

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Optimalizace návrhu tepelné izolace**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **František KOVÁČ**  
Osobní číslo: **E10B0221P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Optimalizace návrhu tepelné izolace**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte literární rešerši možností zateplení stavebních objektů.
2. Proveďte teoretickou analýzu tepelných ztrát.
3. Navrhněte řešení zateplení objektu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Rada J. a kol.: Elektrotepelná technika. Praha: SNTL, 1985.
2. Chmúrny I.: Tepelná ochrana budov. Bratislava; Jaga group, 2003.
3. Matlab/COMSOL product help.


Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jaroslav Šnajdr**


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku zateplení budov, především vliv reflexních folií na součinitel prostupu tepla. Dále se zabývá teoretickým výpočtem vlastností reflexních folií a jejich porovnání s hodnotami udávanými výrobcí. Teoretický výpočet je proveden pomocí dvou metod z důvodu ověření výsledků.

## **Klíčová slova**

Přenos tepla, zateplení budov, součinitel prostupu tepla, reflexní folie, COMSOL, Matlab

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on the problems with insulating of buildings. Main focus is on reflective foils and their effect on the heat transfer coefficient. The theoretical model is used for evaluating main parameters of the thermal insulation. For theoretical model there were used two methods for verification of results.

## **Key words**

Heat transfer, thermal insulation of buildings, heat transfer coefficient, reflective foils, COMSOL, Matlab

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 3.6.2013

František Kováč

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za cenné profesionální rady během konzultací, odborné připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA A ZÁKLADNÍ VELIČINY .....</b>	<b>12</b>
1.1 TEPLOTA.....	12
1.2 TEPLLO .....	12
1.3 TEPELNÝ TOK.....	12
1.4 ŠÍŘENÍ TEPLA VEDENÍM.....	13
1.4.1 Teplotní pole.....	13
1.4.2 Tepelný tok.....	13
1.4.3 Součinitel tepelné vodivosti.....	15
1.5 ŠÍŘENÍ TEPLA PROUDĚNÍM.....	16
1.5.1 Součinitel přestupu tepla při přirozeném proudění .....	17
1.5.2 Součinitel přestupu tepla při vynuceném proudění.....	17
1.6 ŠÍŘENÍ TEPLA SÁLÁNÍM.....	17
1.6.1 Zákony sálání.....	20
1.6.2 Součinitel vzájemného sálání.....	21
1.6.3 Součinitel přestupu tepla při sálání.....	22
<b>2 USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV .....</b>	<b>24</b>
2.1 ANALOGIE MEZI TEPLOTNÍM A ELEKTRICKÝM POLEM .....	24
2.1.1 Výpočet součinitele prostupu tepla.....	27
2.1.2 Nevětraná vzduchová vrstva .....	27
2.1.3 Malé nevětrané vzduchové dutiny .....	28
2.2 ŘEŠENÍ V COMSOLU.....	28
<b>3 ZATEPLENÍ KONSTRUKCE.....</b>	<b>31</b>
3.1 ZATEPLENÍ Z VNĚJŠÍ STRANY KONSTRUKCE .....	31
3.1.1 Zateplování obvodového pláště.....	32
3.1.2 Zateplení otvorových výplní.....	33
3.2 ZATEPLENÍ Z VNITŘNÍ STRANY KONSTRUKCE .....	33
3.3 IZOLAČNÍ MATERIÁLY.....	34
3.3.1 Minerální vlna.....	34
3.3.2 Pěnový polystyren .....	34
3.3.3 Skelná vata.....	34
3.4 REFLEXNÍ FOLIE .....	35
3.4.1 Složení reflexní folie.....	35
3.4.2 Parametry folie Lupotherm.....	35
3.4.3 Tepelné vlastnosti reflexních folií.....	36
<b>4 VÝPOČET VLASTNOSTÍ REFLEXNÍCH FOLIÍ.....</b>	<b>37</b>
4.1 ŘEŠENÍ POMOCÍ ELEKTRICKÉHO OBVODU.....	37
4.2 VÝPOČET POMOCÍ COMSOLU .....	39
4.3 PROGRAM PRO VÝPOČTY PROSTUPU TEPLA .....	41
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>44</b>



## Seznam obrázků, tabulek a grafů

OBR. 1.1 JEDNOROZMĚRNÉ TEPLTNÍ POLE [3].....	14
OBR. 1.2 VÍCEROZMĚRNÉ TEPLTNÍ POLE [3].....	14
OBR. 1.3 PRŮBĚH PROUDĚNÍ VZDUCHU OKOLO POVRCHU TĚLESA [3].....	17
OBR. 1.4 SCHÉMA ROZDĚLENÍ SÁLAVÉ ENERGIE [3].....	19
OBR. 1.5 VLIV ODCHÝLENÍ SÁLAVÉHO TOKU OD NORMÁLY [3].....	21
OBR. 1.6 VÝMĚNA TEPLA SÁLÁNÍM [3].....	21
OBR. 2.1 ZNÁZORNĚNÍ TEPLOT KOLEM KONSTRUKCE [3].....	24
OBR. 2.2 ZÁVISLOST TEPLoty NA VZDÁLENOSTI V KONSTRUKCI.....	27
OBR. 2.3 MALÉ VZDUCHOVÉ DUTINY [3].....	28
OBR. 2.4 NASTAVENÍ MATERIÁLŮ.....	29
OBR. 2.5 ZÁVISLOST TEPLoty NA VZDÁLENOSTI V KONSTRUKCI.....	30
OBR. 3.1 ZÁVISLOST PROSTUPU TEPLA $U$ NA TLOUŠŤCE IZOLACE $D$ .....	31
OBR. 3.2 PRŮBĚH TEPLOT PRO ZATEPLENÍ VNĚJŠÍ STRANY KONSTRUKCE [7].....	32
OBR. 3.3 KONTAKTNÍ ZATEPLOVACÍ SYSTÉM [6].....	32
OBR. 3.4 PRŮBĚH TEPLOT PRO ZATEPLENÍ VNITŘNÍ STRANY KONSTRUKCE [7].....	33
OBR. 3.5 ILUSTRACE PŘÍČEK VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE [5].....	35
OBR. 3.6 SCHÉMATICKÉ SLOŽENÍ FOLIE [5].....	36
OBR. 4.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA REFLEXNÍ FOLIE.....	37
OBR. 4.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA CELÉ IZOLACE.....	38
OBR. 4.3 ZÁVISLOST TEPLoty NA VZDÁLENOSTI V KONSTRUKCI.....	38
OBR. 4.4 NASTAVENÍ PARAMETRŮ.....	39
OBR. 4.5 V BODECH OZNAČENÝCH MODŘE DOCHÁZÍ K RADIACI.....	40
OBR. 4.6 ZÁVISLOST TEPLoty NA VZDÁLENOSTI V KONSTRUKCI.....	40
OBR. 4.7 UKÁZKA GUI.....	41
TAB. 1.1 PŘÍKLADY HODNOT SOUČINITELŮ TEPELNÉ VODIVOSTI.....	16
TAB. 1.2 SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.....	18
TAB. 2.1 ANALOGIE MEZI POLI.....	25
TAB. 2.2 VÝSLEDNÉ TEPLoty IZOLACE.....	26
TAB. 2.3 VÝSLEDNÉ TEPLoty IZOLACE.....	30
TAB. 3.1 PŘEHLED MATERIÁLŮ.....	34
TAB. 3.2 PARAMETRY FOLIE.....	36
TAB. 4.1 VÝSLEDNÉ TEPLoty IZOLACE.....	38
TAB. 4.2 VÝSLEDNÉ TEPLoty IZOLACE.....	40

## Seznam symbolů a zkratek

C	Součinitel sálání šedého tělesa	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$
$C_{\varepsilon}$	Součinitel sálání černého tělesa	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$
E	Součinitel vzájemného sálání	[-]
$h_a$	Součinitel přestupu tepla vedením a prouděním	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
$h_c$	Součinitel přestupu tepla prouděním	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
$h_r$	Součinitel přestupu tepla při sálání	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
L	Tepelná vodivost	$[\text{W}/\text{K}]$
q	Hustota tepelného toku	$[\text{W}/\text{m}^2]$
Q	Teplo	[J]
R	Tepelný odpor	$[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$
$R_e$	Odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce	$[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$
$R_i$	Odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce	$[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$
T	Termodynamická teplota	[K]
U	Součinitel prostupu tepla	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
$\Delta T$	Rozdíl teplot	
$\alpha$	Součinitel tepelné vodivosti	$[\text{m}^2/\text{s}]$
$\varepsilon$	Emisivita	[-]
$\theta$	Celsiova teplota	$[\text{°C}]$
$\theta_s$	Teplota povrchu konstrukce	$[\text{°C}]$
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
$\Phi$	Tepelný tok	[W]
$\varphi$	Poměr sálání	[-]
CAD	Počítačem podporované projektování	
GUI	Grafické uživatelské rozhraní	
HDPE	Polyethylen s vysokou hustotou	
PVC	Polyvinylchlorid	
VZDM	Vzduchová mezera	

## Úvod

Tato práce se zabývá problematikou zateplování budov. Především budu zkoumat vlastnosti reflexních folií a jejich porovnání s ostatními typy tepelné izolace. Cílem práce je teoreticky ověřit vlastnosti reflexních folií a porovnat je s hodnotami udávanými výrobcí.

Práce je rozdělena do čtyř částí. První část se zabývá teplem a přenosem tepla. Druhá část popisuje postup výpočtu tepla v ustáleném stavu, analogii mezi polem tepelným a elektrickým a možnost využití simulačních programů. Další část obsahuje rešerši na téma zateplování konstrukcí. V této části jsou popsány metody a materiály, které se využívají na území České republiky. V poslední části se zabýváme teoretickým výpočtem vlastností tepelných folií a jejich vliv na zateplení budovy.

# 1 Způsoby přenosu tepla a základní veličiny

## 1.1 Teplota

Teplota je stavová veličina a popisuje kinetickou energii molekul. Jednotkou termodynamické teploty je kelvin [K]. Kromě termodynamické teploty  $T$  se používá i Celsiova teplota  $\theta$ , její jednotkou jsou stupně Celsia [ $^{\circ}\text{C}$ ] více v [3].

Vztah mezi Celsiovou a termodynamickou teplotou je definován jako rozdíl mezi dvěma termodynamickými teplotami  $T$  a  $T_0$ , kde  $T_0 = 273,15 \text{ K}$  [3],

$$\theta = T - T_0 \text{ [}^{\circ}\text{C]}. \quad (1.1)$$

V anglosaských krajinách se používá ještě Fahrenheitova stupnice. Využívá fixní body  $32 \text{ }^{\circ}\text{F}$  nebo  $212 \text{ }^{\circ}\text{F}$  [3],

$$\theta_f = \frac{9}{5} \cdot \theta + 32 \text{ [}^{\circ}\text{F]}. \quad (1.2)$$

## 1.2 Teplo

Teplo se značí  $Q$  a základní jednotkou je joul [J]. Popisuje vnitřní mikro procesy, které neustále probíhají v látkách, jako srážky atomů a pohyb molekul. Je to energie, která se samovolně přenáší mezi látkami. Při tomto procesu není konána žádná práce. Přenos tepla probíhá vždy ze systému s vyšší teplotou do systému s nižší teplotou. Tento přenos probíhá, dokud se teploty nevyrovnají více v [1][2].

## 1.3 Tepelný tok

Tepelný tok  $\Phi$  je vektorovou veličinou. Udává se ve wattech [W] vyjadřuje tok tepla za jednotku času, vždy se šíří ve směru z teplejšího místa do studenějšího místa. V ustáleném stavu je definován jako

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \text{ [W]}. \quad (1.3)$$

Někdy se tepelný tok udává jako

$$\Phi = L \cdot \Delta T \text{ [W]}, \quad (1.4)$$

kde  $L$  je tepelná vodivost [W/K] a  $\Delta T$  je rozdíl teplot [K] [2][3].

Teplo se šíří třemi způsoby, vedením (kondukce), prouděním (konvekce) a sáláním (radiace). Nejčastěji se setkáváme s případy kombinace všech způsobů. Na přenosu tepla se nepodílí rovnoměrně, ale jejich poměry se liší. Za určitých podmínek můžeme některý ze způsobů přenosu tepla zanedbat pro zjednodušení [2].

## 1.4 Šíření tepla vedením

Přenos tepla vedením probíhá v pevných, kapalných a plynných látkách. V pevných látkách se teplo přenáší pomocí vibrací molekul v mřížce a volných elektronů. V kapalinách a plynech se přenáší díky rozptylu a srážkám molekul při jejich náhodném pohybu. Šíření tepla vedením vzniká, pokud je v různých bodech tělesa rozdílná teplota [1][3].

### 1.4.1 Teplotní pole

Teplotní pole definuje teplotu v závislosti na poloze a čase, jedná se o skalár. Matematicky jej můžeme vyjádřit jako

$$\theta = f(x, y, z, t). \quad (1.5)$$

Všeobecně se teplota mění s polohou a časem. Takové pole se nazývá nestacionární. V případě, že se teplota nemění s časem, mluvíme o stacionárním poli [3].

Z teplotního pole můžeme získat izometrické čáry (plochy, jestli se jedná o vícerozměrné pole). Získáme je tak, že spojíme body se stejnou teplotou. Izometrické čáry se nemohou překrývat, protože každý bod může mít pouze jednu hodnotu teploty. Změna teploty vztažená na jednotku délky se nazývá gradient teploty. Pokud gradient nabývá kladných hodnot ve směru změny teploty, teplota se zvětšuje. Pro záporné hodnoty se teplota zmenšuje [3].

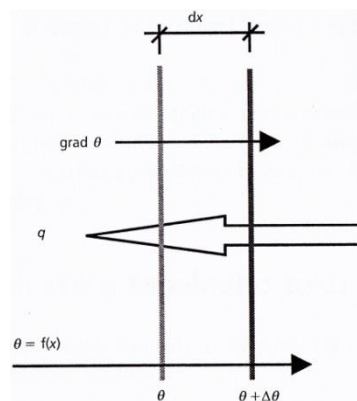
### 1.4.2 Tepelný tok

Šíření tepla vedením charakterizuje tepelný tok. Vektor tepelného toku má opačnou orientaci než teplotní gradient a experimentálně se zjistilo, že tepelný tok je nepřímo úměrný teplotnímu gradientu. Matematicky je tepelný tok popsán prvním Fourierovým

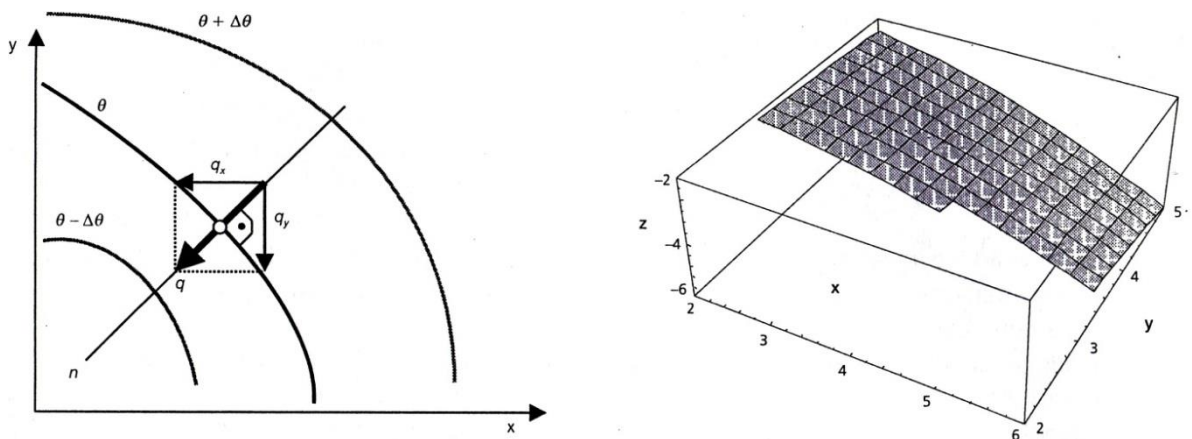
zákonem [1][3]

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(\theta) [\text{W}/\text{m}^2]. \quad (1.6)$$

Rovnice (1.6) definuje závislost hustoty tepelného toku  $q$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] na gradientu teploty [ $\text{K}/\text{m}$ ] a součiniteli tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]. Záporné znamínko je použito proto, že tepelný tok se šíří v opačném směru než teplotní gradient (*Obr. 1.1*). Rovnice (1.6) platí pouze pro ustálený stav [1][3].



*Obr. 1.1 Jednorozměrné teplotní pole [3]*



*Obr. 1.2 Vícerozměrné teplotní pole [3]*

Pro vícerozměrné teplotní pole je teplotní gradient vektor. Jeho směr je určen normálou k izometrické ploše (*Obr. 1.2*). Jeho velikost určíme vztahem

$$\text{grad}(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial n}. \quad (1.7)$$

Vektor hustoty tepelného toku má stejnou orientaci jako normála k izometrické ploše a skládá se ze tří složek

$$q_x = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad q_y = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad q_z = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z}. \quad (1.8)$$

Výsledný vektor získáme složením jednotlivých prvků z rovnic (1.8)

$$q = i \cdot q_x + j \cdot q_y + k \cdot q_z, \quad (1.9)$$

kde  $i, j, k$  jsou jednotkové vektory ve směru os  $x, y, z$  [3].

Fourierův první zákon můžeme všeobecně vyjádřit jako

$$q = -\lambda \left( i \frac{\partial \theta}{\partial x} + j \frac{\partial \theta}{\partial y} + k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right). \quad (1.10)$$

V rovnici (1.10) předpokládáme, že se jedná o izotropní látku, tzn. hodnota součinitele tepelné vodivosti je ve všech směrech stejná [2][3].

Pro neustálené vedení tepla platí druhý Fourierův zákon

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (1.11)$$

kde  $\alpha$  je součinitel tepelné vodivosti v  $[\text{m}^2/\text{s}]$  [1][2][3].

### 1.4.3 Součinitel tepelné vodivosti

Tepelná vodivost určuje schopnost látky vést teplo vedením. Hodnota tepelné vodivosti se liší u každého materiálu. Charakterizuje jí součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  ve  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Její hodnoty jsou ovlivňovány různými faktory jako hustota, vlhkost, chemické složení a teplota [1][3].

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/(m.K)]
Železo beton	1,43
Vzduch	0,026
PVC	0,2
Měď	372

Tab. 1.1 Příklady hodnot součinitelů tepelné vodivosti

## 1.5 Šíření tepla prouděním

Přenos tepla prouděním probíhá v kapalných a plynných látkách. Teplo se přenáší tak, že se přesune částice s její vnitřní energií konvekci nebo si částice mezi sebou vymění energii kondukcí [1][3].

Jestliže proudí vzduch okolo povrchu konstrukce, vzniká mezní vrstva, ve které se rychlost vzduchu mění spojitě. U konstrukce má nulovou rychlost a s rostoucí vzdáleností se zvětšuje rychlost až do rychlosti okolního vzduchu. V této oblasti se může vzduch pohybovat turbulentně i laminárně [3].

Pokud v celém obsahu plynu (tekutiny) není stejná teplota, vzniká samovolný pohyb částic v plynu. Částice s vyšší teplotou stoupají a tím vzniká přirozené proudění. Pohyb můžeme vyvolat i vnějšími vlivy (čerpadla, ventilátory) a tím vzniká nucené proudění. Při velmi rychlém proudění se zmenšuje vliv přirozeného proudění a při šíření tepla není rozhodující rozdíl teplot, ale pouze rychlost proudění plynu (kapaliny) [1][3].

Výměně tepla mezi pevnou látkou a plynem vlivem proudění se nazývá přestup tepla. Přestup tepla je popsán Newtonovým zákonem

$$q_c = h_c(\theta - \theta_s), \quad (1.12)$$

kde  $q_c$  je hustota tepelného toku udávána v [W/m<sup>2</sup>],

$h_c$  – součinitel přestupu tepla při proudění v [W/(m<sup>2</sup>.K)],

$\theta$  – teplota vzduchu v °C,

$\theta_s$  – teplota povrchu konstrukce v °C [3].

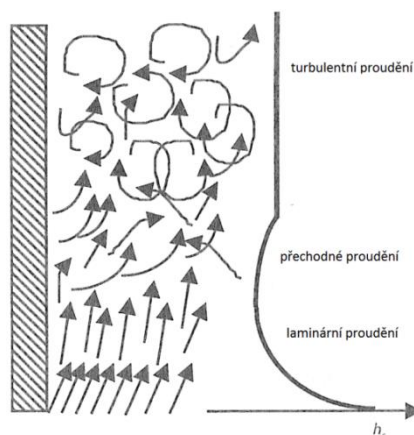
Součinitel přestupu tepla při proudění není konstantní veličina. Závisí na mnoha parametrech, které popisují tvar a umístění konstrukce, pohyb vzduchu a další. Určujeme ho na základě experimentálních měření. Při měření musíme rozlišovat přirozené a nucené proudění [3].



### 1.5.1 Součinitel přestupu tepla při přirozeném proudění

Přirozené proudění vzniká díky rozdílné hmotnosti teplých a studených částic vzduchu. Pokud vložíme těleso do plynného prostředí s rozdílnou teplotou, vznikne kolem tělesa proudění (Obr. 1.3). Ve spodní části je laminární proudění, které se v přechodné oblasti mění v turbulentní proudění [3].

Součinitel přestupu tepla závisí na mnoha parametrech, proto se parametry s malým vlivem zanedbávají. Z experimentálních měření se přišlo na několik empirických vzorců, které platí přesně pouze pro podmínky experimentu. Proto využíváme zákonu podobnosti. Geometrická podobnost je rozšířena o další fyzikální veličiny, které jsou důležité (rychlost, teplota, čas, teplotní vodivost a další). Jsou vyjádřeny bezrozměrnými kritérii, která se musí pro daný jev rovnat. Podobná čísla nám dovolují přenášet výsledky z modelu na skutečné řešení [3].



Obr. 1.3 Průběh proudění vzduchu okolo povrchu tělesa [3]

### 1.5.2 Součinitel přestupu tepla při vynuceném proudění

Vynucené proudění vzniká působením čerpadla nebo ventilátoru. Ve stavební technice vynucené proudění způsobuje většinou vítr. Při nízkých rychlostech vzniká laminární proudění a pro vysoké rychlosti se jedná o turbulentní proudění [3].

## 1.6 Šíření tepla sáláním

Sálání je přenos tepla pomocí elektromagnetických vln. Je to jediný přenos tepla, který může probíhat i ve vakuu. Sálání se zvyšuje s teplotou a sálavými vlastnostmi tělesa. Z tepelného hlediska je důležitá vlnová délka záření. Soubor všech druhů elektromagnetických vln se nazývá elektromagnetické záření. Spektrum

elektromagnetického záření je popsáno v *Tab. 1.2*. Ne všechny složky elektromagnetického záření se podílí na přenosu tepla [3].

Vlnová délka $\lambda$ (nm)	Oblast spektra
$\lambda < 10^{-2}$	kosmické záření
$10^{-2}$ až $10^2$	rentgenové záření
100 až 380	UV záření
380 až 780	viditelné záření
100 až $10^5$	tepelné sálání
700 až $10^6$	infračervené záření

*Tab. 1.2 Spektrum elektromagnetického záření*

Tepelné sálání těles se určuje pomocí jejich teplotního stavu. Při stejné teplotě mají různé materiály různé sálavé vlastnosti. Skutečná tělesa porovnáváme s ideálním tělesem za stejné teploty. Ideální těleso má maximální sálavé schopnosti při určité teplotě. Nazývá se také černé těleso nebo Planckův zářič. Toto těleso pohlcuje veškeré záření, které na něj dopadá [3].

Energie vyzářena tělesem může být částečně absorbována okolním prostředím. Schopnost absorbovat se liší pro různá tělesa. Kapalné látky se chovají stejně jako pevná tělesa a platí pro ně stejné zákony. Výjimkou je částečná propustnost některých kapalin, kdy kapalina propouští určité vlnové délky [3].

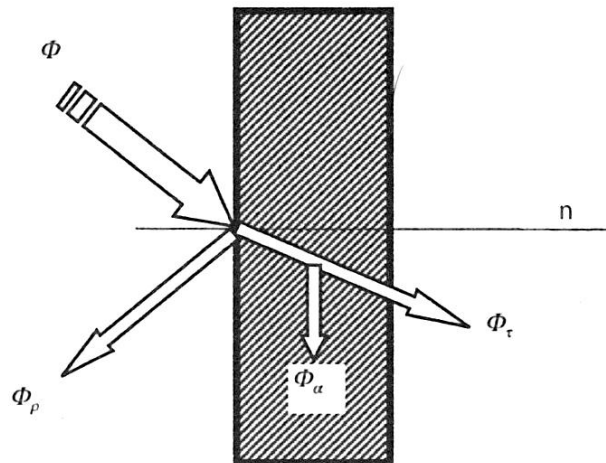
Intenzita výměny tepla závisí na teplotě, sálavých vlastnostech (schopnost sálat, pohlcovat a odrážet), tvaru, rozměrech a vzájemné poloze těles. Výsledný sálavý tok  $\Phi$  se udává ve wattech. Je dán rovnicí a schematicky zobrazen na Obr. 1.4

$$\Phi = \Phi_{\alpha} + \Phi_{\rho} + \Phi_{\tau}, \quad (1.13)$$

kde  $\Phi_{\alpha}$  je část pohlcována tělesem,

$\Phi_{\rho}$  – část odražená tělesem,

$\Phi_{\tau}$  – část procházející tělesem.



Obr. 1.4 Schéma rozdělení sálavé energie [3]

Rovnice 1.13 lze upravit do tvaru

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (1.14)$$

Z tohoto tvaru vyplývá, že mohou vzniknout tři případy

1.  $\alpha = 1, \rho = \tau = 0$

Tento případ platí pro černé těleso. Ideální případ, kdy těleso absorbuje veškeré záření [2] [3].

2.  $\rho = 1, \alpha = \tau = 0$

Těleso odráží veškeré záření. Odražené záření se odrazí ve stejném úhlu, pod kterým dopadá, nebo se odrazí do všech směrů [2] [3].

3.  $\tau = 1, \alpha = \rho = 0$

Veškerá energie prochází tělesem. Tuhá tělesa a kapaliny jsou neprostupné, proto  $\tau = 0$

$$\alpha + \rho = 1. \quad (1.15)$$

Z této rovnice vyplývá, že těleso nemůže dobře pohlcovat zářivou energii a zároveň ji odrážet [2] [3].

### 1.6.1 Zákony sálání

Základ pro výpočty sálavého toku tvoří Stefanův-Bolzmannův zákon:

$$q_{\check{c}} = C_{\check{c}} \cdot T^4, \quad (1.16)$$

kde  $C_{\check{c}}$  je součinitel sálání černého tělesa ( $C_{\check{c}}=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ),

$T$  – termodynamická teplota černého tělesa v K.

Jelikož se ve skutečnosti černá tělesa nevyskytují, musíme u šedých těles určit jejich emisivitu. Emise je proces, kdy se kmitání molekul přemění na elektromagnetické vlnění. Emise tělesa závisí na povrchu, vlnové délce a také na povrchové teplotě tělesa. Emisivitu tělesa získáme jako poměr sálavého toku černého a šedého tělesa [2][3]

$$\varepsilon = \frac{q_{\check{s}}}{q_{\check{c}}}. \quad (1.17)$$

Emisivita je vždy menší než 1. Výsledná hustota sálavého toku je

$$q_{\check{s}} = \varepsilon q_{\check{c}} = \varepsilon C_{\check{c}} T^4. \quad (1.18)$$

Součinitel sálání šedého tělesa je

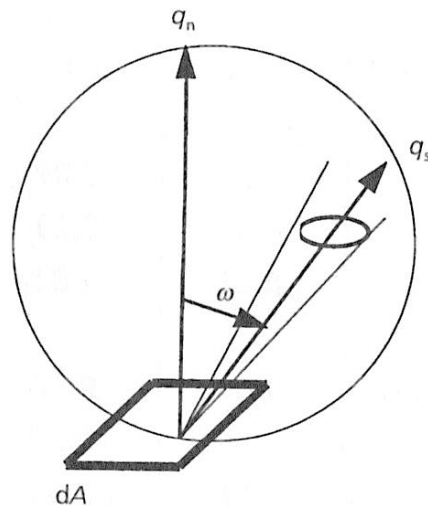
$$C = \varepsilon C_{\check{c}}. \quad (1.19)$$

Lambertův zákon definuje velikost sálavého toku v určitém úhlu, který je vyzářený z elementární plochy  $dA$  (Obr. 1.5). Se zvětšujícím se úhlem  $\omega$  se zmenšuje hustota sálavého toku [3].

$$q_{\check{s}} = q_n \cos \omega. \quad (1.20)$$

Celkový tepelný tok vyzářený do poloprostoru je

$$q_{\check{s}} = \pi q_n. \quad (1.21)$$

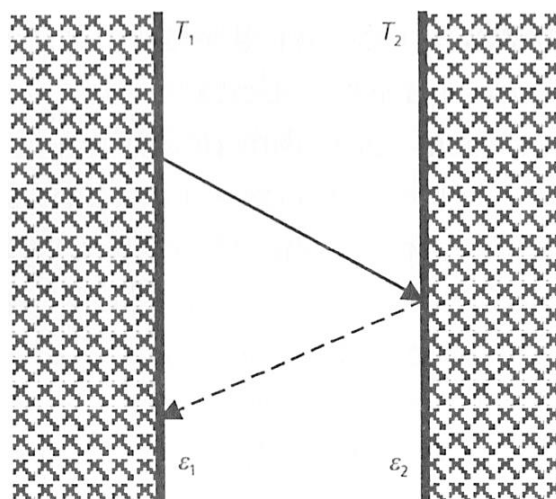


Obr. 1.5 Vliv odchýlení sálavého toku od normály [3]

### 1.6.2 Součinitel vzájemného sálání

Pokud plochy nejsou absolutně černé a vyzařují navzájem sálavou energii, vznikají odražené paprsky, které mají vliv na přenos tepla. Celý proces vzájemného sálání tak tvoří mnohokrát odražené a pohlcené paprsky. V tomto případě nemůžeme použít součinitel sálání černého tělesa  $C_\varepsilon$  místo toho použijeme součinitel vzájemného sálání  $C_{vs}$ , který určíme pomocí součinitelů navzájem ozářených ploch [3].

Zavádíme poměr sálání  $\varphi$ , který udává, jak velká část vysálané energie dopadá na plochu. Poměr sálání  $\varphi_{12}$  popisuje, jak velká část vysálané energie z plochy  $A_1$  dopadá na plochu  $A_2$  [3].



Obr. 1.6 Výměna tepla sáláním [3]

V případě výměny tepla mezi rovnoběžnými konstrukcemi (Obr. 1.6). Jednotlivé plochy mají teplotu  $T_1$  a  $T_2$  s vlastními součiniteli sálání  $C_1$  a  $C_2$ . Pokud pro rovnoběžné

plochy platí  $A_1=A_2=A$  a zároveň je jejich vzdálenost menší, než jejich rozměry, je poměr sálání

$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1. \quad (1.22)$$

Součinitel vzájemného sálání určíme ze vztahu

$$C_{vs} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_{\check{c}}}} = \frac{C_{\check{c}}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = C_{\check{c}} \cdot E, \quad (1.23)$$

kde E je upravený součinitel vzájemného sálání s hodnotou podle výrazu

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (1.24)$$

### 1.6.3 Součinitel přestupu tepla při sálání

Tepelný tok vyvolaný sáláním je vyjádřen vztahem

$$\Phi_{12} = C_{vs}(T_1^4 - T_2^4)\varphi_{12}A_1. \quad (1.25)$$

V praxi je tento vzorec upraven, aby se linearizoval a zavedl se součinitel přestupu tepla při sálání

$$\Phi_{12} = h_r \cdot A_1 \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.26)$$

kde  $h_r$  je součinitel přestupu tepla při sálání ve  $W/(m^2 \cdot K)$  a  $T_1, T_2$  jsou teploty navzájem ozářených ploch v  $^{\circ}C$  [3].

Součinitel přestupu tepla při sálání  $h_r$  je

$$h_r = 4C_{vs}T_m^3\varphi_{12}, \quad (1.27)$$

kde  $T_m$  je střední hodnota v K určená ze vztahu

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (1.28)$$

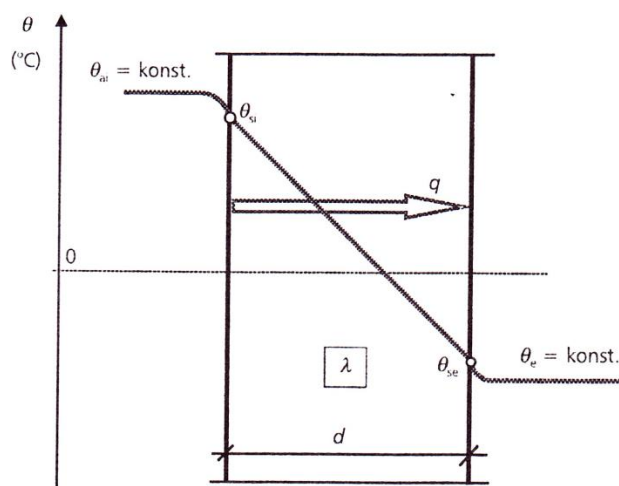
Do rovnice (1.23) dosadíme za  $\varphi_{12}=1$ , protože se jedná o rovnoběžné plochy a z rovnice (1.19) dosadíme  $C_{vs}$ . Z toho získáme tvar [3]

$$h_r = 4C_{\zeta}ET_m^3. \quad (1.29)$$

## 2 Ustálený teplotní stav

Ustálený teplotní stav se využívá pro zjednodušení výpočtu. V případě aplikace na výpočet izolace, stavební konstrukce odděluje dvě prostředí s rozdílnou teplotou. Díky rozdílu teplot nám vznikne tepelný tok, který se šíří konstrukcí z teplejšího prostředí do studenějšího [1][3].

Proto v zimním období se tepelný tok šíří z interiéru do exteriéru. Na Obr. 2.1 vidíme, že teploty na povrchu konstrukce se nerovnají teplotám okolního vzduchu.



Obr. 2.1 Znárodnění teplot kolem konstrukce [3]

### 2.1 Analogie mezi teplotním a elektrickým polem

Analogie mezi těmito poli je velmi výrazná, proto můžeme výpočet teplotního pole nahradit elektrickým polem. Obě pole jsou nevírová a zřídlová. V následující tabulce jsou zobrazeny odpovídající veličiny [2][3].

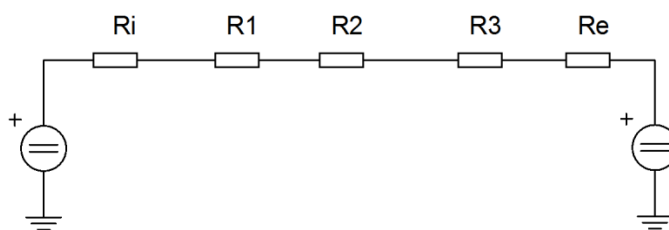


Elektrické pole		Teplotní pole	
Potenciál		Termodynamická teplota	
$\Phi$	[V]	T	[K]
Vodivost		Součinitel tepelné vodivosti	
$\Gamma$	$\left[\frac{1}{\Omega \cdot m}\right]$	$\lambda$	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Elektrický odpor		Tepelný odpor	
$R = \frac{d}{\gamma \cdot S}$	[ $\Omega$ ]	$R = \frac{d}{\lambda \cdot S}$	$\left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]$
Intenzita elektrického pole		Intenzita teplotního pole	
$E = -grad(V)$	$\left[\frac{V}{m}\right]$	$E = -grad(T)$	$\left[\frac{K}{m}\right]$
Elektrický proud		Tepelný tok	
$I = \int_S -\gamma \cdot grad(V) \cdot dS$	[A]	$\Phi = \int_S -\lambda \cdot grad(T) \cdot dS$	[W]

Tab. 2.1 Analogie mezi poli

Z důvodu těchto podobností lze nahradit tepelný problém ekvivalentním elektrickým obvodem. Postup si ukážeme v následujícím příkladu.

Uvažujeme zeď z betonu o tloušťce 20 cm a tepelnou vodivostí  $\lambda$  1,05 W/(m.K) s izolací z minerální vlny o tloušťce 15 cm a tepelné vodivosti  $\lambda$  0,047 W/(m.K). Na povrchu konstrukce je omítka o síle 1,8 cm a tepelnou vodivostí 0,88 W/(m.K). Teplota uvnitř interiéru je 20 °C a venkovní teplota je -15 °C.



1. Nejdříve vypočteme tepelný odpor jednotlivých vrstev

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1} = \frac{0,2}{1,05} = 0,190 \frac{m^2 \cdot K}{W},$$

$$R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2} = \frac{0,15}{0,047} = 3,191 \frac{m^2 \cdot K}{W},$$

$$R_3 = \frac{d_3}{\lambda_3} = \frac{0,018}{0,88} = 0,020 \frac{m^2 \cdot K}{W}.$$

2. Vypočteme celkový odpor, jako sériovou kombinaci tepelných odporů

$$R_c = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_e = 0,13 + 0,19 + 3,191 + 0,020 + 0,04 = 3,571 \frac{m^2 \cdot K}{W}.$$

Hodnoty  $R_i$  a  $R_e$  jsou dány podle normy ČSN EN 6946. Z předchozího vztahu vyplývá, že celkový odpor závisí pouze na velikosti jednotlivých odporů a nezávisí na jejich pořadí.

3. Zjistíme tepelný tok konstrukcí

$$\Phi = \frac{T_i + T_e}{R_c} = \frac{293,15 - 258,15}{3,571} = 9,801 W.$$

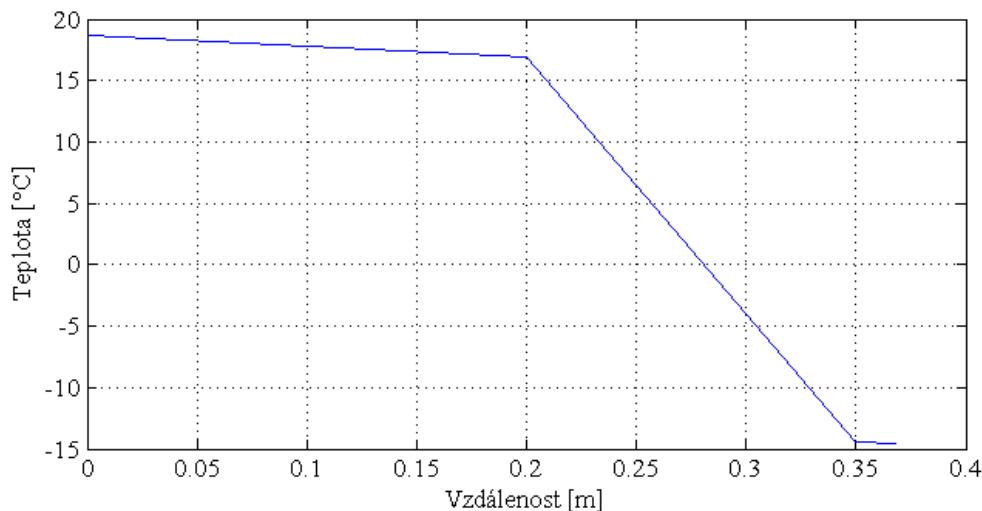
4. Výsledné teploty v konstrukci vypočítáme jako úbytky napětí na jednotlivých odporech

$$T_1 = T_i - (\Phi \cdot R_i) = 293,15 - (9,801 \cdot 0,130) = 291,875 K.$$

Zbylé teploty vypočteme stejným postupem. V Tab. 2.2 jsou vypsány vypočtené hodnoty na rozhraních jednotlivých vrstev a na Obr. 2.2 je zobrazen průběh teploty v konstrukci. Výsledná hodnota součinitele průstupu tepla je  $0,280 W/(m^2K)$ .

Pozice	Interiér	Vnitřní strana zdi	Zed'izolace	Izolace-omítka	Vnější strana omítky	Exteriér
$\theta[^\circ C]$	20	18,726	16,86	-14,408	-14,608	-15

Tab. 2.2 Výsledné teploty izolace



Obr. 2.2 Závislost teploty na vzdálenosti v konstrukci

### 2.1.1 Výpočet součinitele prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla je celková výměna tepla v konstrukci při ustáleném stavu. Velikost se určuje pomocí tepelného odporu konstrukce a odporu okolí. Zahrnuje i vliv tepelných mostů

$$U = \frac{1}{R_i + R + R_e}, \quad (2.1)$$

kde  $R_i$  je odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce,

$R_e$  – odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce,

$R$  – celkový odpor konstrukce [3].

### 2.1.2 Nevětraná vzduchová vrstva

Za nevětranou vzduchovou vrstvu považujeme dutinu, která je uzavřená. Tepelný odpor vzduchové vrstvy se vypočítá podle vzorce (2.2). Pro použití tohoto vzorce je potřeba, aby šířka a délka vzduchové dutiny byla alespoň desetinásobek hloubky [3]

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r}, \quad (2.2)$$

kde  $h_a$  je součinitel přestupu tepla vedením a prouděním [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],

$h_r$  – součinitel přestupu tepla sáláním v [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ].

Kombinované šíření tepla vedením a prouděním se určí pro vodorovné toky jako větší z hodnot  $1,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  a  $0,025/d \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [3].

Součinitel přestupu tepla sáláním se vypočítá podle kapitoly 1.6.3 [3].

### 2.1.3 Malé nevětrané vzduchové dutiny

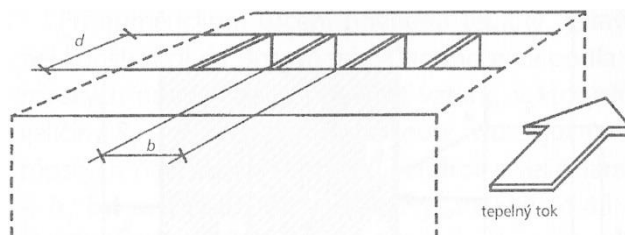
Malá vzduchová dutina se šířkou, která je menší než desetinásobek její hloubky (Obr. 2.3), má tepelný odpor podle vztahu [3]

$$R_g = \frac{1}{h_a + 0,5 \cdot E \cdot h_{ro} \cdot (1 + \sqrt{1 + d^2/b^2} - d/b)}, \quad (2.3)$$

kde  $d$  je hloubka vzduchové dutiny [m],

$b$  – šířka vzduchové dutiny [m],

$E$ ,  $h_a$  a  $h_{ro}$  se určí jako v kapitole 2.1.2.



Obr. 2.3 Malé vzduchové dutiny [3]

## 2.2 Řešení v COMSOLu

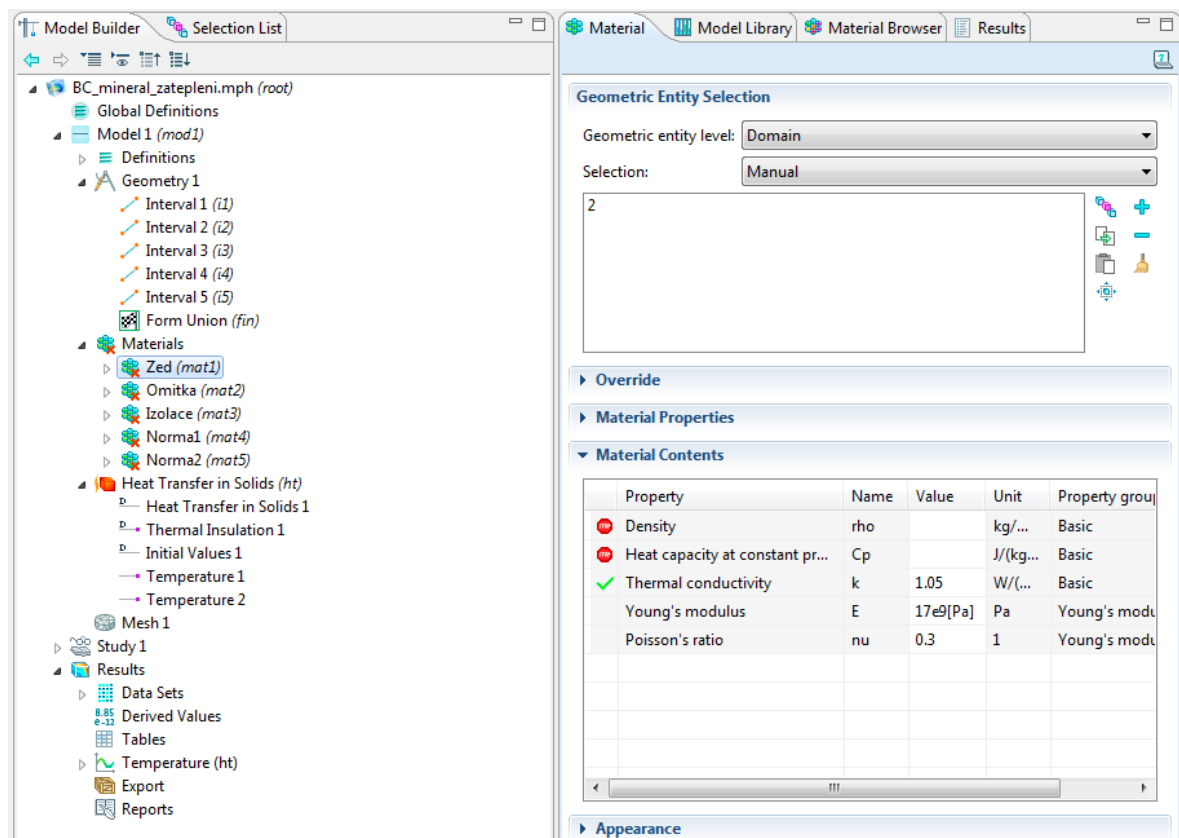
Comsol je software využívaný k simulování multifyzikálních problémů. Obsahuje moduly pro výpočet elektrických, tepelných, mechanických a jiných problémů. Jako každý simulační program se skládá z preprocesoru, solveru a postprocesoru. Preprocesor slouží k definování problému (geometrie, vlastnosti materiálů, okrajové podmínky a další). Solver zajišťuje výpočet řešení problému. K řešení soustav rovnic využívá metodu sdružených gradientů. Postprocesor slouží k zobrazení výsledků (grafy závislostí, gradienty).

Pomocí Comsolu vyřešíme stejný příklad jako v kapitole 2.1.

1. Příklad řešíme jako jednorozměrný model, který vybereme v „Model Wizard“. Následně vybereme modul pro výpočet tepla „Heat Transfer in Solids“ a zvolíme analýzu v ustáleném stavu.

2. Vytvoříme geometrický model problému. Pomocí vestavěných nástrojů nebo model vytvoříme pomocí CAD software a následně importujeme. Výsledný model se skládá z přímk, které symbolizují jednotlivé vrstvy v konstrukci.

3. Přidáme materiály, ze kterých se skládá konstrukce. Vlastnosti materiálů upravíme, aby odpovídaly zadání příkladu, a vybereme příslušnou geometrii. U vlastností materiálu stačí vyplnit pouze hodnotu tepelné vodivosti, protože se jedná o výpočet ustáleného stavu. Z tohoto důvodu můžeme přehlížet varování, která zobrazuje COMSOL u nevyplněných vlastností.



Obr. 2.4 Nastavení materiálů

4. Při tvorbě modelu nesmíme zapomenout na přenos tepla v interiéru a exteriéru. Jejich hodnoty jsou dány normou ČSN EN 6946. Přidáme je jako další vrstvy izolace, kde zvolíme jejich šířku a tepelnou vodivost, aby jejich tepelný odpor byl  $0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  pro interiéru a  $0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  pro exteriéru.

5. Nastavíme teploty pro krajní body modelu, které symbolizují teplotu v interiéru a venkovní teplotu. Teploty nastavíme pomocí okrajové podmínky „Temperature“.

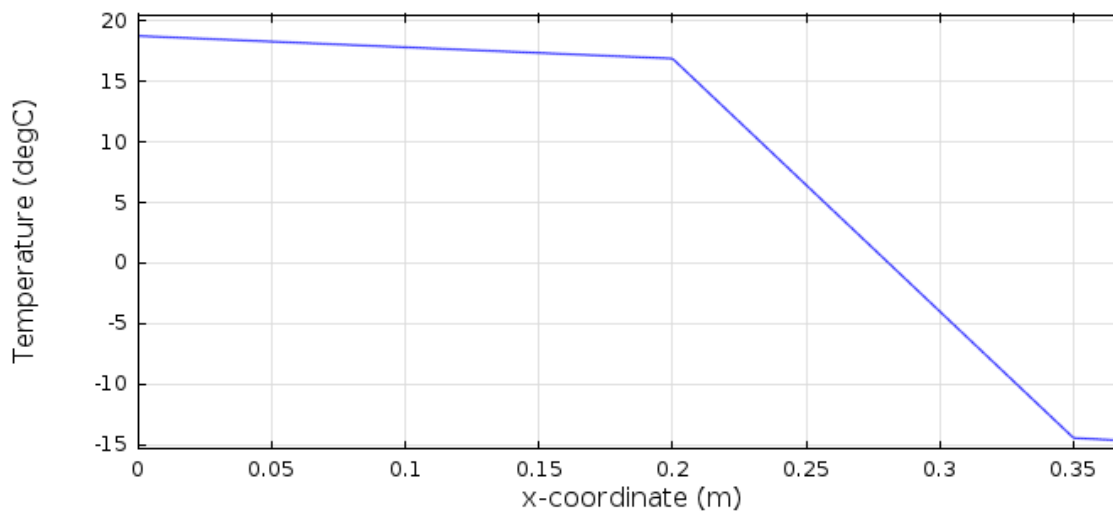
6. Nastavíme Mesh na „Extremely fine“ a ve „Study“ zvolíme „Compute“

7. Z výsledných hodnot v Tab. 2.3 vidíme, že hodnoty jsou shodné s první metodou

výpočtu. Na Obr. 2.5 jsou zobrazeny hodnoty v konstrukci. Části modelu, které nahrazují přenos tepla v interiéru a exteriéru nezobrazujeme.

Pozice	Interiér	Vnitřní strana zdi	Zed'-izolace	Izolace-omítka	Vnější strana omítky	Exteriér
$\theta[^\circ\text{C}]$	20	18,726	16,86	-14,408	-14,608	-15

Tab. 2.3 Výsledné teploty izolace

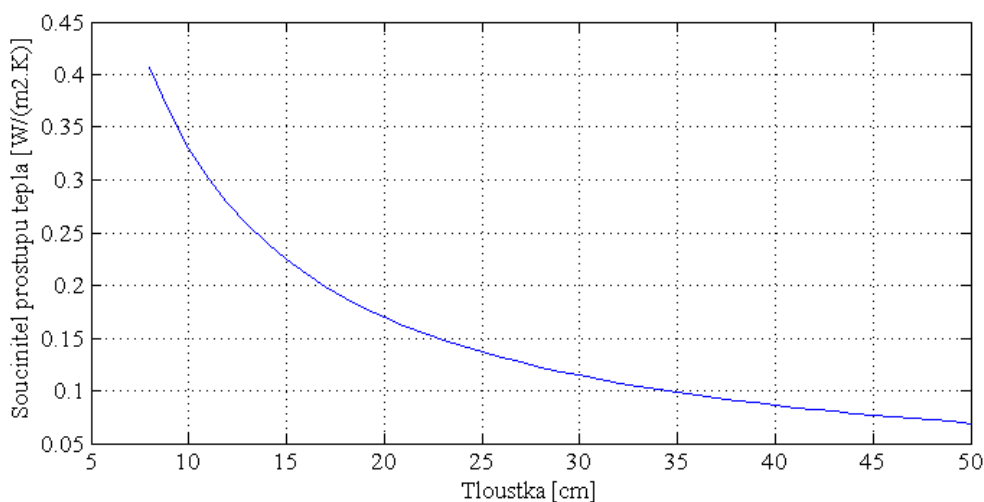


Obr. 2.5 Závislost teploty na vzdálenosti v konstrukci

### 3 Zateplení konstrukce

Budovy se zateplují především kvůli energetickým úsporám. Zateplení má ale i další výhody (snížení hlučnosti, ochrana konstrukce proti vnějším vlivům, odstranění tepelných mostů) [7].

Při návrhu zateplení volíme tloušťku izolace a izolační materiál. V praxi se většinou volí šířka izolace v rozmezí 80 mm až 500 mm. Tloušťku tepelné izolace volíme co největší, dle konstrukčních omezení a finančních možností [8].



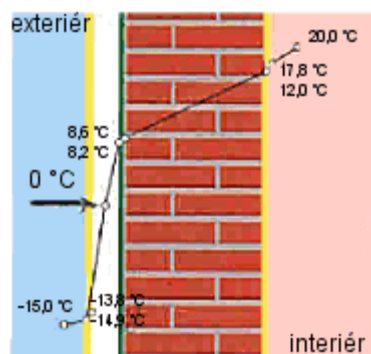
Obr. 3.1 Závislost prostupu tepla  $U$  na tloušťce izolace  $d$

U izolací s vysokým tepelným odporem roste vliv tepelných mostů, které zvyšují hodnotu součinitele prostupu tepla  $U$  o pevně stanovenou hodnotu. Proto v místech výskytů tepelných mostů zesilujeme tepelnou izolaci [7].

Existují dva základní přístupy k zateplení budov a to jsou zateplení z vnitřní nebo vnější strany.

#### 3.1 Zateplení z vnější strany konstrukce

Zateplení z vnější strany konstrukce se využívá ve většině případů. Tento způsob zateplení má, tu výhodu, že ochraňuje konstrukci před teplotními vlivy okolí, zabraňuje kondenzaci vodních par na vnitřní straně konstrukce. Další výhodou je, že proces instalace nenarušuje provoz v budově [7][8].

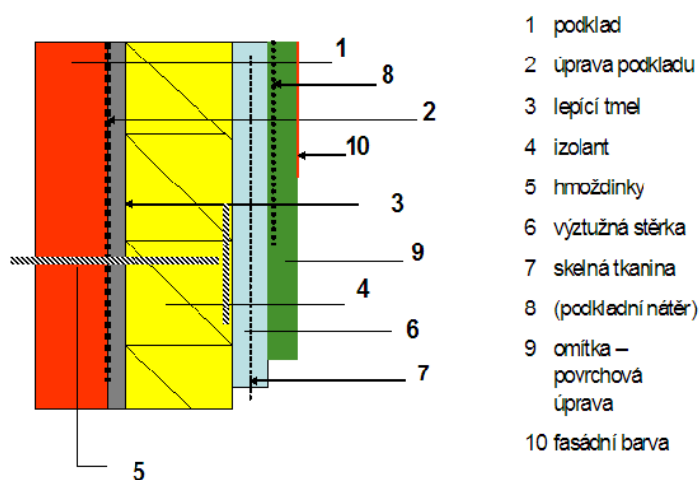


Obr. 3.2 Průběh teplot pro zateplení vnější strany konstrukce [7]

### 3.1.1 Zateplování obvodového pláště

Obvodový plášť je možné zateplit pomocí kontaktního zateplovacího systému, aplikací tepelní izolační omítky nebo odvětraným zateplovacím systémem [7].

Kontaktní zateplovací systém (ETICS) se skládá ze spojovací vrstvy, tepelné izolační vrstvy, výstužné vrstvy, povrchové vrstvy. Tyto vrstvy vznikají uplatňováním mokrých procesů. Mezi největší výhody tohoto systému patří odstranění tepelných mostů, možnost aplikace na většinu stavebních povrchů [6].



Obr. 3.3 Kontaktní zateplovací systém [6]

Tepelné izolační omítky jsou moderní stavební hmoty. Využívají se především jako dodatečná tepelná izolace. Snižují vliv tepelných mostů v místech osazení okenního rámu [4].

Odvětrávané zateplovací systémy se vyznačují uplatněním suchých montážních procesů. Skládají se z nosné konstrukce, obkladových desek a tepelné izolace. Výhodou tohoto zateplení je nízká cena. Odvětrávané zateplovací systémy se nehodí pro členité fasády [6][8].



### 3.1.2 Zateplení otvorových výplní

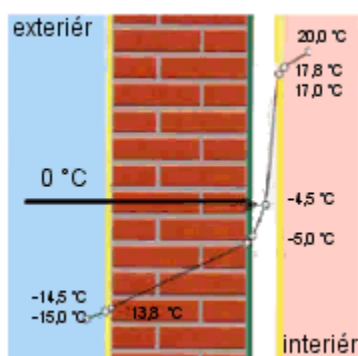
Nejproblematictější konstrukcí objektu z hlediska úniku tepla jsou okna. Při výběru je potřeba zaměřit se na následující parametry:

- Prostup tepla celým oknem  $U_w$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] který udává, kolik energie uniká oknem velikosti  $1 \text{ m}^2$  a při teplotním rozdílu  $1 \text{ K}$  ( $U_w < 1,2[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ).
- Prostup tepla rámy okna  $U_f$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] který udává, kolik energie uniká rámy oken ( $U_f < 1 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ).
- Propustnost světla/sluneční energie zasklením  $g$ . Je to koeficient celkové energie slunečního záření udávaný v %.
- Parametry odolnosti proti zatékání vyjadřuje schopnost okna odolávat současně působení větru a dešti. Většinou je označována kódy 7A, 9A [7].

### 3.2 Zateplení z vnitřní strany konstrukce

Zateplení vnitřní strany konstrukce se využívá u konstrukcí, kde nelze použít zateplení vnější strany konstrukce třeba u historických budov, kde je zakázáno měnit vzhled budovy. Vzhledem k tomu, že izolace je na vnitřní straně konstrukce, proniká konstrukcí chlad a tím se posunuje rosný bod k vnitřní straně. Tím se může dostávat vlhkost do konstrukce a ta může být tímto poškozena. Tento problém řešíme instalací parozábran. Jako parozábrany se využívají folie nebo deskové zábrany, které zamezují pronikání vlhkosti. Další nevýhodou je vznik nových tepelných mostů (stropy, vnitřní stěny) [7].

Tento způsob zateplování má i své výhody. Můžeme zateplit pouze určité místnosti v budově. Pro instalaci není potřeba lešení a jde provádět po celý rok [8].



Obr. 3.4 Průběh teplot pro zateplení vnitřní strany konstrukce [7]

### 3.3 Izolační materiály

Jednou z nejdůležitějších vlastností tepelných izolací je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Další důležité parametry jsou difuzní faktor  $\mu$  (určuje, jak materiál propouští vodní páru), nasákavost a hořlavost [4][8].

#### 3.3.1 Minerální vlna

Jeden z nejpoužívanějších materiálů. Je tvořena z vláken a dutinek, ve kterých je uzavřen vzduch. Vyrábí se tavením čediče a strusky. Vniklá tavenina se odlévá do usazovací komory, kde vlivem velké rychlosti se natáhne a vznikne vlákno. Následně se vlákna s přísadami nechají vytvrdit. Upevňuje se pomocí lepení a hmoždinek [4].

#### 3.3.2 Pěnový polystyren

Pěnový polystyren má pěnovou strukturu, kde se nachází uzavřený vzduch. Velmi využívaný díky nízké ceně a dobrým vlastnostem. Nevýhodou je degradace ultrafialovým zářením, proto se v praxi nepoužívá bez krycích vrstev. Na konstrukci se upevňuje pomocí lepidel, hmoždinek nebo vkládáním do trámů [4].

#### 3.3.3 Skelná vata

Skelná vata se používá jako tepelně izolační materiál, který se vyrábí ze skleněných vláken. Mezi výhody patří chemická odolnost, ohebnost, zabraňuje množení hub a bakterií. Při instalaci, díky své ohebnosti dobře izoluje tepelné mosty a nepřístupná místa [4].

Skupina materiálů	Materiál	Hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/(m.K)]
Pěno plastické látky	Pěnové polystyreny	30	0,035
	Pěnové polyuretany	35	0,027
Vláknité materiály	Skelná vata	50	0,038
	Minerální vlna	75	0,037
Minerální materiály	Expandovaný perlit	75	0,060
	Strusková pemza	500	0,130
Materiály na bázi dřeva	Sláma a rákos	70	0,050
	Dřevovláknité desky	400	0,092

Tab. 3.1 Přehled materiálů

### 3.4 Reflexní folie

Reflexní folie patří mezi novější metody zateplování budov. Ve stavebnictví se především využívají u transparentních konstrukcí (pokovení skel, atd.). V poslední době výrobci nabízejí reflexní folie jako náhradu tepelné izolace (minerální vlna atd.) u neprůhledných konstrukcí [5].

#### 3.4.1 Složení reflexní folie

Reflexní folie se skládá z bublinové nebo pěnové vrstvy, která je pokovená tenkou vrstvou hliníku. Složením více vrstev vznikne vícevrstvá reflexní folie. Pro zlepšení zateplení se reflexní folie instalují na vzduchovou mezeru o šířce 2 – 3 cm. Do vzduchové mezery se instalují příčky, aby se zamezilo cirkulaci vzduchu a tím se snížila vodivost kondukcí a konvekcí [5].



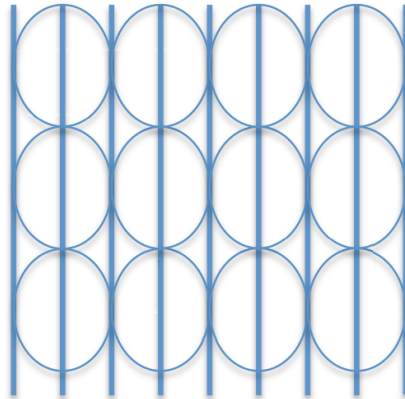
Obr. 3.5 Ilustrace příček ve vzduchové mezeře [5]

#### 3.4.2 Parametry folie Lupotherm

Folie Lupotherm se skládá z pěti reflexních vrstev z HDPE, které jsou vakuově pokoveny hliníkem a každá vrstva je oddělena bublinkovou folií. Schematicky je složení reflexní folie zobrazeno na Obr. 3.6. Přehled parametrů, které budu využívat v dalších výpočtech je v tabulce Tab. 3.2. Další parametry folie jsou měrná tepelná kapacita s hodnotou 1050 J/kg.K [5].

	Hodnota	Jednotky
Emisivita reflexních vrstev	0,1	-
Vodivost HDPE	0,45	W/(m.K)
Tloušťka reflexní folie	20	$\mu\text{m}$
Tloušťka bublinkových folií	15	$\mu\text{m}$
Tloušťka vzduchové bubliny	3708.5	$\mu\text{m}$

Tab. 3.2 Parametry folie



Obr. 3.6 Schématické složení folie [5]

### 3.4.3 Tepelné vlastnosti reflexních folií

Jednou z nejdůležitějších vlastností tepelných izolací je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Výrobci reflexních folií udávají hodnoty kolem 0,003 W/(m.K). Pokud porovnáme s dalšími materiály v Tab. 3.1 je tato hodnota je přibližně 10 krát menší. V další kapitole ověříme hodnotu tepelné vodivosti u reflexních folií [4][5].

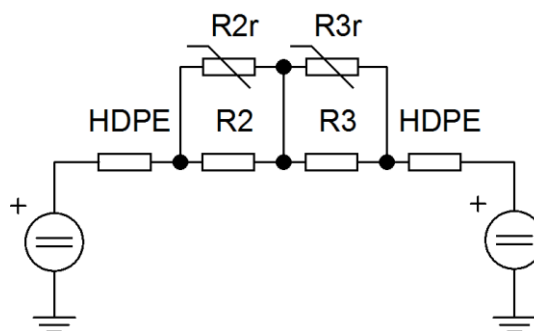
## 4 Výpočet vlastností reflexních folií

V této kapitole se budu zabývat výpočtem tepelných vlastností reflexních folií a jejich vlivu při použití jako tepelné izolace u budov. Výpočet nejdříve provedu metodou analogickou k řešení elektrických obvodů a výsledky ověřím pomocí metody konečných prvků v programu Comsol.

### 4.1 Řešení pomocí elektrického obvodu

Reflexní folii budu počítat pro reálné použití. Budu uvažovat zeď o tloušťce 20 cm z betonu s tepelnou vodivostí  $1,05 \text{ W/(m.K)}$ . Jako izolaci použiji reflexní folii Lupotherm (součástí instalace je vzduchová mezera o tloušťce 3 cm) a na povrchu bude nanesená omítka o síle 1,8 cm a tepelnou vodivostí  $0,88 \text{ W/(m.K)}$ . Teplota v interiéru bude  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a venkovní teplota bude  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

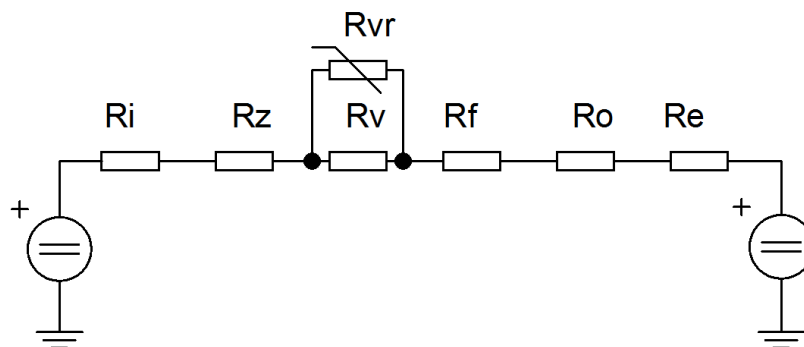
Z kapitol 3.4.2 a 3.4.3 jsem vytvořil náhradní schéma reflexní folie. Bublinové folie jsem zanedbal, jelikož jejich tepelný odpor je velmi malý. Velikosti odporu HDPE se vypočte jako normální část izolace. Odpor  $R_2$  a  $R_{2r}$  respektive  $R_3$  a  $R_{3r}$  nahrazují tepelný odpor vzduchové mezery. Paralelní kombinace těchto odporů je dána tím, že ve vzduchové mezeře se teplo přenáší i pomocí radiace.  $R_{2r}$  a  $R_{3r}$  jsou proměnné odpory z toho důvodu, že radiace je závislá na teplotě a proto se velikost odporů bude měnit. Výpočet teplot se bude muset opakovat, dokud se velikosti odporů neustálí na konstantní hodnotě. Velikosti odporů vzduchových mezer se určí podle kapitoly 2.1.2. Schéma na Obr. 4.1 je pouze pro jednu vrstvu. Při výpočtu budu počítat se čtyřmi vrstvami, které odpovídají provedení reflexní folie Lupotherm.



Obr. 4.1 Náhradní schéma reflexní folie

Náhradní schéma celé izolace je na Obr. 4.2.  $R_i$  a  $R_e$  respektují přenos tepla v interiéru a exteriéru.  $R_f$  nahrazuje schéma reflexní folie.  $R_z$  je tepelný odpor zdi a  $R_o$

je tepelný odpor omítky.  $R_v$  a  $R_{vr}$  opět nahrazují odpor vzduchové mezery. Celý výpočet je téměř stejný jako v příkladu v kapitole 2.1. Kvůli vzduchovým mezerám je výpočet nutno opakovat, protože teplo se zde šíří i radiací. Pro výpočet jsem použil program Matlab, ve kterém jsem vytvořil program s grafickým rozhraním, který je blíže popsán v kapitole 4.3.

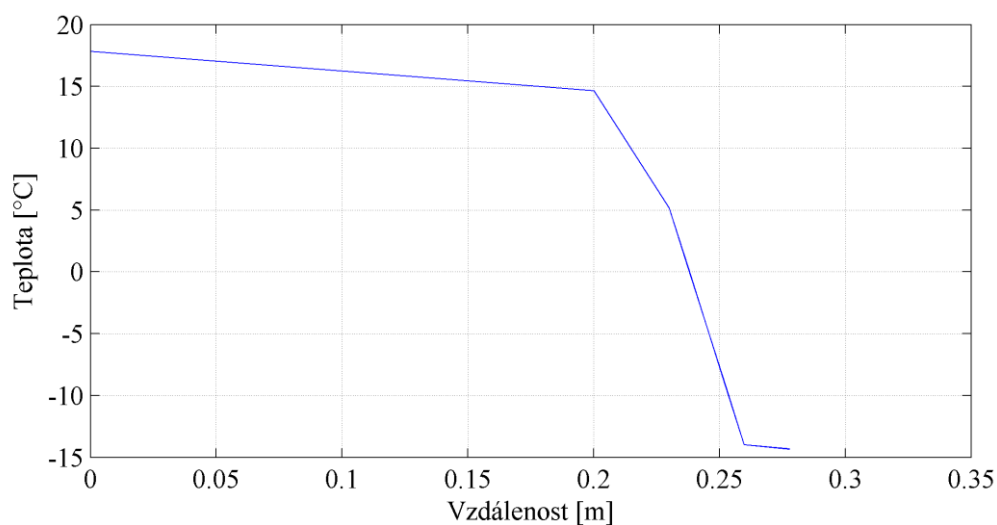


Obr. 4.2 Náhradní schéma celé izolace

Výsledné teploty jsou uvedeny v Tab. 4.1. Parametry celé izolace jsou součinitel prostupu tepla  $0,476 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  a celkový tepelný odpor  $2,099 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ . Samotná reflexní folie má výslednou tepelnou vodivost  $0,026 \text{ W}/(\text{mK})$ .

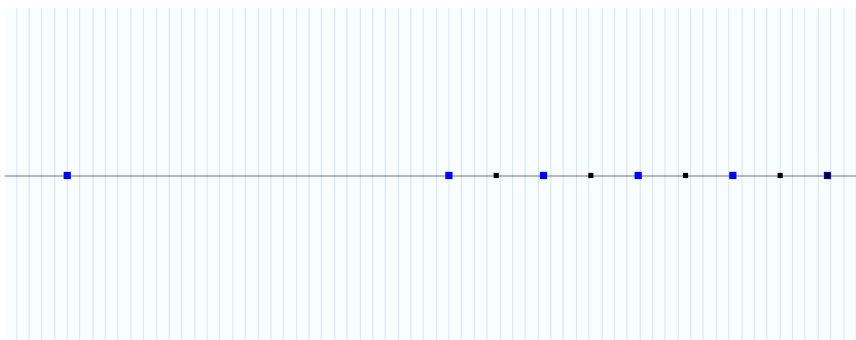
Pozice	Interiér	Vnitřní strana zdi	Zed'-VZDM	VZDM-Folie	Folie-Omítka	Vnější strana omítky	Exteriér
$\theta[^\circ\text{C}]$	20	17,832	14,655	5,146	-13,992	-14,333	-15

Tab. 4.1 Výsledné teploty izolace



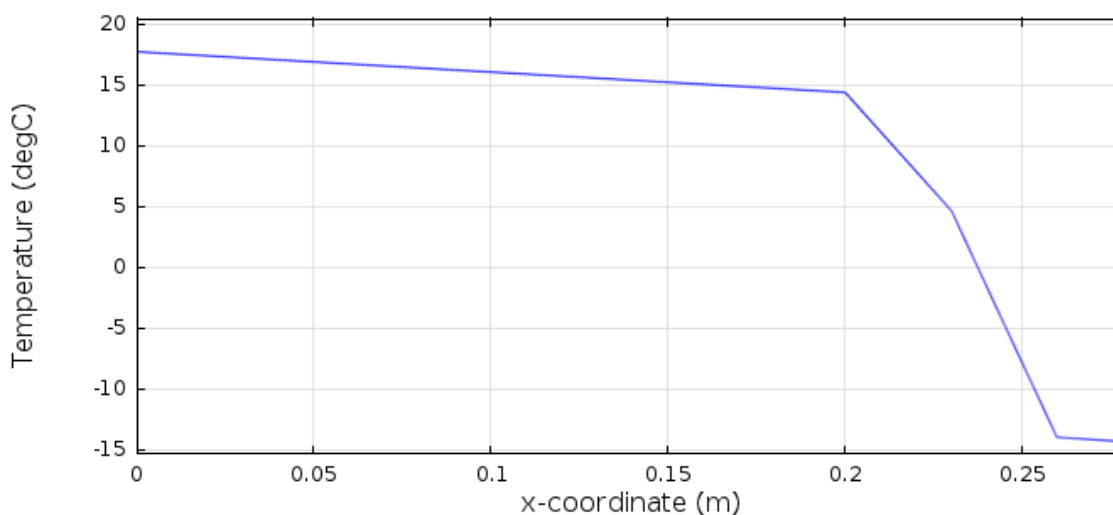
Obr. 4.3 Závislost teploty na vzdálenosti v konstrukci





Obr. 4.5 V bodech označených modře dochází k radiaci

V dalším kroku jsem nastavil neprůhlednost prostředí pomocí „Opaque“. Jako poslední nastavím teploty na krajích modelu.



Obr. 4.6 Závislost teploty na vzdálenosti v konstrukci

Jak vidíme z Tab. 4.2 teploty vypočtené pomocí COMSOLu se téměř neliší od hodnot vypočtených pomocí elektrického obvodu. Na Obr. 4.6 je zobrazen průběh teplot v konstrukci.

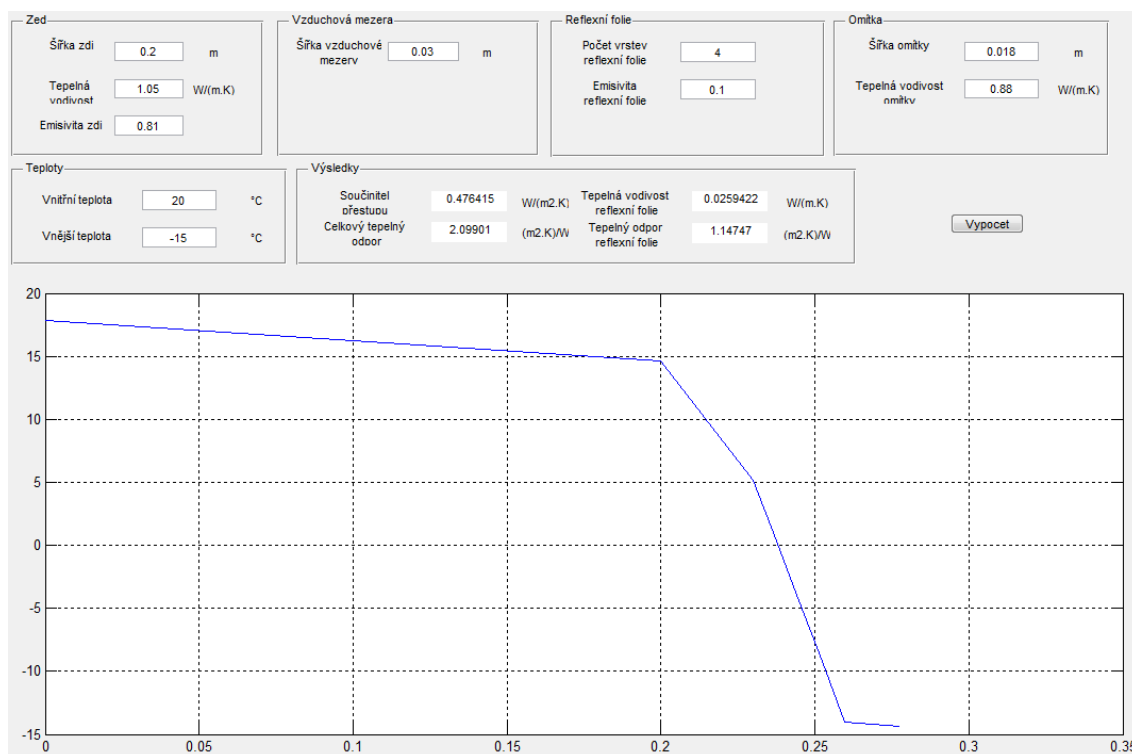
Pozice	Interiér	Vnitřní strana zdi	Zed'- VZDM	VZDM- Folie	Folie- Omítka	Vnější strana omítky	Exteriér
Comsol	20	17,716	14,369	4,628	-13,995	-14,335	-15
Matlab	20	17,832	14,655	5,146	-13,992	-14,333	-15
rozdíl	0	-0,116	-0,286	-0,518	-0,003	-0,002	0

Tab. 4.2 Výsledné teploty izolace



### 4.3 Program pro výpočty prostupu tepla

Pro vytvoření programu bylo zvoleno prostředí Matlab z důvodu jednoduchosti vytvoření GUI a optimalizaci rychlosti výpočtů. Program slouží k výpočtu teplotních vlastností zateplených konstrukcí s reflexními foliemi. Při tvorbě programu byl kladen důraz na možnost změny jednotlivých parametrů.



Obr. 4.7 Ukázka GUI

Program využívá strukturu GUI k načtení a zobrazení parametrů izolace. Při vytváření GUI, Matlab generuje kód k obsluze objektů. Část kódu, která se stará o výpočet najdeme jako Callback funkci tlačítka „výpočet“.

Nejdříve jsem načtl data z GUI. To jsem provedl pomocí příkazu „get“. Načtená data ze „String“ jsem převedl na číselný formát „double“ pomocí „str2double“.

```
Poc_teploata=273.15+str2double(get(handles.Ti, 'String'));
```

Následně jsem alokoval paměť pro matice, které využívám k výpočtům. Prealokace paměti má mnoho výhod jako zrychlení výpočtu a přehlednost kódu. Pro alokování paměti využívám příkaz „zeros“.

```
TEP_folie_m=zeros(xx_folie,1);
```

Jako další krok počítám hodnoty odporů u vrstev, ve kterých nedochází k přenosu tepla radiací. Poté vypočtu hodnoty odporů s radiací. U vzduchové mezery postačí jednoduchý vzorec. Při výpočtu hodnot pro reflexní folii jsem zvolil využití matic z důvodu proměnného počtu vrstev. Výpočet jednotlivých vrstev probíhá pomocí cyklu „for“.

```
for i=1:xx_folie
    TEP_folie_m(i)=(T(3+2*i)+T(4+2*i))/2;
    hr_folie=4*(5.67*10^(-8))*E_folie*(TEP_folie_m(i)^3);
    Rg(i)=(1/(ha+hr_folie))+(1/(ha+hr_folie));
end
```

Získané hodnoty odporů poskládám do matice dalším příkazem „for“ a provede se výpočet teplot.

```
R_p(2)=Ri;
R_p(3)=Ri+R_zed;
R_p(4)=Ri+R_zed+R_vzd;
TEMP=Ri+R_zed+R_vzd;

for i=5:(xx_folie*2)+5
    if mod(i,2) == 0
        R_p(i)=TEMP+Rg(j);
        j=j+1;
    else
        R_p(i)=TEMP+R_HDPE;
    end
    TEMP=R_p(i);
end

R_p((xx_folie*2)+6)=TEMP+R_omitka;
R_p((xx_folie*2)+7)=TEMP+R_omitka+Re;
%vypocet tepelneho toku
I=(poc_teplota-kon_teplota)/R_p((xx_folie*2)+7);
T=poc_teplota-(I*R_p);
```

Jelikož je radiace závislá na teplotě, mění se odpor vzduchových mezer. Celý výpočet se musí opakovat. Toho jsem dosáhl vložení veškerých výpočtů, které obsahují vliv radiace do cyklu „for“.

Výsledné hodnoty zobrazuji pomocí příkazu „set“.

```
set(handles.l_folie, 'String', lF);
```

## Závěr

Z hodnot, které jsem získal v kapitole 4.1 nás především zajímá součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , podle kterého se hodnotí kvalita izolačních materiálů. Ten by dle výrobců měl dosahovat hodnot kolem 0,003 W/(m.K). Z mého teoretického výpočtu jsem získal hodnotu 0,026 W/(m.K). Tato hodnota se ani zdaleka nepřibližuje k hodnotám udávanými výrobci. Přesto z hlediska součinitele tepelné vodivosti nemohu označit reflexní folie jako horší izolační materiál než jiné používané izolační materiály.

Pokud reflexní folie porovnáme z hlediska součinitele prostupu tepla  $U$ , zjistíme, že hodnota 0,476 W/(m<sup>2</sup>K) je větší než hodnota, kterou jsem vypočetl v kapitole 2.1 (0,280 W/(m<sup>2</sup>K)). Přesto, že jsem v kapitole 2.1 využil izolační materiál s vyšší tepelnou vodivostí vychází reflexní folie jako horší řešení. To je především z důvodu šířky izolace a zde naráží reflexní folie na největší problém. Standardní izolace můžeme využívat i při tloušťkách izolace 30 cm a více. Reflexní folie z důvodu mechanických vlastností nedoporučuji používat pro větší tloušťky tepelné izolace, protože se jedná o bublinkovou folii a izolace se může snadněji poškodit.

Nesmíme zapomenout na tepelné mosty, které zvyšují součinitel prostupu tepla. Ty vznikají v příčkách ve vzduchové mezeře, které jsou nainstalovány z důvodu potlačení cirkulace vzduchu.

Využití reflexních folii bych doporučil pouze u zateplení, kde není dostatek místa pro silnější vrstvu izolace nebo popřípadě jako doplňkovou izolaci s funkcí parozábrany.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Çengel, Y.: A. Heat and mass transfer: fundamentals. 4th ed. New York: McGraw-Hill, ©2011.
- [2] Rada, J.: Elektrotepelná technika. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985.
- [3] Chmúrny, I.: Tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003.
- [4] Murtinger, K.: Tepelné izolace. [online]. ©2010 [cit. 2013-3-7].  
Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/stavba/izolace-2/tepelne-izolace-polystyren-mineralni-vata-a-dalsi.aspx>
- [5] Navrátil, P.: Izolace Lupotherm. [online]. ©2011 [cit. 2013-1-24].  
Dostupné z: <http://www.lupotherm.eu/cs/vlastnosti-podrobne>
- [6] Straširybka, B.: Zateplovací systémy. [online]. ©2010 [cit. 2013-4-15].  
Dostupné z: <http://www.panelcentrum.cz/zobraz.php?sek=6&str=3>
- [7] Milan V., Petr B.: *Zateplování staveb*. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2000
- [8] Portál TZB-info [online]. ©2001 [cit. 2013-3-27].  
Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz>