práce byly přiblíženy sálavé chladicí systémy a jejich historie. Dále se tato část diplomové práce zabývá rozdělením těchto systémů, popisem konkrétních typů a objektivně porovnává jejich výhody a nevýhody. V závěru potom blíže ukazuje vybrané aplikace těchto systémů v praxi.

## 5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [ 1 ] TERUOVÁ, Lea. Velkoplošné převážně sálové vytápění. In: *Podklady pro studenty* [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.fce.vutbr.cz/TZB/treuova/](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/treuova/)
- [ 2 ] *Archaeological site Stobi: National Institution Stobi* [online]. 2010 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.stobi.mk/>
- [ 3 ] BEAN, Robert, Bjarne OLESEN a Kwang Woo KIM. History of radian heating & cooling systems: Part 2. *ASHRAE Journal*. 2010, č. 2, s. 6. Dostupné z: [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)
- [ 4 ] *Bank of England* [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.bankofengland.co.uk](http://www.bankofengland.co.uk)
- [ 5 ] *Krantz* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: [www.krantz.de](http://www.krantz.de)
- [ 6 ] *Názvoslovný výkladový slovník z oboru Technika prostředí: česko-německo-anglický = English-Czech-German = deutsch-tschechisch-englisch : obsahuje terminologii oborů Vytápění, Solární technika, Tepelné izolace ..* Vyd. 2., přeprac. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2008, 73, 73, 73, [17] s. ISBN 978-80-02-02081-3.
- [ 7 ] ZMRHAL, Vladimír. Měření tepelného prostředí se sálovým chladicím stropem. *VVI: Větrání, vytápění, instalace*. 2006, č. 3, s. 6.
- [ 8 ] ZMRHAL, Vladimír. Sálové chladicí systémy. *TZB: HAUS TECHNIK*. 2009, č. 1, s. 5.
- [ 9 ] TZB info [online]. © Copyright Topinfo s.r.o. 2001-2013. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/>
- [ 10 ] ZMRHAL, Vladimír. Hodnocení tepelného komfortu v prostoru s chladicím stropem. *VVI: Větrání, vytápění, instalace*. 2004, č. 4, s. 4.
- [ 11 ] ZMRHAL, Vladimír. Tepelné prostředí v prostoru s kapilárními rohožemi. *VVI: Větrání, vytápění, instalace*. 2007, č. 1, s. 5.
- [ 12 ] ŠIKULA, Ondřej. *Počítačové modelování tepelně aktivovaných konstrukcí: Computer modeling of thermally activated structures : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2011. 39 s. ISBN 978-80-214-4308-2.
- [ 13 ] *Rehau* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: [www.rehau.com](http://www.rehau.com)
- [ 14 ] *Unopor* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: [www.unopor.com](http://www.unopor.com)
- [ 15 ] *G-therm* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: [www.g-therm.hennlich.cz](http://www.g-therm.hennlich.cz)
- [ 16 ] ZMRHAL, Vladimír. Chladicí stropy. In: *Fakulta strojní ČVUT* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/75.pdf>

- [ 17 ] ŽEMLIČKA, Jan a Miloš LAIN. Národní technická knihovna v Praze. In: *Tzb-info* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vetrani-klimatizace/8953-narodni-technicka-knihovna-v-praze>
- [ 18 ] Kapilární rohože na zámku: spojení historie a moderních technologií. In: *Tzb-info* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/11494-kapilarni-rohoze-na-zamku-spojeni-historie-a-modernich-technologii>
- [ 19 ] Kapilární rohože na zámku: spojení historie a moderních technologií. In: *Tzb-info* [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/11494-kapilarni-rohoze-na-zamku-spojeni-historie-a-modernich-technologii>
- [ 20 ] *Suvarnabhumi Airport* [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.suvarnabhumiairport.com](http://www.suvarnabhumiairport.com)
- [ 21 ] *Gabotherm* [online]. 2012 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.gabotherm-podlahovetopeni.cz](http://www.gabotherm-podlahovetopeni.cz)
- [ 22 ] *Comet* [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.cometsystem.cz](http://www.cometsystem.cz)
- [ 23 ] *Ahlborn* [online]. 2013 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.ahlborn.com](http://www.ahlborn.com)
- [ 24 ] *Fluke* [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.fluke.com](http://www.fluke.com)
- [ 25 ] HIRŠ, Jiří a Günter GEBAUER. *Vzduchotechnika v příkladech*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 230 s. ISBN 80-720-4486-9.

## 6. SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Symbol	Veličina	Jednotka
$t_i$	teplota vzduchu v interiéru	[°C]
$t_e$	teplota vzduchu ve venkovním prostředí	[°C]
$t_{rb}$	teplota rosného bodu	[°C]
$t_{str}$	povrchová teplota stropu	[°C]
$q$	tepelný tok, měrný tepelný výkon	[W.m <sup>-2</sup> ]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$U$	součinitel prostupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$I_D$	intenzita dopadající přímé sluneční radiace	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_d$	intenzita dopadající difúzní sluneční radiace	[W.m <sup>-2</sup> ]
$d$	charakteristický rozměr	[m]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$c$	měrná tepelná kapacita	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$C$	tepelná kapacita	[J.kg <sup>-1</sup> ]
$\rho$	objemová hmotnost	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$p_d''$	tlak syté vodní páry	[Pa]
$Q_i$	tepelná zátěž interiéru	[W]
$Q_{zdr}$	výkon vnitřního zdroje	[W]
$V_p$	množství přiváděného vzduchu	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$\varphi$	relativní vlhkost vzduchu	[%]
$h$	výška slunce nad horizontem	[°]
$\alpha$	sluneční azimut	[°]
$\gamma$	azimut stěny	[°]
$I_D$	intenzita dopadající přímé sluneční radiace	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_d$	intenzita dopadající difúzní sluneční radiace	[W.m <sup>-2</sup> ]
$\varepsilon$	emisivita	[-]
1.NP	první nadzemní podlaží	
1.PP	první podzemní podlaží	
MaR	měření a regulace	
Re	Reynoldsovo číslo	
Pr	Prandtlovo číslo	
Nu	Nusseltovo číslo	

## **7. PŘÍLOHY**

*Optimalizace chlazení RD využívajícího zemní vrty*

## **SEZNAM PŘÍLOH**

A. Termovizní dokumentace chladicích stropů

B. Matematicko-fyzikální model – výpočty

C. Výkresová dokumentace chlazení RD

1. Půdorys 1.NP – stropní chlazení

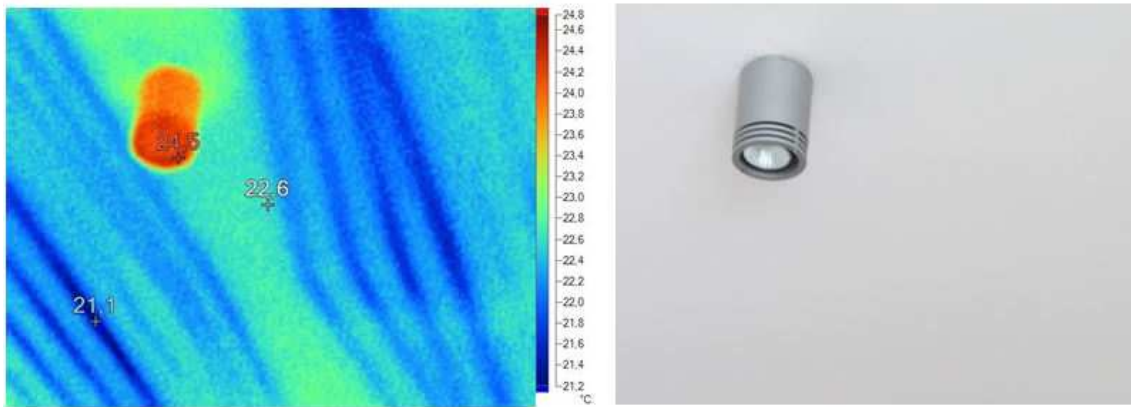
2. Půdorys 2.NP – stropní chlazení

3. 1.NP + 2.NP Schéma stropního chlazení

(Autorem výkresové dokumentace je firma VESKOM)

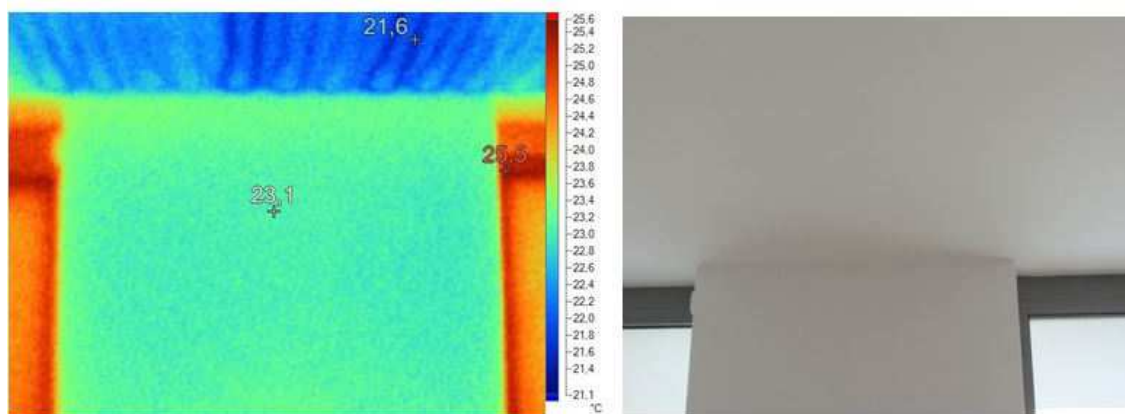
## A. Termovizní dokumentace chladicích stropů

Tato příloha obsahuje několik termovizních snímků dokumentujících stávající chladicí strop v řešeném objektu (v ložnici a v dětském pokoji).



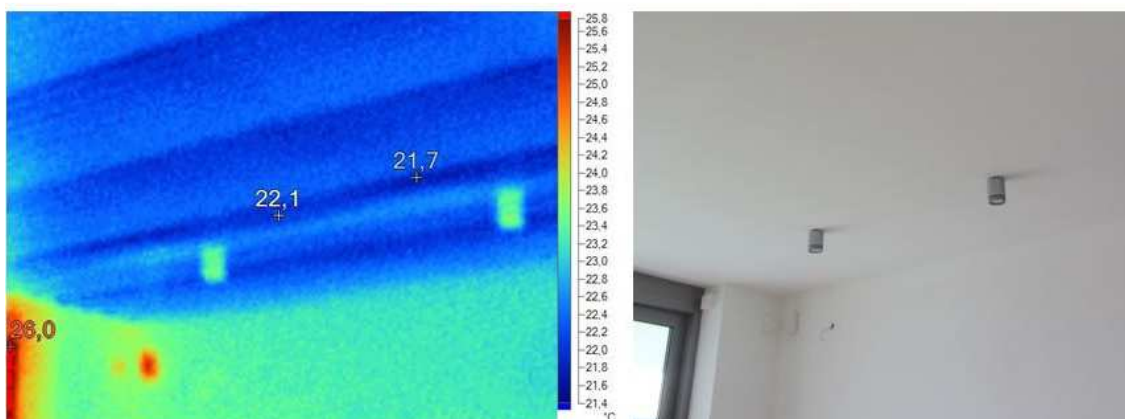
$\epsilon = 0,95, t_o = 23,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Obr. 63 Detail chladicího stropu v okolí bodového světla v ložnici [Autor]



$\epsilon = 0,95, t_o = 23,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

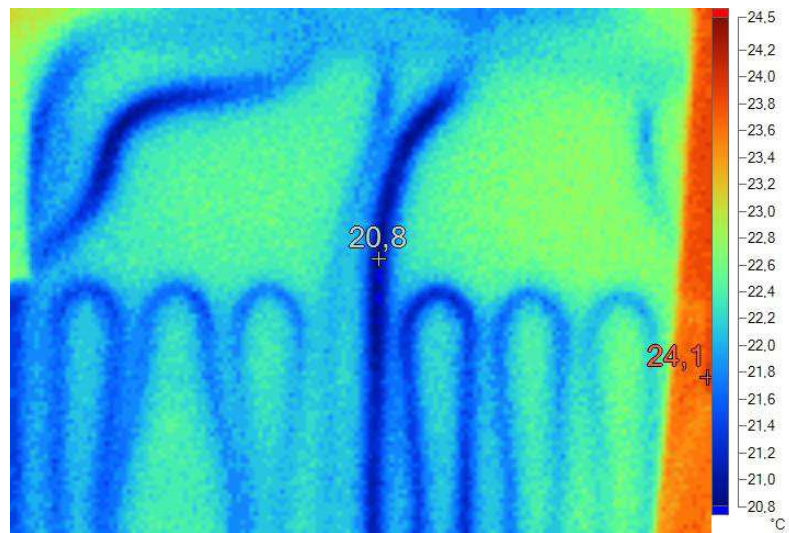
Obr. 64 Chladicí strop u obvodové stěny v ložnici [Autor]



$\epsilon = 0,95, t_o = 23,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

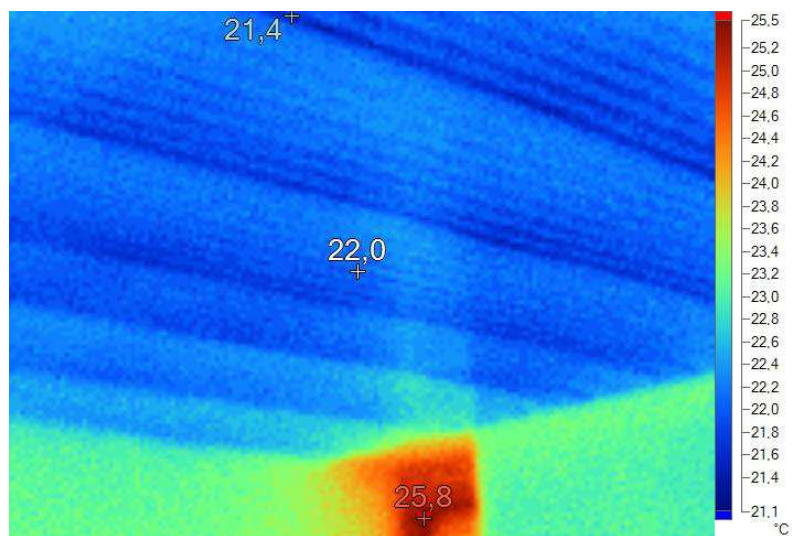
Obr. 65 Chladicí strop v ložnici [Autor]





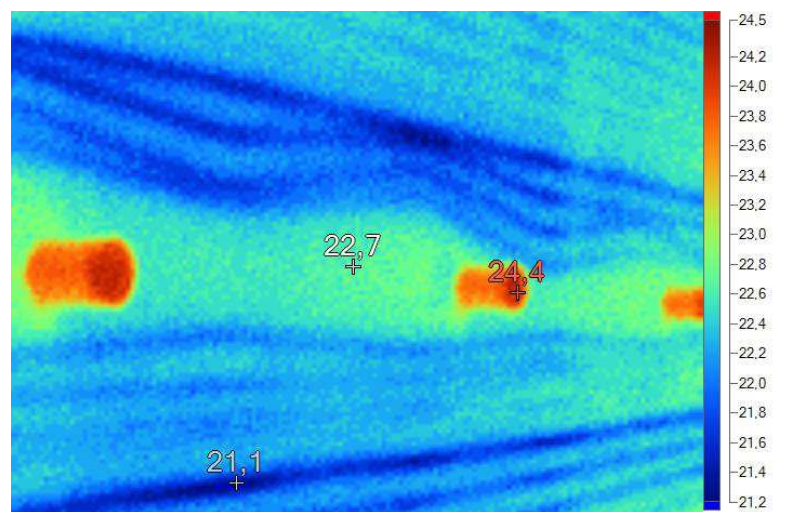
$\epsilon = 0,95$ ,  $t_0 = 23,5$  °C

Obr. 66 Detail potrubního „hadu“ stropního chlazení v ložnici [Autor]



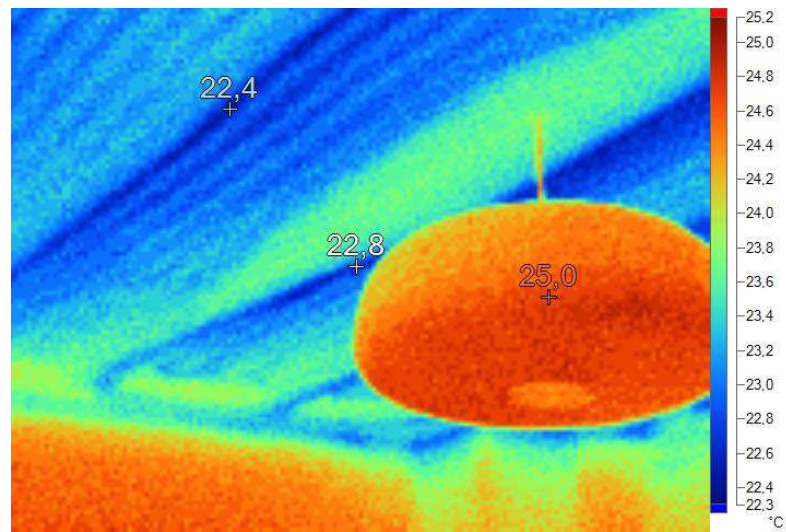
$\epsilon = 0,95$ ,  $t_0 = 23,5$  °C

Obr. 67 Chladicí strop v ložnici – celkový pohled [Autor]



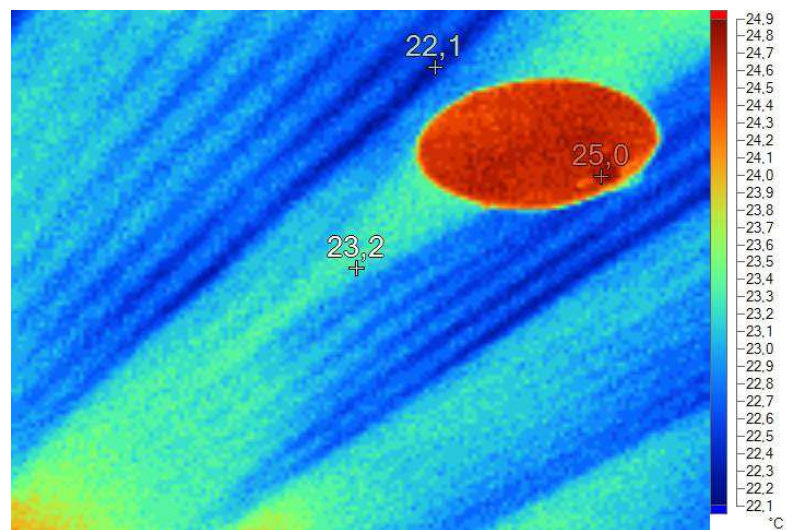
$\epsilon = 0,95$ ,  $t_0 = 23,5$  °C

Obr. 68 Chladicí strop a bodová světla v ložnici [Autor]



$\epsilon = 0,95$ ,  $t_o = 25,0$  °C

Obr. 69 Stropní chlazení v dětském pokoji [Autor]



$\epsilon = 0,95$ ,  $t_o = 24,5$  °C

Obr. 70 Stropní chlazení v dětském pokoji [Autor]

## B. Matematicko-fyzikální model – výpočty

Součástí této přílohy jsou vybrané experimentálně získané hodnoty, výpočty okrajových podmínek a výstupy z numerického řešení tepelného chování místnosti. Pro přehlednost je vždy uveden jeden konkrétní den, a to 23. červenec 2014 s hodnotami v intervalu jedné hodiny. Samotné řešení potom bylo prováděno v kroku 15 minut.

### Výpočet průběhu intenzity sluneční radiace

Výpočet průběhu intenzity sluneční radiace byl proveden dle normy ČSN 73 0548 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů pro celé měřené období. Hodnoty intenzity sluneční radiace byly získány z meteostanice.

### Vertikální rovina

Čas výpočtu		Poloha slunce			Intenzita dopadající sluneční radiace		Celková poměrná propustnost	Intenzita procházející sluneční radiace	
den	čas [hh:mm]	h [°]	$\alpha$ [°]	$\theta$ [°]	$I_D$ [W.m <sup>-2</sup> ]	$I_d$ [W.m <sup>-2</sup> ]	$T_D$ [-]	$I_o$ [W.m <sup>-2</sup> ]	$I_{o, dif}$ [W.m <sup>-2</sup> ]
23.7.	0:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	1:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	2:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	3:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	4:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	5:00	4,56	113,11	104,84	38	21	0,00	21,15	17,97
23.7.	6:00	13,75	105,95	111,38	221	59	0,00	58,91	50,08
23.7.	7:00	23,32	107,40	108,85	365	92	0,00	92,43	78,57
23.7.	8:00	32,91	113,99	101,72	197	136	0,00	135,98	115,59
23.7.	9:00	42,06	123,11	93,63	733	132	0,00	131,77	112,00
23.7.	10:00	50,09	135,77	85,03	884	139	0,22	330,92	118,40
23.7.	11:00	55,90	154,59	75,47	946	145	0,51	627,87	123,46
23.7.	12:00	58,09	180,00	65,39	933	150	0,69	797,78	127,50
23.7.	13:00	55,90	205,41	56,83	138	212	0,78	320,19	180,33
23.7.	14:00	50,09	224,23	50,37	64	202	0,82	254,82	171,86
23.7.	15:00	42,06	236,89	45,37	154	171	0,84	300,18	144,97
23.7.	16:00	32,91	246,01	42,16	117	140	0,85	239,83	119,28
23.7.	17:00	23,32	252,60	40,90	184	100	0,85	256,58	84,66
23.7.	18:00	13,75	254,05	38,25	133	61	0,86	175,11	51,85
23.7.	19:00	4,56	246,89	29,21	16	21	0,87	35,19	18,12
23.7.	20:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	21:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	22:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
23.7.	23:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00
24.7.	0:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00

**Horizontální rovina**

Čas výpočtu		Poloha slunce			Intenzita dopadající sluneční radiace		
den	čas [hh:mm]	h [°]	$\alpha$ [°]	$\theta$ [°]	$I_D$ [W.m <sup>-2</sup> ]	$I_d$ [W.m <sup>-2</sup> ]	$I_D + I_d$ [W.m <sup>-2</sup> ]
23.7.	0:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	1:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	2:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	3:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	4:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	5:00	4,56	113,11	85,44	38	35	73,24
23.7.	6:00	13,75	105,95	76,25	221	98	319,19
23.7.	7:00	23,32	107,40	66,68	365	154	519,05
23.7.	8:00	32,91	113,99	57,09	197	227	423,64
23.7.	9:00	42,06	123,11	47,94	733	220	952,61
23.7.	10:00	50,09	135,77	39,91	884	232	1116,15
23.7.	11:00	55,90	154,59	34,10	946	242	1188,08
23.7.	12:00	58,09	180,00	31,91	933	250	1183,01
23.7.	13:00	55,90	205,41	34,10	138	354	491,59
23.7.	14:00	50,09	224,23	39,91	64	337	400,98
23.7.	15:00	42,06	236,89	47,94	154	284	438,25
23.7.	16:00	32,91	246,01	57,09	117	234	350,88
23.7.	17:00	23,32	252,60	66,68	184	166	349,99
23.7.	18:00	13,75	254,05	76,25	133	102	234,67
23.7.	19:00	4,56	246,89	85,44	16	36	51,53
23.7.	20:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	21:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	22:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
23.7.	23:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
24.7.	0:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00

**Tepelné zisky okny**

Výpočet průběhu tepelných zisků okny byl proveden dle normy ČSN 73 0548 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů pro celé měřené období.

**Výpočet tepelného zisku okny**

Čas výpočtu		Stín				Osluněná plocha okna			Tepelné zisky oken		
den	čas [hh:mm]	$e_{1,A}$ [m]	$e_{2,A}$ [m]	$e_{1,B}$ [m]	$e_{2,B}$ [m]	$S_{os,A}$ [m <sup>2</sup> ]	$S_{os,B}$ [m <sup>2</sup> ]	$S_{os,celkem}$ [m <sup>2</sup> ]	$Q_{or}$ [W]	$Q_{ok}$ [W]	$Q_{o,celkem}$ [W]
23.7.	0:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,44
23.7.	1:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-3,88	-3,88
23.7.	2:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,38	-2,38
23.7.	3:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-10,48	-10,48
23.7.	4:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-15,42	-15,42
23.7.	5:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	89,28	-12,60	76,68
23.7.	6:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	248,72	7,66	256,39
23.7.	7:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	390,24	30,21	420,46
23.7.	8:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	574,12	37,35	611,46
23.7.	9:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	556,31	49,06	605,37
23.7.	10:00	0,57	2,65	1,47	2,65	0,00	0,00	0,00	588,08	47,30	635,38
23.7.	11:00	0,40	2,65	0,40	2,65	0,00	0,00	0,00	613,23	50,30	663,52
23.7.	12:00	0,16	2,65	0,16	2,65	0,00	0,00	0,00	633,31	53,47	686,78
23.7.	13:00	0,04	2,65	0,04	2,65	0,00	0,00	0,00	895,72	51,44	947,16
23.7.	14:00	0,02	2,34	0,02	2,34	0,08	0,38	0,46	887,97	-0,44	887,53
23.7.	15:00	0,07	1,86	0,07	1,86	0,26	1,35	1,60	944,21	-20,96	923,24
23.7.	16:00	0,11	1,43	0,11	1,43	0,38	2,17	2,55	869,20	-12,68	856,52
23.7.	17:00	0,14	1,02	0,14	1,02	0,47	2,93	3,40	946,70	4,40	951,10
23.7.	18:00	0,15	0,59	0,15	0,59	0,59	3,75	4,34	739,38	15,50	754,88
23.7.	19:00	0,11	0,18	0,11	0,18	0,80	4,63	5,43	173,41	4,58	177,99
23.7.	20:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-5,37	-5,37
23.7.	21:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-16,82	-16,82
23.7.	22:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-21,76	-21,76
23.7.	23:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-27,84	-27,84
24.7.	0:00	0,57	2,65	2,20	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-27,31	-27,31

**Ostatní tepelné zisky**

Výpočet ostatních tepelných zisků zahrnuje produkci tepla od osob (obsazenost místnosti je predikována dle jejího charakteru), tepelný tok větráním (zisky a ztráty) a tepelný tok vnějšími konstrukcemi.

Tepelný tok vnějšími konstrukcemi je z principu matematicko-fyzikálního modelu počítán přímo a není proto zahrnut do okrajových podmínek numerického řešení.

**Výpočet ostatních tepelných zisků**

Čas výpočtu		Produkce tepla lidmi		Tepelné zisky vnějších konstrukcí				Větrání		Celková zátěž
den	čas [hh:mm]	$i_i$ [-]	$Q_l$ [W]	$t_i$ [°C]	$t_r$ [°C]	$Q_{stěna}$ [W]	$Q_{střecha}$ [W]	$V_p$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{větrání}$ [W]	$Q_{celkem}$ [W]
23.7.	0:00	1,8	159,03	21,75	21,80	7,86	25,02	124,9	2,10	<b>194,46</b>
23.7.	1:00	1,8	158,03	21,84	21,40	7,87	21,04	147,0	-21,78	<b>161,27</b>
23.7.	2:00	1,8	166,62	21,07	20,80	11,11	21,71	108,0	-9,82	<b>187,24</b>
23.7.	3:00	1,8	169,74	20,79	19,60	8,42	21,47	186,6	-74,79	<b>114,36</b>
23.7.	4:00	1,8	172,42	20,55	18,80	6,53	21,43	219,4	-129,28	<b>55,69</b>
23.7.	5:00	1,8	175,99	20,23	20,77	6,16	21,63	203,4	-97,97	<b>182,49</b>
23.7.	6:00	0	0,00	20,33	30,53	5,62	21,03	0,00	0,00	<b>283,04</b>
23.7.	7:00	0	0,00	20,67	39,35	4,88	18,88	0,00	0,00	<b>444,22</b>
23.7.	8:00	0	0,00	21,56	36,90	3,63	15,38	0,00	0,00	<b>630,47</b>
23.7.	9:00	0	0,00	21,33	55,73	3,82	15,65	0,00	0,00	<b>624,84</b>
23.7.	10:00	0	0,00	21,53	61,01	3,33	14,73	0,00	0,00	<b>653,45</b>
23.7.	11:00	0	0,00	21,69	63,77	2,86	14,86	0,00	0,00	<b>681,25</b>
23.7.	12:00	0	0,00	22,03	64,20	1,84	15,68	0,00	0,00	<b>704,29</b>
23.7.	13:00	0	0,00	22,26	39,77	1,41	16,09	0,00	0,00	<b>964,66</b>
23.7.	14:00	0	0,00	22,35	31,17	2,21	21,16	0,00	0,00	<b>910,90</b>
23.7.	15:00	0	0,00	22,08	30,52	4,91	27,93	0,00	0,00	<b>956,08</b>
23.7.	16:00	0	0,00	21,94	29,08	6,12	27,61	0,00	0,00	<b>890,25</b>
23.7.	17:00	0	0,00	21,8	31,75	9,22	28,26	0,00	0,00	<b>988,58</b>
23.7.	18:00	0	0,00	22,04	30,27	11,75	25,84	0,00	0,00	<b>792,47</b>
23.7.	19:00	0	0,00	22,08	23,84	10,89	30,18	0,00	0,00	<b>219,07</b>
23.7.	20:00	1	87,36	21,91	21,30	10,85	29,54	0,00	0,00	<b>122,37</b>
23.7.	21:00	1	88,60	21,71	19,80	10,07	29,62	0,00	0,00	<b>111,47</b>
23.7.	22:00	1,8	161,04	21,57	19,10	12,85	25,79	0,00	0,00	<b>177,92</b>
23.7.	23:00	1,8	163,38	21,36	18,20	12,32	26,84	0,00	0,00	<b>174,71</b>
24.7.	0:00	1,8	164,05	21,3	18,20	12,06	22,14	0,00	0,00	<b>170,95</b>

**Průběh teplot, tepelného toku a relativní vlhkosti**

Přiložená tabulka zahrnuje průběh experimentálně zjištěných a dopočtených hodnot v daném období.

**Naměřené a dopočtené parametry**

Čas výpočtu		Průběh teplot				Tepelný tok stropu			Vlhkost	
den	čas [hh:mm]	$t_i$ [°C]	$t_{str}$ [°C]	$t_{rb}$ [°C]	$t_e$ [°C]	$q_{str,max}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$q_{str,min}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$q_{str}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\varphi_i$ [%]	$\varphi_e$ [%]
23.7.	0:00	21,75	20,8	17,4	21,8	11,7	5	8,5	76,4	53,0
23.7.	1:00	21,84	20,8	16	21,4	8,7	4,3	9,4	69,6	54,0
23.7.	2:00	21,07	20,1	14,4	20,8	9,7	3,5	8,7	65,6	56,0
23.7.	3:00	20,79	20,2	14,2	19,6	6,9	3	5,3	66,2	61,0
23.7.	4:00	20,55	20,2	13,8	18,8	4,9	2,1	3,2	65,3	64,0
23.7.	5:00	20,23	19,9	13,7	18,8	5	1,3	3,0	66	64,0
23.7.	6:00	20,33	20	13,7	21,2	4,4	1,8	3,0	65,7	55,0
23.7.	7:00	20,67	19,9	13,9	24,1	8,1	3,5	6,9	65,2	45,0
23.7.	8:00	21,56	20,6	13,8	25,8	11,7	7,8	8,6	61,5	39,0
23.7.	9:00	21,33	20,1	14,2	26,9	11,9	5,4	11,1	63,9	32,0
23.7.	10:00	21,53	20,5	14,6	26,9	11,3	6,6	9,3	65	32,0
23.7.	11:00	21,69	20,6	14,9	27,4	12,1	7,7	9,8	65,5	32,0
23.7.	12:00	22,03	20,9	15,1	28,1	14,3	9,2	10,2	65,2	30,0
23.7.	13:00	22,26	21,1	15,4	28,1	15,3	9,5	10,4	65,2	29,0
23.7.	14:00	22,35	21,2	15,6	22,3	14,8	9,5	10,4	65,6	50,0
23.7.	15:00	22,08	21	15,5	19,7	12,7	7,8	9,7	66,7	61,0
23.7.	16:00	21,94	20,8	15,6	20,5	12,3	7	10,3	67,4	63,0
23.7.	17:00	21,8	20,7	15,6	22,3	11,7	6,8	9,9	67,9	50,0
23.7.	18:00	22,04	20,9	15,6	23,8	13,3	8	10,3	67,2	40,0
23.7.	19:00	22,08	20,9	15,7	22,6	12,2	7,4	10,6	67,4	45,0
23.7.	20:00	21,91	20,8	15,7	21,3	11,3	7	10,0	68,1	48,0
23.7.	21:00	21,71	20,7	15,7	19,8	10,3	5,8	9,1	68,8	53,0
23.7.	22:00	21,57	20,7	15,6	19,1	10,3	5,3	7,8	69,1	58,0
23.7.	23:00	21,36	20,4	15,5	18,2	11	5,3	8,6	69,5	61,0
24.7.	0:00	21,3	20,4	15,5	18,2	9,4	4,9	8,1	69,7	60,0

**Matematicko-fyzikální model – okrajové podmínky a výstup simulace**

V následující tabulce jsou zobrazeny okrajové podmínky a parametry tepelného chování systému získané z numerického řešení pro porovnání modelu s experimentem.

Při simulacích jednotlivých scénářů optimalizace bylo postupováno analogicky.

**Okrajové podmínky a výstup numerického řešení**

Čas výpočtu		Okrajové podmínky					Simulace – verifikace modelu		
den	čas [hh:mm]	$t_e$ [°C]	$t_{chl.vody}$ [°C]	$l_{c,stená}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$l_{c,střecha}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_i$ [W]	$t_{i,CalA}$ [°C]	$t_{str,CalA}$ [°C]	$q_{str}$ [W/m <sup>2</sup> ]
23.7.	0:00	21,80	20,50	0,00	0,00	194,46	21,75	20,85	8,08
23.7.	1:00	21,40	20,90	0,00	0,00	161,27	21,59	20,83	6,84
23.7.	2:00	20,80	19,50	0,00	0,00	187,24	21,31	20,43	7,93
23.7.	3:00	19,60	20,50	0,00	0,00	114,36	21,05	20,64	3,70
23.7.	4:00	18,80	20,70	0,00	0,00	55,69	20,83	20,85	-0,12
23.7.	5:00	18,80	20,40	59,15	73,24	182,49	20,60	20,41	1,78
23.7.	6:00	21,20	20,70	279,91	319,19	283,04	20,88	20,76	1,03
23.7.	7:00	24,10	20,20	457,43	519,05	444,22	20,98	20,36	5,59
23.7.	8:00	25,80	20,60	332,98	423,64	630,47	21,14	20,77	3,37
23.7.	9:00	26,90	19,80	864,77	952,61	624,84	21,24	20,41	7,44
23.7.	10:00	26,90	20,70	1023,29	1116,15	653,45	21,34	20,75	5,30
23.7.	11:00	27,40	20,70	1091,25	1188,08	681,25	21,49	20,88	5,45
23.7.	12:00	28,10	20,80	1083,00	1183,01	704,29	21,59	20,96	5,70
23.7.	13:00	28,10	20,90	350,16	491,59	964,66	21,73	21,04	6,21
23.7.	14:00	22,30	21,00	266,19	400,98	910,90	21,89	21,12	6,93
23.7.	15:00	19,70	21,00	324,55	438,25	956,08	21,97	21,15	7,35
23.7.	16:00	20,50	21,00	257,33	350,88	890,25	22,03	21,14	7,98
23.7.	17:00	22,30	20,90	283,60	349,99	988,58	22,08	21,15	8,32
23.7.	18:00	23,80	20,90	194,00	234,67	792,47	22,19	21,16	9,25
23.7.	19:00	22,60	20,90	37,32	51,53	219,07	21,97	21,17	7,18
23.7.	20:00	21,30	20,90	0,00	0,00	122,37	21,64	21,12	4,70
23.7.	21:00	19,80	20,90	0,00	0,00	111,47	21,50	21,06	3,93
23.7.	22:00	19,10	20,80	0,00	0,00	177,92	21,44	21,05	3,50
23.7.	23:00	18,20	20,40	0,00	0,00	174,71	21,19	20,47	6,52
24.7.	0:00	18,20	20,70	0,00	0,00	170,95	21,20	20,84	3,25