



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

REFLEXNÍ TEPELNÉ IZOLACE PRO EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ V NÍZKOENERGETICKÝCH STAVBÁCH

REFLECTIVE INSULATIONS FOR EFFECTIVE USE IN LOW ENERGY BUILDINGS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Kalánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.

BRNO 2020

Abstrakt	<p>Disertační práce se zabývá tepelně izolačními vlastnostmi reflexních izolací za okrajových podmínek typické pro nízkoenergetické stavby.</p> <p>V úvodní části je pozornost zaměřena na proces šíření tepla, především přenosu tepla sáláním. Je zde také popsána reflexní izolace a způsoby, jak určit její tepelně izolační vlastnosti.</p> <p>Další část práce se zabývá rozбором výsledků experimentálního měření. Jednotlivé výsledky jsou porovnávány s výpočtovým modelem. Závěry pro technickou praxi včetně možností dalšího výzkumu jsou shrnuty v závěrečné části této práce.</p>
Klíčová slova	Reflexní izolace; Vzduchová dutina; Tepelný tok sáláním; Experimentální měření; Tepelný odpor; Měření in situ
Abstract	<p>The dissertation thesis is focused on thermal insulating properties of reflective insulation under boundary conditions typical for low-energy buildings.</p> <p>In the introductory part of this thesis the attention is focused on the heat transfer process, primarily heat transfer by radiation. There is also described the reflective insulation and the methods of determination their thermal insulating performance.</p> <p>The remaining part of the thesis deals with the analysis of the results obtained in experimental measurements. Measurement results are compared with the calculation model. Conclusions for technical practice including possibilities of further research are summarized in the final section.</p>
Key words	Reflective insulation; Air cavity; Experimental measurements; Radiation heat flow; Thermal resistance; In-situ measurement

Bibliografická citace:

Ing. Jiří Kalánek. *Reflexní tepelné izolace pro efektivní využití v nízkoenergetických stavbách*. Brno, 2020. 109 s., 18 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval školiteli doc. Ing. Milanu Ostrému, Ph.D. za vedení mé disertační práce a jeho ochotu a pomoc v rámci studia v doktorském studijním programu. Moc děkuji kamarádům a kolegům z fakulty za pomoc při měřeních a za cenné rady a připomínky.

V neposlední řadě velké díky patří za pochopení, trpělivost, psychickou a morální podporu celé mé rodině, především manželce Lucii a dětem Mariánce a Jáchymkovi.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci zpracoval samostatně na základě vlastního výzkumu a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

Jiří Kalánek (autor práce)

OBSAH

A. ÚVOD.....	8
B. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	10
1. ŠÍŘENÍ TEPLA.....	11
1.1. PŘENOS TEPLA VEDENÍM	12
1.2. PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM.....	12
1.3. PŘENOS TEPLA SÁLÁNÍM	13
2. EMISIVITA.....	18
3. REFLEXNÍ IZOLACE.....	20
4. USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, NORMATIVNÍ POSTUP EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ TEPELNÉHO ODPORU REFLEXNÍ IZOLACE (JÁDRA) A VZDUCHOVÉ VRSTVY.....	23
4.1. METODA TEPLÉ SKŘÍNĚ.....	24
4.2. METODA CHRÁNĚNÉ TEPLÉ DESKY	26
4.3. OSTATNÍ STACIONÁRNÍ METODY	27
5. NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, NORMATIVNÍ POSTUP EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ TEPELNÉHO ODPORU	28
5.1. METODA DYNAMICKÉ ANALÝZY	28
5.2. METODA PRŮMĚRNÝCH HODNOT	28
6. VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU VZDUCHOVÉ VRSTVY	29
C. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	32
1. SPECIFIKACE CÍLŮ PRÁCE	33
2. PROSTŘEDKY PRO DOSAŽENÍ CÍLŮ.....	33
3. DŮVODY VOLBY CÍLŮ.....	34
D. MATERIÁL A METODIKA.....	35
1. EXPERIMENTÁLNÍ METODY	36
1.1. USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, LABORATORNÍ MĚŘENÍ.....	36
1.1.1. Přípravné práce před jednotlivými měřeními	37
1.2. NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, MĚŘENÍ IN-SITU	39
1.2.1. Prostory mateřské školy v obci Dříteč.....	39
2. TEORETICKÉ METODY	45
2.1.1. Stanovení tepelného odporu vzduchové vrstvy výpočtem	45
E. VÝSLEDKY A DISKUZE	46
1. USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, LABORATORNÍ MĚŘENÍ	47

1.1.	TEPELNĚ IZOLAČNÍ VLASTNOSTI JÁDRA REFLEXNÍ IZOLACE A PŘILEHLÝCH VZDUCHOVÝCH VRSTEV	48
1.2.	ZÁVĚR K EXPERIMENTÁLNÍMU MĚŘENÍ ZA USTÁLENÉHO TEPLOTNÍHO STAVU	51
1.2.1.	Shrnutí	65
2.	NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, MĚŘENÍ IN-SITU	66
2.1.	KONSTRUKCE STĚNY	66
2.1.1.	Celá konstrukce stěny	67
2.1.2.	Vzduchová dutina konstrukce stěny	69
2.2.	KONSTRUKCE STŘECHY	72
2.2.1.	Celá konstrukce střechy	72
2.2.2.	Vzduchová dutina konstrukce střechy	75
2.3.	TEORETICKÉ STANOVENÍ TEPELNĚ IZOLAČNÍCH VLASTNOSTÍ MĚŘENÝCH KONSTRUKCÍ ZA NEUSTÁLENÉHO TEPLOTNÍHO STAVU	78
2.4.	ZÁVĚR K EXPERIMENTÁLNÍMU MĚŘENÍ ZA NEUSTÁLENÉHO TEPLOTNÍHO STAVU	80
2.4.1.	Porovnání experimentálně a teoreticky stanovených hodnot	80
2.4.2.	Shrnutí	83
F.	ZÁVĚRY PRO TECHNICKOU PRAXI	84
G.	MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU	88
H.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	90
I.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	96
J.	SEZNAM OBRÁZKŮ	99
K.	SEZNAM TABULEK	103
L.	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	106
M.	PŘÍLOHY	110
1.	USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, LABORATORNÍ MĚŘENÍ	111
2.	NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, MĚŘENÍ IN-SITU	121
2.1.	KONSTRUKCE STĚNY	121

A. ÚVOD

Stavebnictví má výrazný vliv na životní prostředí. Mezi záměry trvale udržitelné výstavby patří především splnění širokého spektra environmentálních požadavků. Aby k tomu došlo, je potřeba redukovat množství emisních ekvivalentů vzniklých jak v průběhu provozu budovy, tak důsledkem výstavby a její likvidace. Právě provoz budovy je v současné době velmi sledovaným tématem. Na území evropské unie nastoluje trend snižování energetické náročnosti budov směrnice evropského parlamentu a rady, tzv. EPBD. Původní směrnice 2002/91/ES [EPBD I, 2002] byla nahrazena 2010/31/EU [EPBD II, 2010], která definovala energetické cíle do konce roku 2020. Jednalo se o snížení celkové emise skleníkových plynů o 20 procent ve srovnání s hodnotami z roku 1990, snížení spotřeby energie Unie také o 20 procent a dosažení minimálně 20% podílu energie z obnovitelných zdrojů na celkové spotřebě energie. Po přezkumu provádění Směrnice 2010/31/EU vyšla v roce 2018 v pořadí již třetí, pozměňovací směrnice o energetické náročnosti budov pod označením 2018/844/EU [EPBD III, 2018], jejímž základním cílem je zrychlit nákladově efektivní renovaci stávajících budov a podpořit používání inteligentních technologií v budovách (novostavby se statusem budovy s téměř nulovou spotřebou energie). Jsou zde stanoveny závazky Evropské Unie pro další snižování emisí skleníkových plynů (alespoň o 40 % do roku 2030 ve srovnání s rokem 1990), zvýšení podílu spotřeby energie z obnovitelných zdrojů, dosažení úspor energie v souladu s ambicemi na úrovni Unie a zvýšení energetické bezpečnosti, konkurenceschopnosti a udržitelnosti v Evropě. Dle výše uvedených právních předpisů evropské unie je sektor budov největším spotřebitelem energie na území evropské unie, kdy spotřebovává zhruba 40 % energie [EPBD II, 2010]. Tento sektor se rozrůstá, což bude mít za následek zvýšení spotřeby energie. Jednou z cest, jak snížit energetickou náročnost objektu a tím splnit neustále se zpřísnující legislativní požadavky v této oblasti, jsou dobré tepelně-izolační vlastnosti ochlazované obálky. To lze jednoduše docílit navýšením tloušťky tepelného izolantu, který omezuje přenos tepla vedením. Toto jednoduché řešení přináší sebou i možné problémy, protože některé skladby mají svá technická omezení a je problematické tepelnou izolaci v jejich souvrstvích více navýšit. Současný vývoj v oblasti zateplování je veden snahou o zajištění co největšího tepelného odporu u co nejmenší tloušťky konstrukce. Jedna z možností se jeví vhodné konstrukční uspořádání reflexní izolace ve spojení se vzduchovou vrstvou. Je však otázkou, zdali tepelně technické vlastnosti tohoto souvrství jsou opravdu tak účinné, jak jsou deklarovány jednotlivými výrobci.

B. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Záměrem většiny tepelných izolací je omezení přenosu tepla vedením. Při tomto způsobu omezení přenosu tepla lze vidět výrazný pokrok jak v navrhování, tak v ověřování tepelně technických vlastností těchto produktů [Yücel *et al.*, 2003].

Princip reflexní izolace je založen na odrazivosti tepelného sálání. Proto se jako vnější reflexní vrstva používá materiál s vysokou odrazivostí tepelného sálání, tj. povrch s velmi nízkou hodnotou emisivity. Reflexní izolace je definovaná jako tepelná izolace, skládající se z jednoho nebo více povrchů s nízkou emitancí, jež ohraničuje jednu nebo více vzduchových dutin [RIMA International, 2002].

Použití reflexních izolací se v literatuře objevuje od začátku dvacátého století. Komplexní přehled citoval v roce 1989 Goss a Muller [Goss,1989] mnoho odkazů od roku 1900 do roku 1989 [Šťastník *et Vala*, 2014]. Publikace [Nash *et al.*, 1955] a [Fricker, 2011] uvádí typické hodnoty tepelného odporu vybraných skladeb a např. v publikacích [Robinson *et Powell*, 1954], [Robinson *et al.*, 1957] byly zveřejněny výsledky měření metodou teplé skříně pro sestavy s reflexní izolací. Tato data pak tvořila základ hodnot tepelných odporů obsažených v příručce ASHRAE Fundamentals [1972].

V současné době je vidět výrazný pokrok používání reflexních izolací ve střešních konstrukcích [Craven *et Garber-Slaght*, 2011].

1. ŠÍŘENÍ TEPLA

Teplo je forma energie, která je způsobena pohybem atomů. Teplo se šíří v daném prostředí tehdy, když v něm existuje rozdíl teploty. Přitom směr šíření tepla probíhá vždy od vyšší k nižší teplotě.

Teplo se může šířit následujícími způsoby:

- vedení (kondukcí);
- proudění (konvekci);
- sáláním (radiace, záření).

Obvykle se na přenosu tepla podílí kombinace těchto způsobů (obecně se nevyskytuje šíření jen jedním způsobem) [Halahyja, 1986].

Dále se pak rozlišuje, zdali je šíření tepla časově stálé či proměnlivé [Ebert *et Hemberger*, 2011].

- stacionární (ustálený teplotní stav): Zidealizovaný stav. Teplota se v jednotlivých místech konstrukce v čase nemění; [Tippner *et al.*, 2014], [Salmon, 2001], [Siau, 1984]
- nestacionární (neustálený teplotní stav) [Zhou *et al.*, 2013]

1.1. PŘENOS TEPLA VEDENÍM

Tento přenos tepla nastává tehdy, když se dotýkají dvě tělesa, která spolu sousedí, nebo když v tělese vzniká teplotní rozdíl (obsahuje částice o různých teplotách). Rychleji se pohybující částice předávají svoji kinetickou (pohybovou) energii pomaleji se pohybujícím. Podmínkou je existence látkové prostředí, ve vakuu tedy přenos tepla nenastane (vakuum neobsahuje hmotné částice). Vedení tepla probíhá ve všech skupenstvích.

Množství tepla (hustotu tepelného toku), které “projde“ jednotkovou plochou za časovou jednotkou udává Fourierův zákon:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (\text{R.1})$$

Kde

q je hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
 λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 $\text{grad } T$ teplotní gradient [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$]

Porovnat látky podle jejich tepelného vedení umožňuje součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Na součinitel tepelné vodivosti má vliv několik parametrů, především:

- pórovitost – obecně platí, že s větším množstvím pórů klesá i součinitel tepelné vodivosti;
- teplota – z pravidla součinitel tepelné vodivosti s teplotou roste;
- vlhkost – obecně platí, že s vlhkostí se zvyšuje i součinitel tepelné vodivosti

1.2. PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM

Šíření tepla prouděním je uskutečněno změnou polohy částic v prostoru. Proudění tepla nastává jen v kapalinách a plynech. Velmi často dochází ke kombinaci proudění a vedení (pohybující se částice na sebe narážejí a tím předávají svoji kinetickou energii).

Proudění může být způsobeno rozdílem hustot, následkem rozdílných teplot nebo nucenou konvekcí – mechanickými prostředky [Ficker, 2004], [Šimoník, 1977]

Množství tepla (hustotu tepelného toku) při proudění popisuje Newtonův zákon.

$$q_k = h_k \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \quad (\text{R. 2})$$

Kde

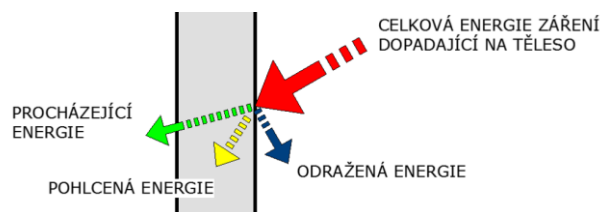
q_k	je hustota tepelného toku při proudění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
h_k	součinitel přestupu tepla při proudění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
θ_i	teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
θ_{si}	teplota povrchu konstrukce [$^{\circ}\text{C}$]

V závislosti, zdali během přenosu tepla prouděním dochází k mísení tekutiny mezi jednotlivými vrstvami, rozlišujeme proudění:

- laminární – nedochází k mísení tekutiny mezi jednotlivými vrstvami;
- turbulentní – dochází k mísení tekutiny mezi jednotlivými vrstvami vlivem vyšších smykových napětí působících mezi vrstvami.

1.3. PŘENOS TEPLA SÁLÁNÍM

Každé těleso, jehož teplota je větší než 0 K (-273.15°C), vyzařuje všemi směry elektromagnetické vlnění o různé vlnové délce, a navíc může toto záření odrážet, pohlcovat a propouštět.



Obr. 1 Schéma rozdělení sálavé energie dopadající na povrch tělesa [autor]

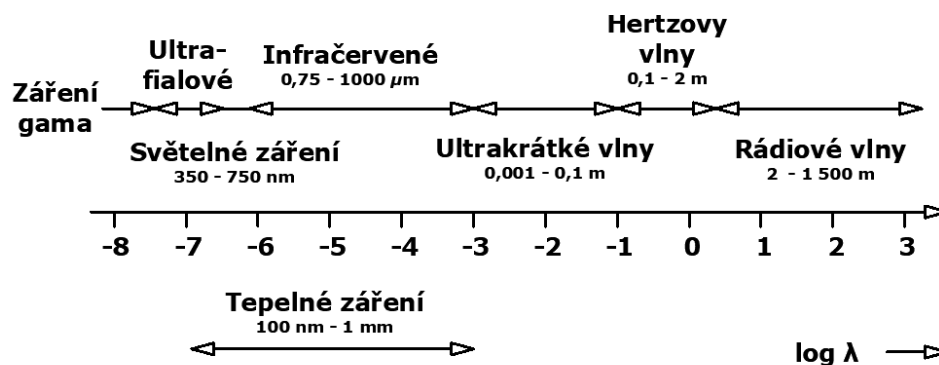
Elektromagnetické záření se šíří prostředím rychlostí, která je závislá na druhu prostředí. Tento přenos nevyžaduje látkové prostředí a je umožněn i ve vakuu. Rychlost šíření záření ve vakuu má hodnotu cca $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [Hloušek, 1992] V ostatních prostředích se šíří pomaleji dle následující rovnice:

$$c = c_0 / n \quad (\text{R. 3})$$

Kde

- c je rychlost šíření elektromagnetického záření v daném prostředí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 c_0 rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 n index lomu prostředí [-]

Elektromagnetické záření má vlnový charakter a na základě vlnové délky lze rozlišovat různé typy elektromagnetického záření:



Obr. 2 Spektrum elektromagnetického záření [autor podle Pavelek, 2007]

Elektromagnetickému záření lze na základě rychlosti a vlnové délce přiřadit i frekvenci dle následujícího vztahu:

$$f = c / \lambda \quad (\text{R. 4})$$

Kde

- f je frekvence elektromagnetického záření [Hz] nebo [s^{-1}]
 c rychlost šíření elektromagnetického záření v daném prostředí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 λ vlnová délka elektromagnetického záření [m]

Dopadne-li elektromagnetické záření na jiné těleso, tak může být částečně pohlceno, částečně odraženo a část prochází tělesem. Pohlcené záření způsobuje zvýšení vnitřní energie tělesa, odražené záření dopadá na jiná tělesa a procházející záření přechází na jiná tělesa. Celková energie záření dopadající na těleso má následující tvar:

$$Q = Q_A + Q_R + Q_T \quad (\text{R. 5})$$

Nebo v poměrném tvaru, kde dostaneme matematickou formulaci 1. Kirchhoffova zákona:

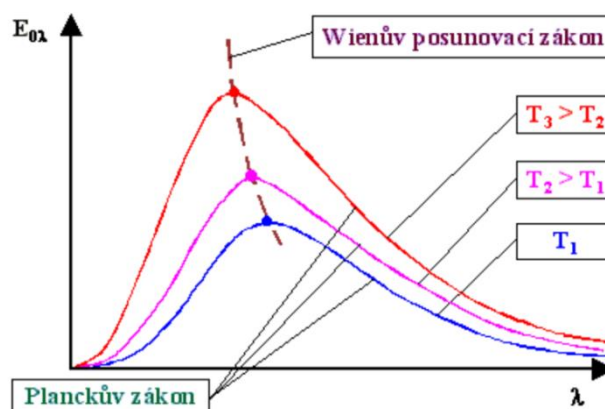
$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_T}{Q} = 1 = A + R + T \quad (\text{R. 6})$$

Kde

Q	je celková energie (množství tepla) dopadající na těleso [W]
Q_A	pohlcená energie tělesem [W]
Q_R	odražená energie [W]
Q_T	procházející energie [W]
A	pohltivost, tj. podíl pohlceného sálání a dopadajícího sálání [-]
R	odrazivost, tj. podíl odraženého sálání a dopadajícího sálání [-]
T	propustnost, tj. podíl propuštěného sálání a dopadajícího sálání [-]

Vztah emisivity a reflektance popsal Kirchhoff ve své práci z poloviny 19. století [Kirchhoff, 1860]. Slovní formulace 1. Kirchhoffova zákona je následující: Součet odrazivosti, pohltivosti a propustnosti daného objektu je vždy roven jedné.

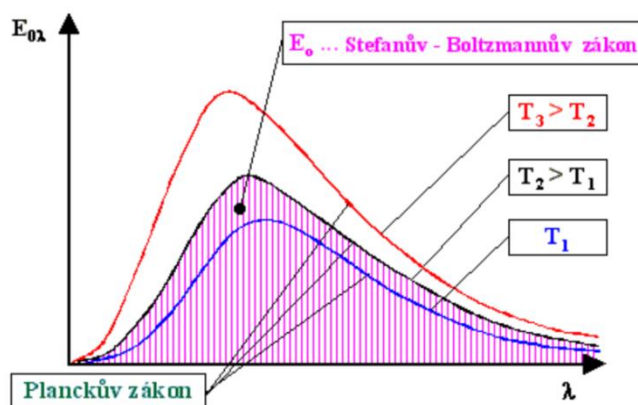
Dalším důležitým zákonem v oblasti sálání je Planckův vyzařovací zákon černého tělesa, který popisuje, jak velká energie přísluší záření o určité vlnové délce. Dle následujícího obrázku je zřejmé, že se zvětšující teplotou se zvětšuje spektrální hustota zářivého toku.



Obr. 3 Planckův zákon vyzařování černého tělesa a Wienův posunovací zákon v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření [Pavelek, 2007]

Problematiku spektrální hustoty zářivého toku v závislosti na vlnové délce popisuje Wienův posunovací zákon, který říká, že s rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám.

Stefan-Boltzmannův zákon říká, že každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu, září, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Získáme ji integrací spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa přes celý rozsah vlnových délek za konstantní teploty.



Obr. 4 Stefan–Boltzmannův zákon v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření [Pavelek, 2007]

Hustota zářivého toku dokonale černého tělesa je pak definována vztahem:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (\text{R. 7})$$

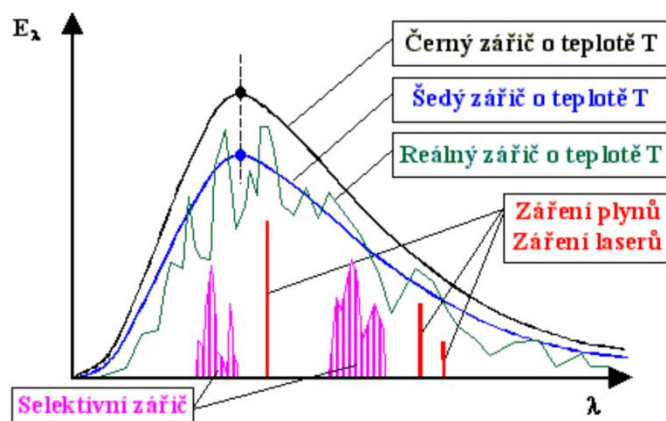
Pro nedokonalé zářiče, které se také označují jako šedé povrchy, lze pak hustotu zářivého toku vyjádřit vztahem:

$$E = \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (\text{R. 8})$$

Kde

- E_0 je intenzita vyzařování černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- E intenzita vyzařování reálného tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- σ_0 Stefan - Boltzmannova konstanta [$\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
- ε emisivita tělesa [-]
- T termodynamická teplota [K]

Záření ideálně šedých povrchů a absolutně černých povrchů se při stejné teplotě liší. Šedý zářič má při každé vlnové délce spektrální hustotu zářivého toku menší a maximum spektrální hustoty zářivého toku je u ideálně šedých a černých zářičů o stejné teplotě vždy při stejné vlnové délce. Reálné tepelné zářiče mají spektrální hustotu zářivého toku v závislosti na vlnové délce značně proměnnou, a to obvykle s několika lokálními extrémy. Zabýváme-li se jen energetickým působením záření, lze záření reálného tepelného zářiče nahradit přibližně průběhem spektrální hustoty zářivého toku šedého zářiče. Můžeme se však setkat i se selektivními zářiči, které září pouze v některých oblastech vlnových délek. Chceme-li využívat vizualizační metody také pro účely měření, je často třeba mít k dispozici zdroje záření, které vyzařují pouze při jedné vlnové délce. Takovými zářiči jsou např. plyny, které vyzařují jen na několika vlnových délkách a nežádoucí spektrální čáry se odstraňují interferenčními filtry nebo monochromátory [Pavelek, 2007].



Obr. 5 Závislosti spektrální hustoty zářivého toku různých zdrojů záření na vlnové délce záření [Pavelek, 2007]

Při průchodu elektromagnetického záření prostředím, může být hustota zářivého toku pohlcována v absorbuující vrstvě. Průběh hustoty zářivého toku E procházející absorbuující vrstvou ve směru z lze vyjádřit vztahem:

$$E = E_1 \cdot \exp(-\beta \cdot z) \quad (\text{R. 9})$$

Kde

- E je hustota zářivého toku ve vzdálenosti z [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- E_1 hustota zářivého toku před absorbuující vrstvou [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- β součinitel pohltivosti [m^{-1}]
- z vzdálenost [m]

Dalším faktorem ovlivňující přenos tepla zářením je odraz záření od povrchu tělesa. V případě, že těleso nepohlí veškerou dopadající energii záření (černé těleso), se rozlišují dva typy povrchů tělesa, jenž záření odráží:

- zrcadlový povrch: úhel dopadu záření je roven úhlu odrazu, paprsky se šíří ve stejném směru;
- difúzní povrch: dopadající záření se odráží rovnoměrně do všech směrů.

2. EMISIVITA

Důležitou veličinou popisující vyzařování tělesa je emisivita. Emisivita je definovaná jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Toto tvrzení popisuje 2. Kirchhoffův zákon, který říká, že objekt je tak dokonalým zářičem, jak dovede záření pohlcovat, a proto emisivita povrchu objektu je rovna pohltivosti. Emisivita tak může dosahovat hodnot od 0 do 1 a její hodnota je závislá především na struktuře materiálu povrchu, teplotě popř. vlnové délce a směru vyzařování. Hodnoty emisivity lze rozdělit [Pavelek, 2007]:

- spektrální emisivita-hodnota emisivity na určité vlnové délce záření;
- pásmová emisivita - efektivní hodnota v uvažovaném pásmu vlnových délek;
- totální emisivita - charakterizuje celkový vyzařovaný výkon přes všechny vlnové délky.

Způsoby určení emisivity

Metody měření emisivity je možné rozdělit na kalorimetrické a radiometrické nebo na přímé a nepřímé. Nepřímé metody jsou založené na měření jiné vlastnosti materiálu, pomocí které může být následně určena emisivita. Výběr vhodné metody závisí na několika faktorech, např. vlastnostech měřeného materiálu, požadovaném teplotním rozsahu, požadované měřené veličině či dostupnosti techniky, [Vacíková, 2013]. Vztahy emisivity k přenosu tepla zářením je uveden například v člancích [Hottel *et Sarofim*, 1967], [Sazima *et al.*, 1993], [Siegel *et Howell*, 2001] a [Hollands, 2004].

Tabulkové hodnoty

Nejjednodušším způsobem, jak určit emisivitu prvku, je využití tabulek. Výhoda spočívá v rychlosti stanovení. Jak již ale bylo výše zmíněno, emisivita není konstanta. Abychom získali co nejpřesnější hodnotu, museli bychom mít tabulku, která

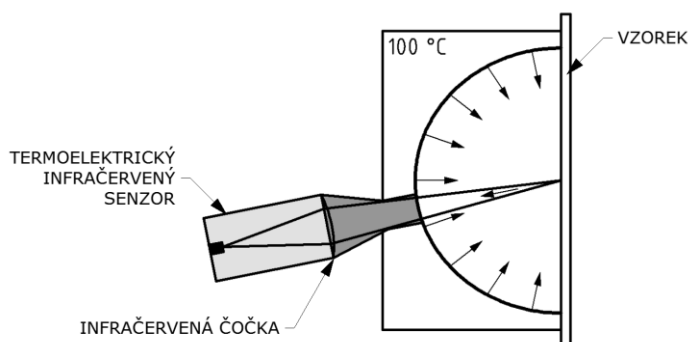
by obsahovala nejen daný materiál, ale i teplotu povrchu materiálu, úpravu povrchu, atd. [Sprat, 2012].

Tab. 1 Hodnoty emisivity vybraných reflexních materiálů [Fluke, 2012]

Vybraný reflexní materiál	ε [-]
Hliník, leštěný	0,05
Hliník, hrubý povrch	0,07
Hliník, silně zoxidovaný	0,25

Hemisférický absolutně černý zářič

Hemisférický zářič (polokulový) ve formě absolutně černého tělesa využívá princip tepelného infračerveného záření [ČSN EN 15976, 2011]. Teplota absolutně černého tělesa je nastavena a udržována na 100 °C. Polokulový tvar zářiče je nezbytný dosažení úplného a homogenního ozáření měřeného povrchu tak, aby mohla být správně měřena emisivita hrubých a členitých povrchů. Část energie odražené a vyzážené vzorkem projde malým otvorem v hemisférickém zářiči a je infračervenými čočkami soustředěna na infračervený senzor. Infračervený senzor mění dopadající tepelné záření na elektrické napětí v širokopásmové a lineární podobě (elektrické napětí je úměrné odražené tepelné energii). Tato metoda je ze všech uváděných způsobů stanovení emisivity nejpřesnější. [Otsuka *et al.*, 2005], [Hameury *et al.*, 2007]



Obr. 6 Závislosti spektrální hustoty zářivého toku různých zdrojů záření na vlnové délce záření [ČSN EN 15976, 2011]

Měření metodou infračervené termografie

Přístroje pro termografii nesnímají teplotu povrchu, nýbrž intenzitu vyzářování, která je přímo závislá na povrchové teplotě objektu. Intenzita vyzářování se pomocí fyzikálních zákonů přepočítává a uživateli se zobrazí výsledná teplota. Emisivitu

pomocí infračervené termografie lze stanovit dvěma hlavními způsoby [Lopez, 2007; Šťastník, 2014].

- Stanovení emisivity infračervenou termografií za pomoci prvku o známé emisivitě;
- stanovení emisivity infračervenou termografií za pomoci kontaktního teploměru (pomocí prvku o známé teplotě).

3. REFLEXNÍ IZOLACE

Reflexní izolace je definovaná jako tepelná izolace, skládající se z jednoho nebo více povrchů s nízkou emisivitou, jež ohraničuje jednu nebo více vzduchových dutin.



Obr. 7 Schéma složení reflexní izolace [autor, dle ČSN EN 16012]

Pro zachování co možno největšího poměru sálání vůči ostatním složkám přenosu tepla (vedení a proudění) je důležité, aby materiál jádra reflexní izolace byl v největší možné míře tvořen vzduchem. Materiál tvořící jádro reflexní izolace lze zjednodušeně rozdělit na:

- pěnový polyetylén (nejčastěji výrobek typu 1);
- bublinová folie - vzduchem vyplněné plastové bubliny (především výrobek typu 2);
- pěna nebo vata (nejčastěji sendvič - výrobek typu 3).

Reflexní / nízkoemisivní povrch může být proveden především dvěma základními způsoby:

- Nízkoemisivní nátěry, nástřiky, metalizace (např. vakuované pokovování);
- Nízkoemisivní folie.

Rozlišujeme 4 základní typy reflexních izolací podle ČSN EN 16012. Níže uvedené typy výrobků je definovány výhradně pro účely výběru nejvhodnější zkušební metody pro stanovení deklarovaných tepelných vlastností.

Produkt typu 1

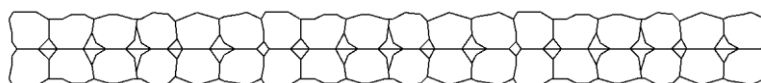
Tento typ výrobku má pravidelnou strukturu (rovnoběžné povrchy) nebo je do této geometrie stlačitelný beze změny tepelných vlastností. Zářezy povrchu by měli být menší než 2 mm. A tloušťka izolace je větší než 2 mm.



Obr. 8 Typický příklad reflexní izolace typu 1, jádro z pěnového polyetylénu [autor]

Produkt typu 2

Tento typ výrobku má pravidelnou strukturu (rovnoběžné povrchy) nebo je do této geometrie stlačitelný beze změny tepelných vlastností. Zářezy povrchu by měly být menší než 5 mm.



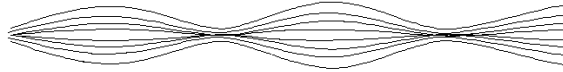
Obr. 9 Reflexní izolace typu 2 [autor dle ČSN EN 16012, 2012]



Obr. 10 Typický příklad reflexní izolace typu 1, bublinková folie [autor]

Produkt typu 3

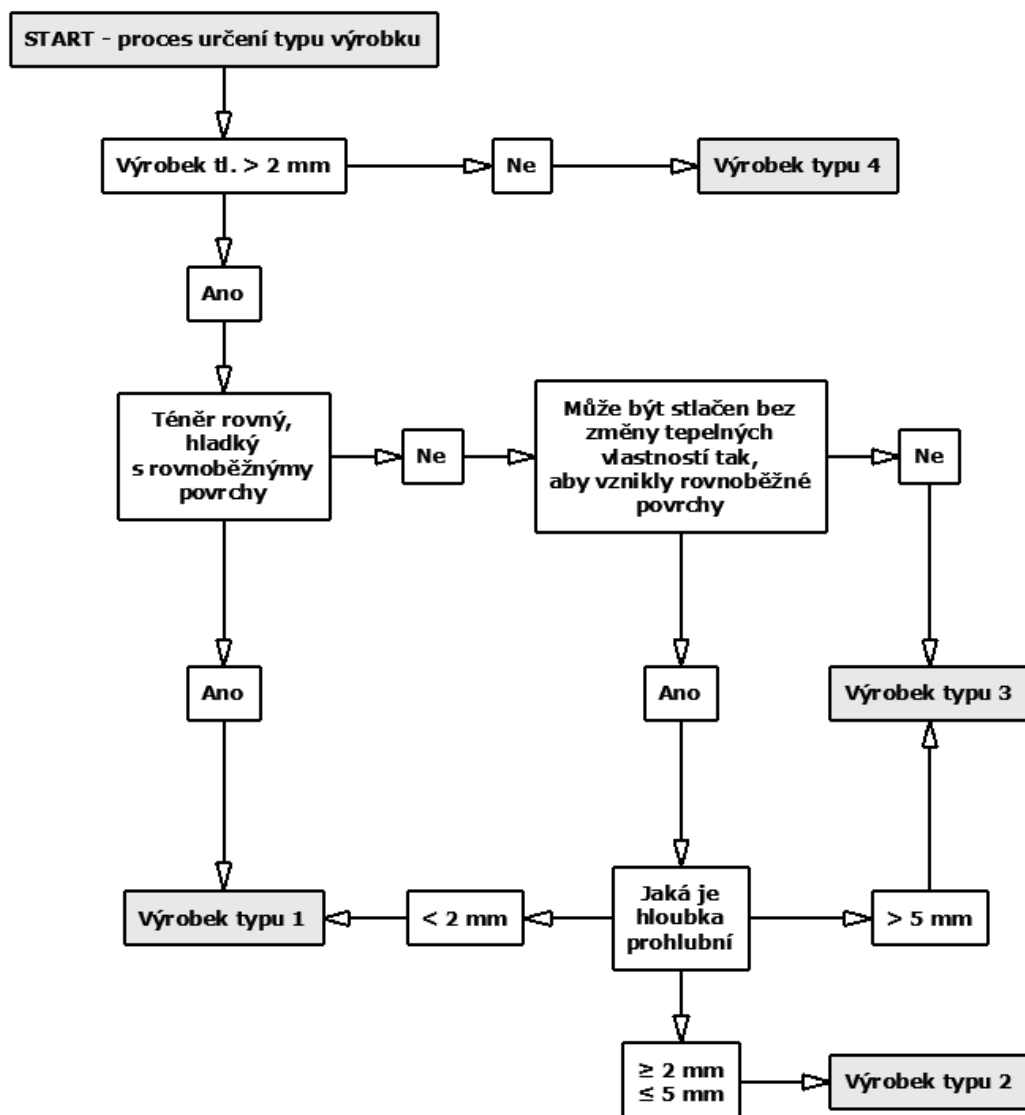
Tento typ výrobku nemá pravidelnou strukturu (rovnoběžné povrchy) nebo je do této geometrie stlačitelný se změnou tepelných vlastností. Zářezy povrchu jsou větší než 5 mm.



Obr. 11 Reflexní izolace typu 3 [ČSN EN 16012, 2012]

Produkt typu 4

Jedná se o tenký povlak (list), který je tenčí než 2 mm. Sám o sobě nemá žádný významný tepelný odpor.



Obr. 12 Vývojový diagram pro rozhodování při určení typů výrobků [autor dle ČSN EN 16012, 2012]

4. USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, NORMATIVNÍ POSTUP EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ TEPELNÉHO ODPORU REFLEXNÍ IZOLACE (JÁDRA) A VZDUCHOVÉ VRSTVY

Dle [ČSN EN 16 012, 2012] rozlišujeme 3 základní typy laboratorních metod pro stanovení tepelného odporu reflexních izolací.

- Metoda A: Zařízení s chráněnou teplou deskou splňuje požadavky ISO 8302, EN 1946-2, EN 12664 a EN 12667;
- Metoda B: Zařízení s měřidlem tepelného toku splňuje požadavky ISO 8301, EN 1946-3, EN 12664 a EN 12667;
- Metoda C: Zařízení s teplou skříní splňuje požadavky EN ISO 8990 a EN 1946-4

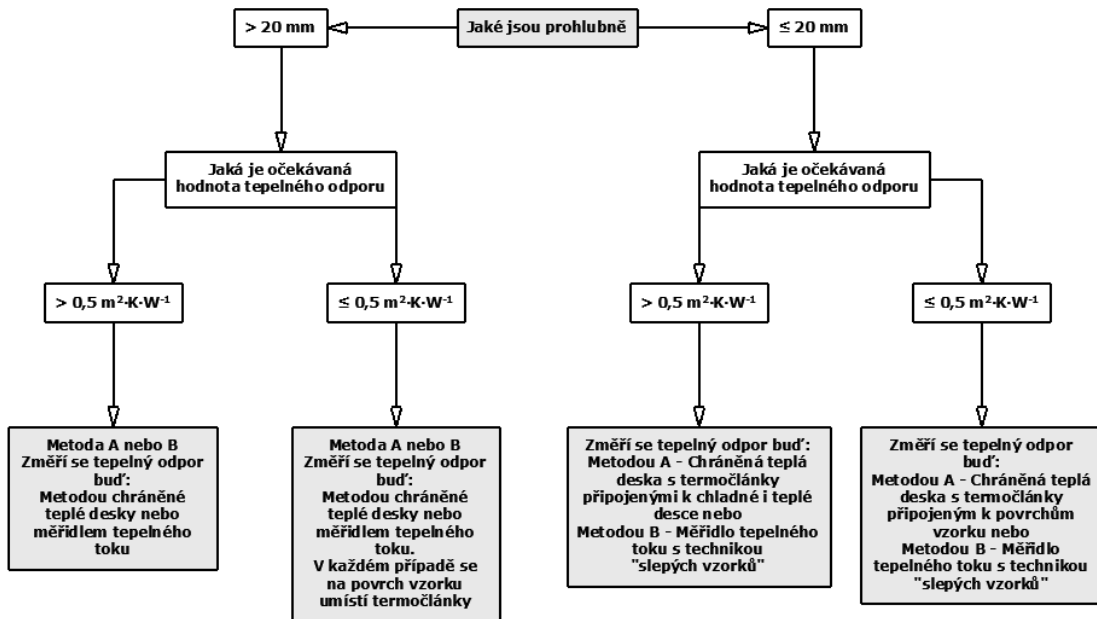
Volba metody pro stanovení tepelných vlastností reflexních izolací v laboratorních podmínkách závisí na typu reflexní izolace. Pro určení typu reflexní izolace je důležitá tloušťka celého souvrství izolace, hloubka zářezů, a zdali má pravidelnou strukturu nebo je-li do této geometrie stlačitelný beze změny reflexní izolace.

Vhodnost jednotlivých metod pro stanovení tepelných vlastností

Metoda A – Zařízení s chráněnou teplou deskou a metoda B – Zařízení s měřidlem tepelného toku jsou vhodné pouze pro výrobky typu 1 a 2. V některých případech musí být tyto metody drobně upraveny.

Metoda C – Zařízení s teplou skříní je vhodná na všechny typy výrobků.

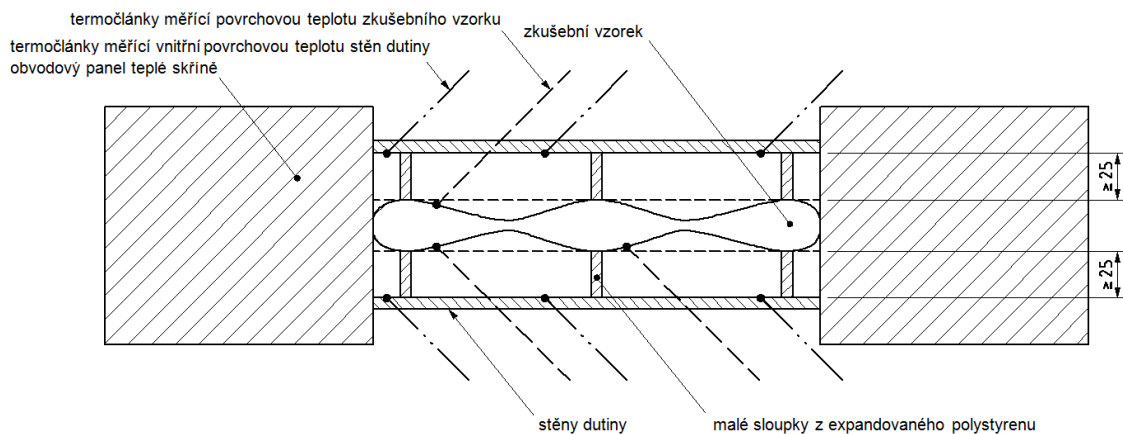
Vhodnost popř. doplnění metody A a B ovlivňuje typ výrobku, jeho tloušťka a předpokládaný tepelný odpor.



Obr. 13 Výběr zkušebních metod pro výrobek typu 1 při použití metody teplé desky [autor, dle ČSN EN 16012, 2012]

4.1. METODA TEPLÉ SKŘÍNĚ

Tato metoda, zařízení s teplou skříní, je vhodná na všechny typy reflexních izolací. Z důvodu měření metodou teplé skříně musí být vytvořen typický zkušební prvek určený pro měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny.



Obr. 14 Typický zkušební prvek použitý k měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny [ČSN EN 16012, 2012]

Pro typický zkušební prvek použitý k měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny musí platit následující podmínky [ČSN EN 16012, 2012]:

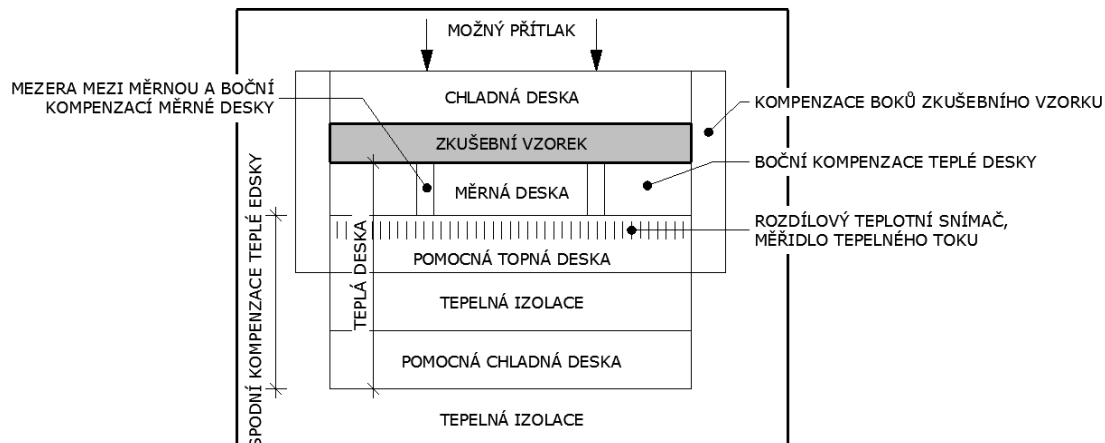
- vnější stěny, tvořící dutinu, musí být vytvořeny z vhodného suchého materiálu, jako je překližka, OSB nebo desky MDF;
- délka a šířka zkušební vzorku a přilehlé vzduchové dutiny nesmí být menší než $1\text{ m} \times 1\text{ m}$;
- vzduchové dutiny vytvořené na každé straně výrobku musí být v každém bodě hluboké nejméně 25 mm;
- musí být použit vhodný počet sloupků z expandovaného polystyrenu mezi překližkou a výrobkem, aby se zajistilo, že hloubka vzduchové dutiny bude během zkoušky udržena. Každý sloupek z EPS musí mít průřez $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ a součinitel tepelné vodivosti menší než $0,04\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- zkoušený výrobek musí být přilepen k obvodovému panelu za použití pásky s nízkou emisivitou podle doporučení výrobce;
- nesmí se vyskytnout vzájemně překryté spoje;
- nejméně 9 termočlánků musí být připevněno na vnitřní straně každé stěny dutiny tak, aby byly uprostřed čtverců o stejné ploše (Tepelný odpor těchto stěn není součástí měřených hodnot.);
- nejméně 5 termočlánků musí být připevněno ke každé straně výrobku (použije se lepicí páska s nízkou emisivitou). Jestliže má výrobek kovový povrch, musí být termočlánky připevněny na horní straně vrstvy tenkou lepicí páskou, aby se zabránilo jejich elektricky vodivému spojení.
- obvodový panel musí mít tloušťku mezi 100 mm a 300 mm a musí být vyroben z materiálu se součinitelem tepelné vodivosti $< 0,04\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Výpočet tepelného odporu jádra výrobku

- tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny se určí z údajů z teplé skříně;
- vypočte se tepelný odpor každé vzduchové dutiny podle ČSN EN ISO 6946;
- výsledný tepelný odpor jádra výrobku je dán rozdílem měřeného tepelného odporu celé dutiny a vypočtených tepelných odporů vzduchových dutin.

4.2. METODA CHRÁNĚNÉ TEPLÉ DESKY

Podstatou této metody je vytvoření stacionárního (ustáleného) teplotního stavu ve zkušební vzorku a výpočtem stanovit součinitel tepelné vodivosti. Zkušební zařízení se rozděluje na jednovzorkové a dvojevzorkové podle počtu měřených zkušebních vzorků.



Obr. 15 Schéma jedno-vzorkového zkušebního zařízení chráněné teplé desky
[Autor, dle ČSN EN 72 7012-2, 1994]

Postup pro stanovení součinitele tepelné vodivosti měřeného vzorku dle [ČSN 72 7012-2, 1994] je následující:

- nastaví se hodnoty regulovaných veličin tak, aby odpovídaly požadovaným okrajovým podmínkám měření, střední teplotě měření a rozdílu povrchových teplot zkušebního vzorku;
- měření sledovaných veličin v průběhu měřicího intervalu pro výpočet součinitele tepelné vodivosti (smí být započato, až dosažení ustáleného teplotního stavu).

Dle [ČSN 72 7012-1, 1994] ustálený teplotní stav nastává, když jednotlivé hodnoty součinitele tepelné vodivosti stanovené pro měřicí intervaly se od sebe vzájemně neliší o více než 2 % a hodnoty přitom nevykazují monotónně vzestupnou či sestupnou tendenci. Současně se nesmí jednotlivé povrchové teploty ve vztažných plochách zkušebního vzorku lišit o více než 0,15 K od průměrné teploty vztažné plochy.

Měřicí interval dle [ČSN 72 7012-1, 1994] nesmí být kratší než:

- 1,5 hodiny v případě etalonážního měření, kdy v průběhu měřicího intervalu musí být provedeno nejméně 12 odečtů;
- 1 hodina v případě průkazní, úřední, rozhodčí zkoušky součinitele tepelné vodivosti, kdy v průběhu měřicího intervalu musí být provedeno nejméně 6 odečtů;
- 0,5 hodiny pro ostatní druhy zkoušek, kde v průběhu měřicího intervalu musí být provedeno nejméně 6 odečtů.

Součinitel tepelné vodivosti zkušební vzorku se určí ze vztahu:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (\text{R. 10})$$

Kde

λ	je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Q	tepelný tok [W]
d	tloušťka vzorku [m]
A	plocha vzorku [m^2]
$T_1 - T_2$	termodynamický povrchový rozdíl vzorku [K]

4.3. OSTATNÍ STACIONÁRNÍ METODY

Dle ČSN EN 1946-1 mezi metody pro stanovení tepelných vlastností stavebních výrobků patří navíc (mimo výše popsané):

- metoda měřidla tepelného toku;
- měření metodou trubky.

V rámci této disertační práce nejsou tyto metody použity.

5. NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, NORMATIVNÍ POSTUP EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ TEPELNÉHO ODPORU

Dle ISO 9869 (1994) můžou být pro vyhodnocení neustáleného teplotního stavu použity dvě hlavní metody:

- metoda dynamické analýzy;
- metoda průměrných hodnot,

5.1. METODA DYNAMICKÉ ANALÝZY

Metoda dynamické analýzy je sofistikovaná metoda, která může být použita k dosažení ustáleného teplotního stavu, i když se vyskytují poměrně veliké rozdíly v teplotě a v hustotě tepelného toku.

Vzhledem ke kratším časovým krokům simulace a zohlednění naakumulovaného tepla v konstrukci je vyhodnocení metodou dynamické analýzy přesnější než metoda průměrných hodnot. Nevýhodou této analýzy je složitější výpočetní proces.

5.2. METODA PRŮMĚRNÝCH HODNOT

Tato metoda předpokládá, že tepelný odpor konstrukce může být získán na základě následujícího vztahu:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{si} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (\text{R. 11})$$

Kde

R	je tepelný odpor konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
U	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
q	hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
T_i	teplota prostředí interiéru [K]
T_{si}	vnitřní povrchová teplota [K]
T_e	teplota prostředí exteriéru [K]
T_{se}	vnější povrchová teplota [K]

Vypočtené hodnoty tepelného odporu se blíží skutečné hodnotě, jsou-li splněny především následující podmínky:

- snímač tepelného toku není vystavený přímému slunečnímu záření
- tepelně izolační vlastnosti konstrukce jsou během měření konstantní

Problematikou určování tepelných vlastností konstrukcí budov metodou měření hustoty tepelného toku se zabýval např. článek [Flimel, 2011];

6. VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU VZDUCHOVÉ VRSTVY

Pro stanovení tepelného odporu nevětrané vzduchové vrstvy lze využít náhradní elektrické schéma paralelního sčítání odporů, kdy dostaneme vztah:

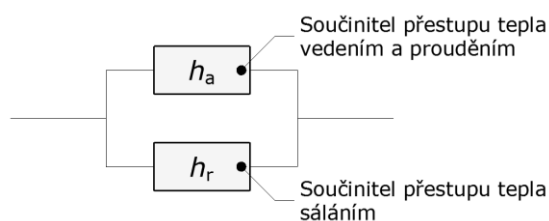
$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} \quad (\text{R. 12})$$

Kde

R_g je tepelný odpor vzduchové vrstvy [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]

h_a součinitel přestupu tepla vedením a prouděním [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

h_r součinitel přestupu tepla sáláním [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]



Obr. 16 Náhradní elektrické schéma tepelného odporu vzduchové vrstvy [autor]

Součinitel přestupu tepla sáláním h_r je definován jako obrácená hodnota odporu při přestupu tepla:

$$h_r = \frac{1}{R_s} \quad (\text{R. 13})$$

$$R_s = \frac{T_1 - T_2}{I} \quad (\text{R. 14})$$

Kde

R_s je tepelný odpor při přestupu tepla [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]

I intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

T_1 střední termodynamická teplota povrchu [K]

$T_{1,2}$ střední termodynamická teplota okolí [K]

Intenzitu vyzařování tělesa udává Stefan-Boltzmannův zákon, který říká, že každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu, září, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty:

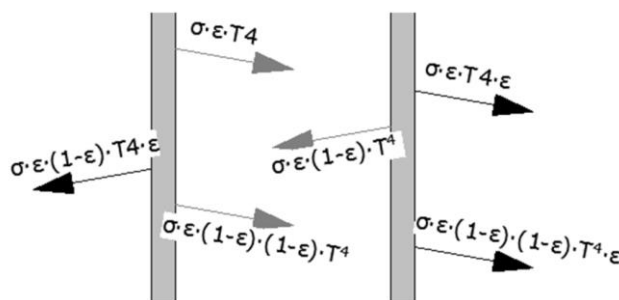
$$I_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{R. 15})$$

$$I = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (\text{R. 16})$$

Kde

- I_0 je intenzita vyzařování černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- I intenzita vyzařování šedého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- ε poloprostorová emisivita povrchů obklopující vzduchovou mezeru [-]
- σ Stefan-Boltzmannova konstanta = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]

Kirchhoffův zákon popisuje výměnu vyzářeného tepla mezi dvěma plochami.



Obr. 17 Schéma výměny vyzářeného tepla mezi dvěma plochami [autor]

První plocha vyzařuje směrem k druhé zářivý tok. Protilehlá vrstva pohltí část záření a zbytek se zpět odrazí na druhou plochu. Tam se opět část pohltí a zbytek se zase odrazí. Tato výměna postupuje do nekonečna. Matematickou úpravou nekonečné řady dostaneme vztah:

$$I = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{R. 17})$$

Kde

- I intenzita vyzařování šedého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- ε poloprostorová emisivita povrchů obklopující vzduchovou mezeru [-]
- σ Stefan-Boltzmannova konstanta = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
- T_1 teplota teplejšího povrchu [K]
- T_2 teplota chladnějšího povrchu [K]

Norma [ČSN EN ISO 6946, 2008] na základě výše uvedených zákonů uvádí upravený vztah pro získání hodnoty součinitele prostupu tepla sáláním h_r :

$$h_r = E \cdot h_{r0} \quad (\text{R. 18})$$

$$h_{r0} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (\text{R. 19})$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{R. 20})$$

Kde

h_{r0}	je součinitel přestupu tepla sálání černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
T_m	střední termodynamická teplota povrchu a jeho okolí [K]
ε	poloprostorová emisivita povrchů obklopující vzduchovou mezeru [-]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
E	součinitel vzájemného sálání

Součinitel přestupu tepla vedením a prouděním h_a je určen vedením v klidném vzduchu v úzkých vzduchových mezerách a prouděním v širokých dutinách. Jeho hodnotu lze určit dle ČSN EN ISO 6946 na základě směru tepelného toku, tloušťce vzduchové mezery a teplotního rozdílu, který je napříč vzduchovou vrstvou.

Pro vodorovný tepelný tok je součinitel h_a [ČSN EN ISO 6946, 2008] větší z hodnot $0,025/d$ a hodnoty která závisí na velikosti teplotního rozdílu napříč vzduchovou vrstvou, pro:

- $\Delta T \leq 5 \text{ K} \rightarrow 1,25 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$;
- $\Delta T \geq 5 \text{ K} \rightarrow 0,73 \cdot (\Delta T)^{1/3} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

C. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

1. SPECIFIKACE CÍLŮ PRÁCE

Disertační práce má vytvořit ucelený pohled na problematiku efektivního využití reflexních izolací v konstrukcích nízkoenergetických staveb. To je jedním ze způsobů jak splnit postupně se zpřísňující požadavky na konstrukce ochlazované obálky budov.

Cíle disertační práce:

1. Stanovení tepelně izolačních vlastností vybraných reflexních izolací;
2. stanovení tepelně izolačních vlastností vzduchových dutin v kontaktu s reflexním povrchem;
3. porovnání experimentálního měření s teoreticky stanovenými hodnotami.

K úspěšnému vyřešení hlavních cílů disertační práce bylo třeba vyřešit dílčí úkoly a to:

- rešerši dostupných pramenů zabývajících se problematikou reflexních izolací a jejich aplikací ve stavebnictví;
- nalezení reálné budovy, kde bude umožněno experimentální měření konstrukcí obsahující reflexní izolaci;
- zajištění vzorků reflexních izolací pro účely laboratorního měření;
- vytvoření vhodné měřicí konstrukce sloužící pro laboratorní měření;
- provedení vlastního měření v laboratoři, sběr dat a jejich vyhodnocení;
- provedení vlastního měření v reálných podmínkách, na reálné stavbě, sběr dat a jejich vyhodnocení;
- výpočet a porovnání sloužící pro stanovení závěrů o chování reflexních izolací.

2. PROSTŘEDKY PRO DOSAŽENÍ CÍLŮ

Hlavní část disertační práce je zaměřena na stanovení izolačních vlastností reflexních izolací, a to jak při ustáleném teplotní stavu (laboratorní měření), tak při neustáleném (měření in situ). Potřebné prostředky byly dostupné v rámci přístrojového vybavení Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, případně byly pořízeny v rámci specifického výzkumu.

Laboratorní měření probíhalo v prostředí suterénní laboratoře budovy D Ústavu pozemního stavitelství, kde byl v provozu chladicí box, jenž byl vybudován za podpory Vnitřního grantu VUT FAST a sponzorů v roce 2008. Dále pak na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců VUT FAST v Brně pomocí zkušebního zařízení chráněné teplé desky.



*Obr. 18 Pohled na chladicí box [archiv autora]
(nahrazení zařízení s kalibrovanou teplou skříní dle ČSN EN ISO 8990)*

Stanovení tepelných vlastností konstrukcí s reflexní izolací měřením v reálných podmínkách probíhalo v prostorách mateřské školy v obci Dřítěč v Pardubickém kraji.

3. DŮVODY VOLBY CÍLŮ

Současný vývoj v oblasti zateplování je veden snahou o zajištění co největšího tepelného odporu u co nejmenší tloušťky konstrukce. Jednou z možností, jak by se toho dalo docílit, je vhodné konstrukční uspořádání reflexní izolace ve spojení vzduchovou vrstvou. Tepelně technické vlastnosti reflexních izolací (včetně jejího vlivu na vzduchovou mezeru) jsou poměrně obtížně definovatelné. Navíc se při posuzování musí projektant spolehnout na údaje udávané výrobcem. Tyto informace však nejsou vždy zcela korektní, jelikož se na trhu objevují poměrně výrazné rozdíly deklarovaných hodnot mezi jednotlivými výrobci. Samotná práce se zaměřuje na stanovení tepelně izolačních vlastností jak samostatné reflexní izolace (jejího jádra), tak přilehlé vzduchové dutiny včetně následného porovnání s výpočtovým modelem.

D. MATERIÁL A METODIKA

Při zpracování disertační práce bylo k řešení dané problematiky využito několik metod. V první fázi se jednalo o teoretickou přípravu, především hledání vhodných technologií řešení, kdy byl vytvořen podrobný postup provádění experimentálního měření (jak v reálných podmínkách, tak v laboroři) včetně jejich vyhodnocení a porovnání dosažených výsledků s teoretickými výpočty.

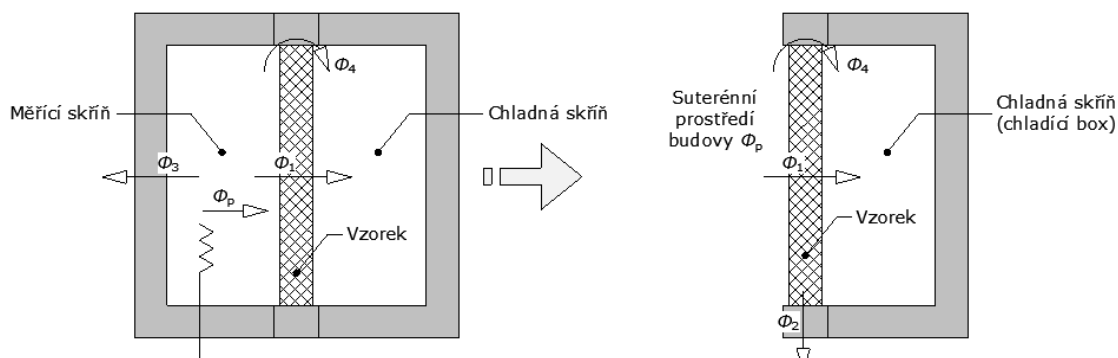
Hlavní část výzkumu byla směřována k experimentálnímu stanovení tepelných vlastností reálných konstrukcí na reálné stavbě. Požadavkem bylo, aby součástí měřené skladby byla reflexní izolace v kontaktu se vzduchovou vrstvou.

Poté následovalo zajištění vzorků různých typů reflexních izolací, včetně stejného materiálové složení jako v konstrukcích reálné stavby, aby bylo možné jednotlivá vyhodnocení lépe porovnat. Pro laboratorní měření bylo nutné dle typu reflexní izolace vytvořit typický zkušební prvek.

1. EXPERIMENTÁLNÍ METODY

1.1. USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, LABORATORNÍ MĚŘENÍ

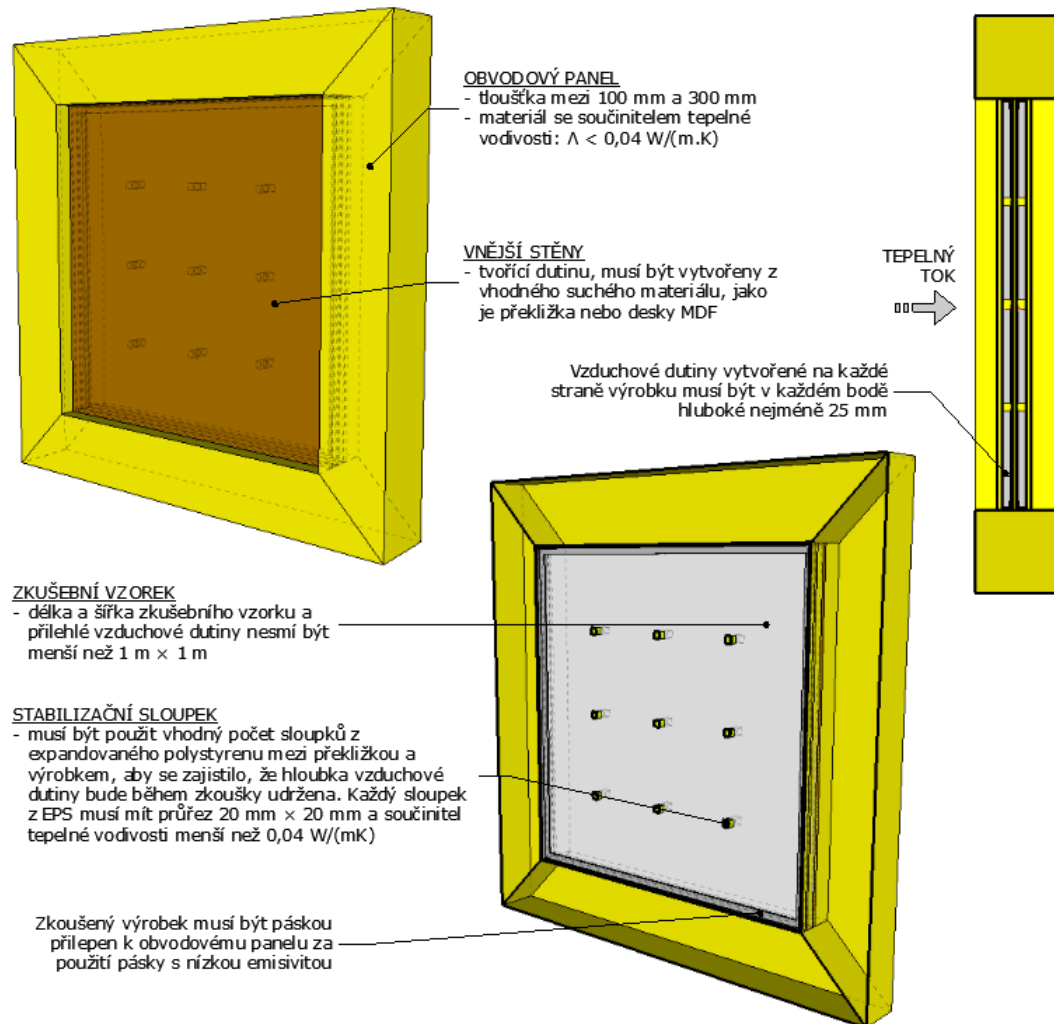
Vzhledem k faktu, že zařízení s chráněnou teplou deskou a zařízení s měřidlem tepelného toku jsou vhodné pouze pro výrobky typu 1 a 2 (výrobky, které mají pravidelnou strukturu - rovnoběžné povrchy nebo jsou do této geometrie stlačitelní beze změny tepelných vlastností), bylo pro laboratorní měření zajištěno zařízení s teplou skříní, které je vhodné na všechny typy reflexních izolací. Zkušební zařízení s kalibrovanou teplou skříní dle ČSN EN ISO 8990 (73 0557), jenž se skládá z měřicí skříně a z chladné skříně, bylo z technických důvodů nahrazeno chladícím boxem a měřicí skříně byla nahrazena laboratorním prostředím budovy, kde měření probíhalo. Výhodou těchto prostor jsou ustálené okrajové podmínky (což bylo ověřeno měřením).



Obr. 19 Schéma nahrazení zkušebního zařízení s kalibrovanou teplou skříní [autor]

1.1.1. Přípravné práce před jednotlivými měřeními

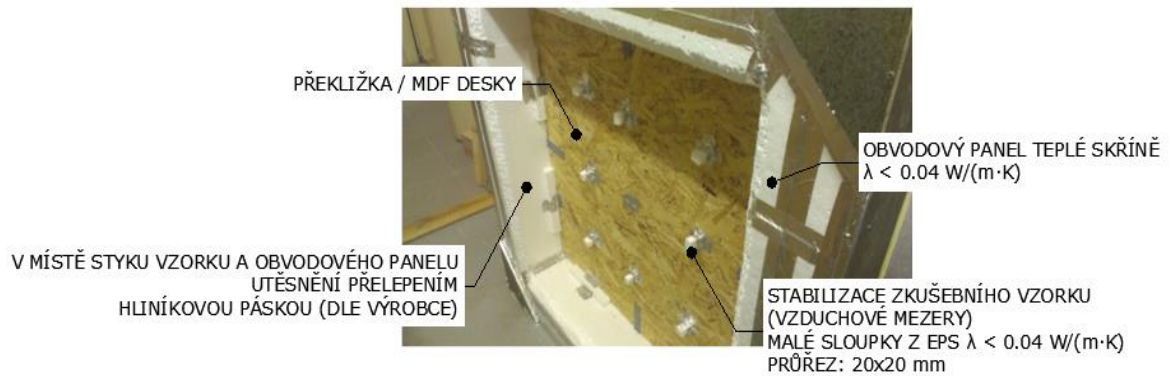
Při stanovení tepelného odporu reflexní izolace dle ČSN EN 16012 metodou teplé skříně musel být vyhotoven typický zkušební prvek dle následujícího schématu:



Obr. 20 Schéma typického zkušební prvku pro měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny metodou teplé skříně [autor dle ČSN EN 16012]



Obr. 21 Ukázka z realizace typického zkušební prvku pro měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny [autor]



Obr. 22 Vytvořený typický zkušební prvek použitý k měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny [autor]

Zkoušený prvek byl nainstalován svisle s horizontálním tepelným tokem mezi suterénním prostředím budovy a chladnou komorou zařízení. Konstrukce a její upořádání pro měření tepelného odporu výrobku včetně izolované vzduchové dutiny byla vytvořena v souladu s ČSN EN 16012 – podrobněji viz B. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY - Stanovení tepelného odporu výrobku metodou teplé skříně.

1.2. NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, MĚŘENÍ IN-SITU

1.2.1. Prostory mateřské školy v obci Dříteč

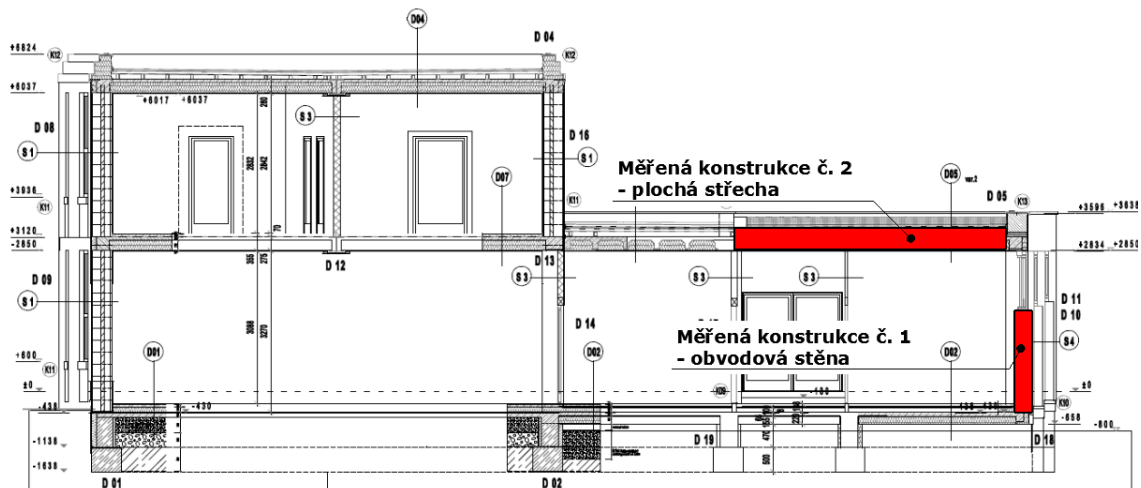
Budova mateřské školy, ve které měření probíhalo, se nachází v obci Dříteč [N: 50.104754, E: 15.808886] asi 8 km severně od krajského města Pardubice. Dle ČSN 730540-3:2005 (Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin) spadá tato lokalita do 1. teplotní oblasti s návrhovou teplotou venkovního vzduchu v zimním období $\theta_e = -13\text{ }^\circ\text{C}$.



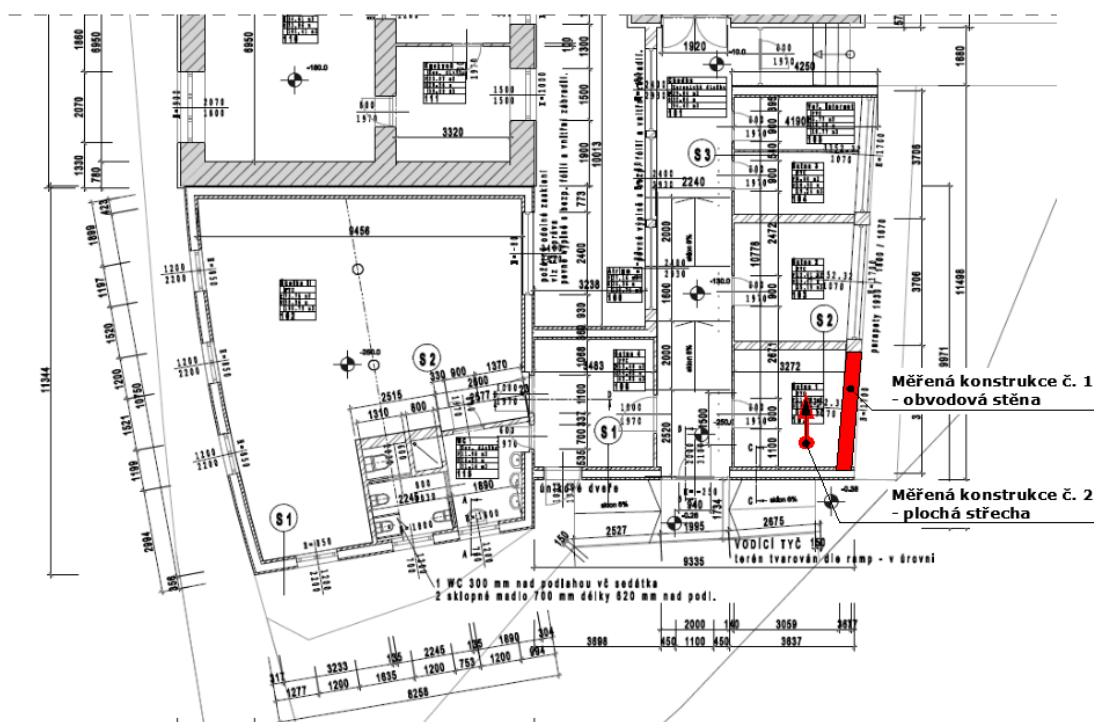
Obr. 23 Pohledy na budovu mateřské školy v obci Dříteč [autor]

V prostorách mateřské školy, byly měřeny následující konstrukce:

- konstrukce č. 1 - obvodová stěna
- konstrukce č. 2 – plochá střecha



Obr. 24 Schématický řez mateřské školy s vyznačením měřených konstrukcí [autor, dokumentace Zlatý dům daparts s.r.o.]



Obr. 25 Půdorysné schéma mateřské školy s vyznačením měřených konstrukcí [autor, dokumentace Zlatý dům daparts s.r.o.]

Konstrukce č. 1 - obvodová stěna

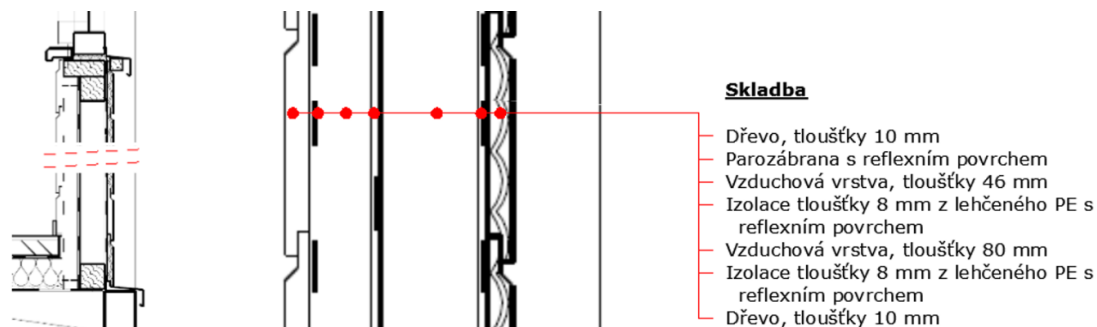


Obr. 26 Pohled na měřenou konstrukci

Skladba konstrukce

Tepelněizolační vrstvu hodnocené konstrukce tvoří reflexní izolace, v kombinaci se vzduchovou vrstvou, která je zajištěna dřevěnými sloupky. Jádru reflexního stavebního izolačního pásu je tvořeno lehčným PE, jenž je laminovaný hliníkovou folií. Opláštění konstrukce je provedeno dřevěnými palubkami. Jednotlivé vzduchové

vrstvy jsou z obou stran obklopeny reflexním povrchem (parozábrany a stavebních izolačních pásů).

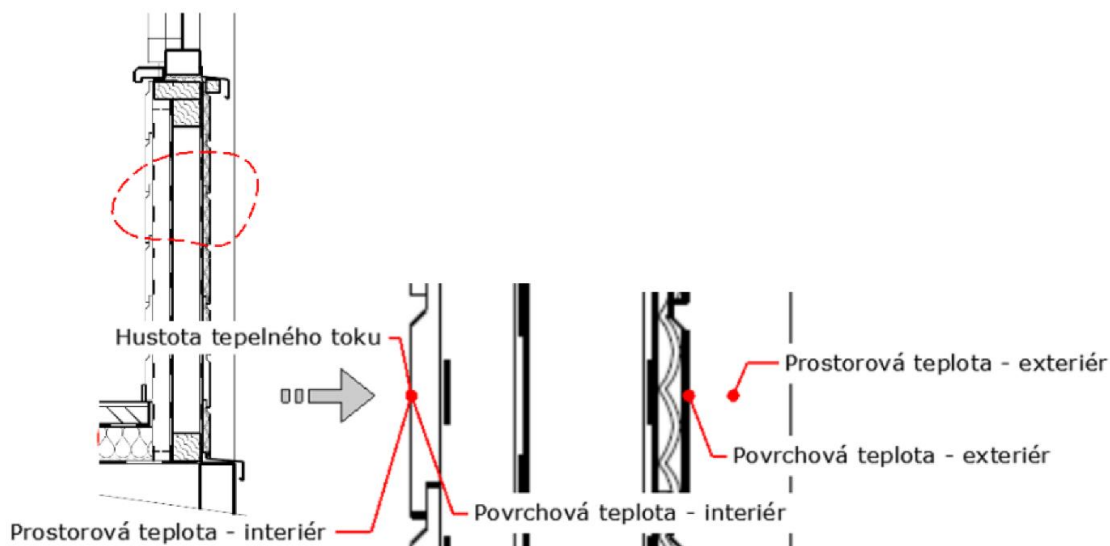


Obr. 27 Řez měřené konstrukce, včetně konstrukčního uspořádání [autor]

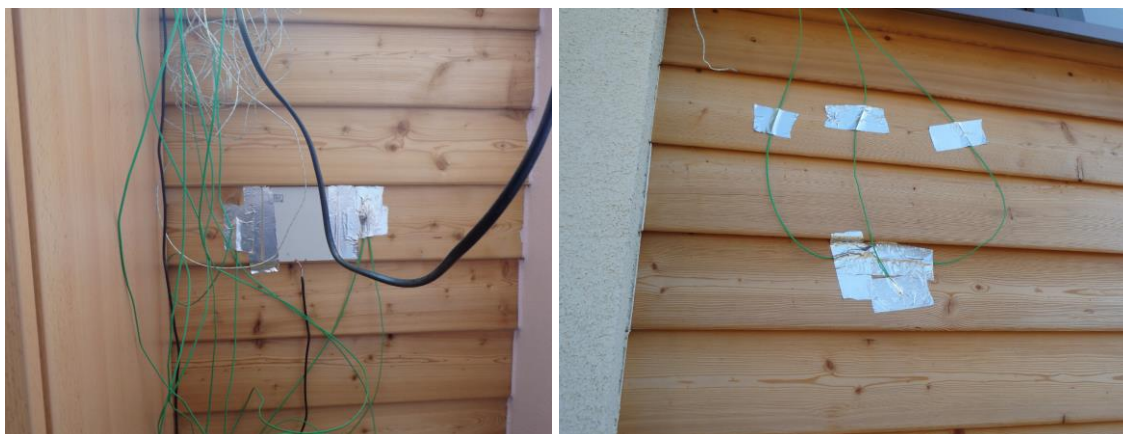
Sledované údaje v rámci experimentálního měření:

Měřené veličiny pro stanovení tepelného odporu nebo součinitele prostupu tepla podle ISO 9869 jsou následující:

- hustota tepelného toku;
- teplota vnitřního a vnějšího povrchu (pro určení tepelného odporu);
- teplota prostředí na obou stranách konstrukce (pro určení součinitele prostupu tepla).



Obr. 28 Schéma rozmístění měřících čidel [autor]



Obr. 29 Pohled na konstrukci - osazení čidel, z interiérové a exteriérové strany [autor]

Konstrukce č. 2 – plochá střecha

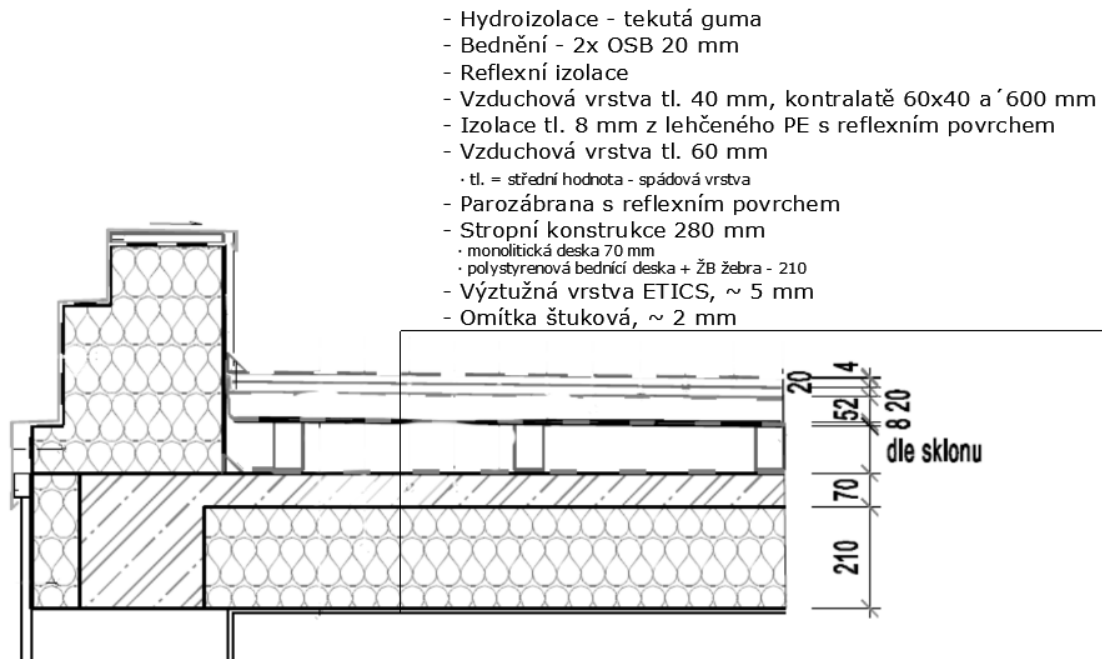


Obr. 30 Pohled na měřenou konstrukci – plochá střecha [autor]

Skladba konstrukce

Tepelně izolační vrstvu hodnocené konstrukce tvoří polystyrenová bednicí stropní deska a reflexní izolace, v kombinaci se vzduchovou vrstvou, která je zajištěna dřevěnými latěmi. Jádrem reflexního stavebního izolačního pásu je tvořeno lehčeným PE, jenž je laminovaný hliníkovou folií. Tato reflexní izolace (typu 1) rozděljuje vzduchovou dutinu, která je ohraničena reflexními izolacemi typu 4. Horní opláštění je provedeno dřevěným bedněním z OSB desek. Tepelně izolační vlastnosti stropní

konstrukce pro následné výpočty byly stanoveny dle katalogových listů výrobce, hodnotou $\lambda_u = 0,225 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

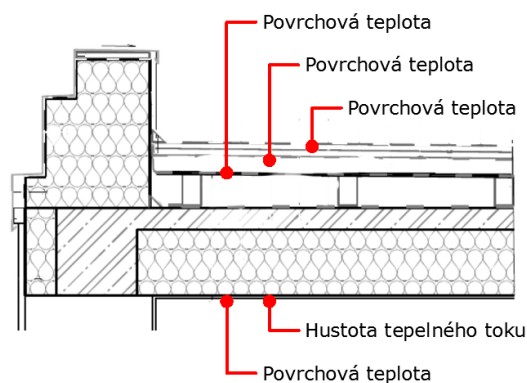


Obr. 31 Řez měřené konstrukce, včetně konstrukčního uspořádání [autor]

Sledované údaje v rámci experimentálního měření:

Měřené veličiny pro stanovení tepelného odporu podle ISO 9869 jsou následující:

- hustota tepelného toku,
- teplota vnitřního a vnějšího povrchu (pro určení tepelného odporu)



Obr. 32 Schéma rozmístění měřících čidel [autor]



Obr. 33 Aplikace měřících čidel, pohled na měřící ústředny [autor]



Obr. 34 Pohled na konstrukci - osazení čidel, z exteriérové a interiérové strany [autor]

2. TEORETICKÉ METODY

Před zahájením experimentálních měření bylo studium současného stavu řešené problematiky, tj. dostupných poznatků z odborných textů, které se zabývají problematikou reflexních izolací. Jednalo se o texty tuzemské i zahraniční odborné literatury, přednášky odborných konferencí, směrnic a norem. V neposlední řadě i studium populární literatury, především sledování různých diskuzí na internetu zabývajících se reflexními izolacemi a jejich porovnání s klasickými tepelnými izolacemi (eliminující přenos tepla vedením – tj. minerální vlna, EPS, apod.).

Tepelně-izolační vlastnosti vzduchové vrstvy je možné určit několika způsoby. Můžeme použít výpočtový model, experimentální měření v laboratoři nebo v reálných podmínkách.

2.1.1. Stanovení tepelného odporu vzduchové vrstvy výpočtem

Tepelněizolační vlastnosti vzduchové vrstvy výpočtem lze provést pomocí metodiky ČSN EN ISO 6946, která je podrobně popsána v části B. Současný stav řešené problematiky - stanovení tepelného odporu vzduchové vrstvy výpočtem. V řadě odborných publikací je metodika této normy zpochybněna, např. v článku [Hejhálek, 2012] popisuje, že norma uvádí chybný vzorec výpočtu a tím poškozují výrobce reflexních fólií. Vypočtené hodnoty budou porovnány s výsledky experimentálního měření. Následně bude pak prokázáno, zdali lze metodiku výpočtu tepelného odporu vzduchových vrstev dle ČSN EN ISO 6946 doporučit pro využití v praxi. Veškeré výpočty a měřené hodnoty budou probíhat za běžných okrajových podmínek. Tato disertační práce se zabývá pouze aplikací reflexních izolací v konstrukcích nízkoenergetických staveb, které jsou těmto podmínkám vystaveny.

E. VÝSLEDKY A DISKUZE

1. USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Typický zkušební prvek určený pro měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny metodou teplé skříně dle ČSN EN 16012 byl podroben několika měřeními, jejímž cílem bylo sledovat především:

- tepelné izolační vlastnosti jádra reflexní izolace;
- tepelně izolační vlastnosti přilehlé vzduchově vrstvy.

Obě měření probíhala současně na téže konstrukci. U stanovení tepelně izolačních vlastností jádra reflexních izolací byla sledována nejen jeho tloušťka ale i různé okrajové podmínky (zvolen jiný teplotní spád). Zde bude navíc sledován různý způsob vyhodnocení – metoda teplé skříně (s pomocnými výpočty) s metodou měřidla tepelného toku (bez pomocných výpočtů). U vyhodnocení tepelně izolačních vlastností přilehlé vzduchové dutiny bude provedeno i kontrolní výpočet metodiky dle ČSN EN ISO 6946, se vstupními údaji (teploty), které byly naměřeny na hodnocené konstrukci.

Výsledky laboratorního měření, které jsou prezentovány v této disertační práci, lze rozdělit do několika dílčích měření. Ve většině případů se jedná o reflexní izolaci s jádrem z extrudovaného, lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie), mění se pouze jejich tloušťky - 8, 10, 12 a 30 mm. Jedná se o stejný materiál, který je obsažen v konstrukci reálné budovy, podrobené experimentálnímu měření za neustáleného teplotního stavu, IN SITU, kde byla použita reflexní izolace tloušťky 8 mm.

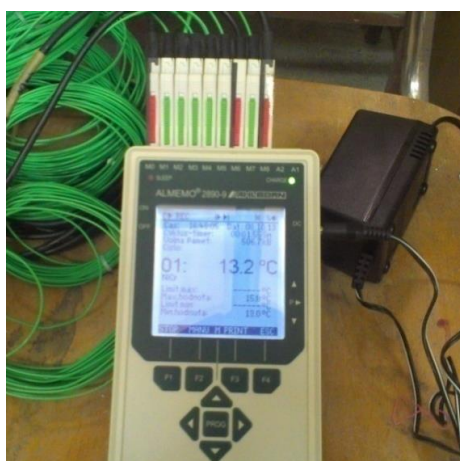
Dále bylo provedeno měření reflexní izolace s jádrem z LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií, o celkové tloušťce výrobku 15 mm.

Posledním vzorkem, který byl podroben laboratornímu měření, byla tzv. sendvičová reflexní izolace složená z 10 vrstev odrazných pokovených fólií s reflexní hliníkovou vrstvou a 9 vrstev tvořených pěnovým polyetylenem a syntetickým rounem (celkem 19). Celková tloušťka výrobku 15 mm [EC THERM, 2020].

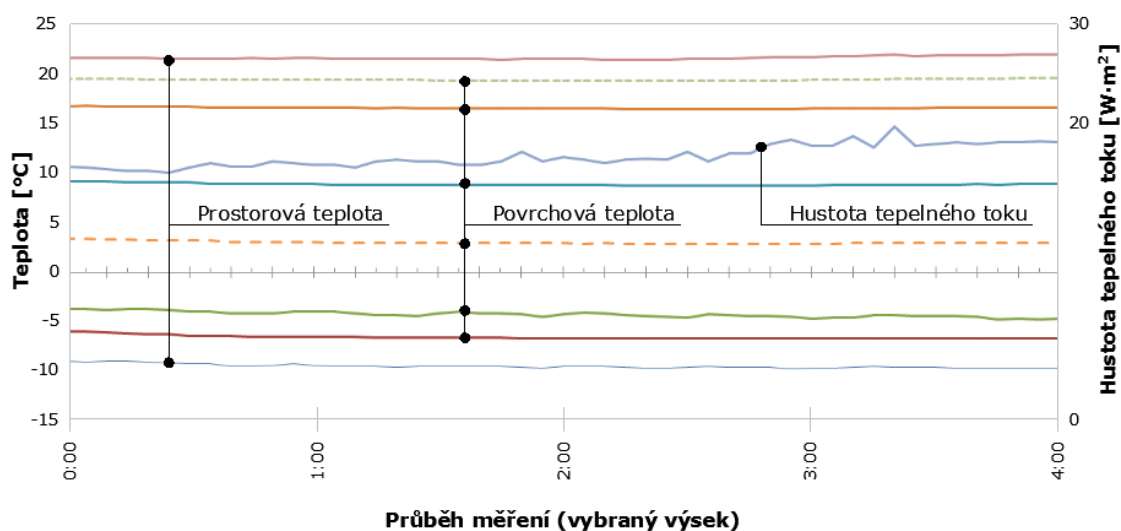
1.1. TEPELNĚ IZOLAČNÍ VLASTNOSTI JÁDRA REFLEXNÍ IZOLACE A PŘILEHLÝCH VZDUCHOVÝCH VRSTEV



Obr. 35 Pohled na zkušební prvek včetně měřeného vzorku [archiv autora]



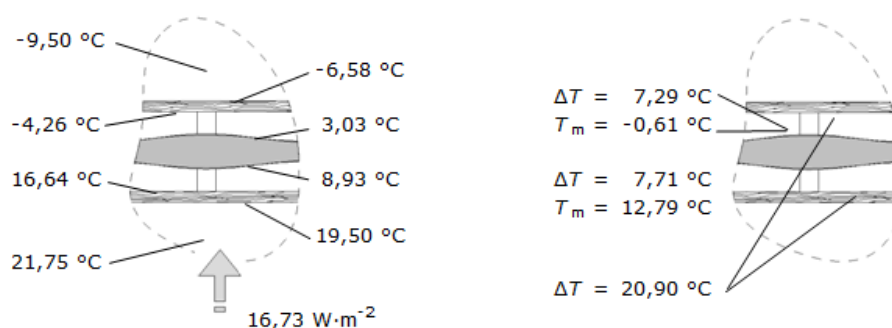
Obr. 36 Pohled na měřicí ústřednu - datalogger univerzální ALMEMO 2890-9 a osazení měřicího čidla - snímače tepelného toku a povrchové teploty [archiv autora]



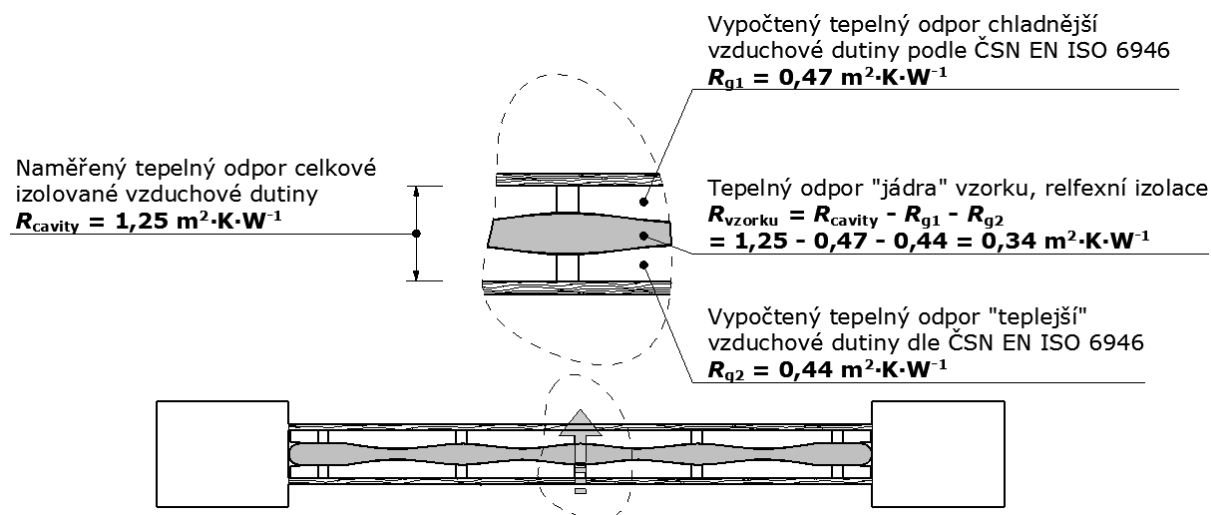
Obr. 37 Průběh laboratorního měření vzorku tl. 8 mm při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K

Na obr. 37 je zobrazen průběh měření vzorku reflexní izolace s jádrem z lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie) tl. 8 mm. Lze si všimnout, že jednotlivé povrchové teploty ani hustota tepelného toku nevykazovali monotónně vzestupnou či sestupnou tendenci. Jednotlivé povrchové teploty vztažných plochách zkušebního vzorku se neliší o více než 0,15 K od průměrné teploty vztažné plochy, jsou tedy splněny základní podmínky ustáleného teplotního stavu (podrobněji pospáno v části 4.2 4). Tyto podmínky byly splněn pro všechna měření publikované v této disertační práci.

Během tohoto měření byla získány následující průměrné hodnoty:



Obr. 38 Schéma rozmístění čidel a průměrné naměřené hodnoty, vzorku tl. 8 mm, při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K



Obr. 39 Vyhodnocení laboratorního měření vzorku tl. 8 mm při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K

Na obr. 39 je graficky znázorněn princip vyhodnocení laboratorního měření dle ČSN EN 16012, kdy výsledný tepelný odpor jádra výrobku je dán rozdílem měřeného tepelného odporu celé dutiny a vypočtených tepelných odporů vzduchových dutin dle [ČSN EN ISO 6946, 2008].

Tab. 2 Vyhodnocení laboratorního měření vzorku tl. 8 mm při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K, ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,25 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,44 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,34 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	8 mm
Teplotní spád celkové izolované vzduchové dutiny	~ 21 K
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,024 W·K⁻¹·m⁻¹

Tab. 3 Vyhodnocení laboratorního měření vzorku tl. 8 mm, při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K měřičem tepelného toku, bez doplňujících výpočtů tepelných odporů vzduchových dutin

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,25 m ² ·K·W ⁻¹
Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,461 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,436 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,35 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	8 mm
Teplotní spád celkové izolované vzduchové dutiny	~ 21 K
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,023 W·K⁻¹·m⁻¹

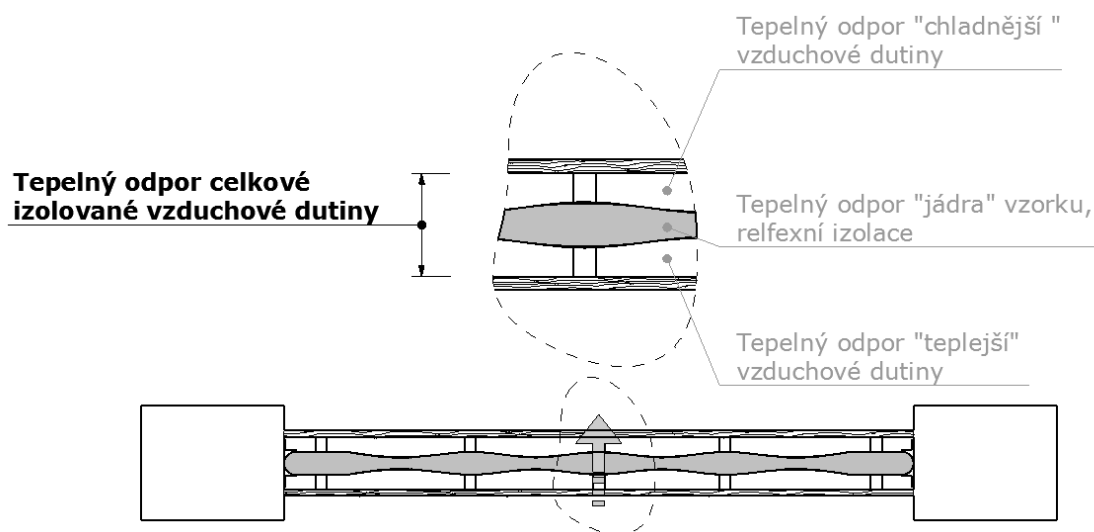
Výše uvedené tabulky uvádí dva různé způsoby vyhodnocení experimentálního měření reflexních izolací za ustáleného teplotního stavu. Rozdíl ve vyhodnocení spočívá pouze v tom, že tepelné odpory jednotlivých vzduchových vrstev jsou v jednom případě počítána dle ČSN EN ISO 6946 a ve druhém případě přímo vyhodnocena z vlastního měření (podíl rozdílů teploty povrchů a hustoty tepelného toku). U tohoto vyhodnocení laboratorního měření (vzorku tl. 8 mm, teplotní spád celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K) došlo k rozdílu 2,9 % (konkrétně $0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) u tepelného odporu jádra výrobku. V případě ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku se jedná o rozdíl 4,3 % ($0,001 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).

V příloze L1 jsou zobrazena ostatní provedená měření, včetně jednotlivých vyhodnocení, jejíž shrnutí uvádí následující kapitola.

1.2. ZÁVĚR K EXPERIMENTÁLNÍMU MĚŘENÍ ZA USTÁLENÉHO TEPLOTNÍHO STAVU

Extrudovaný - lehčený PE s oboustranným reflexním povrchem

Tepelný odpor celkové vzduchové dutiny



Obr. 40 Názorné schéma celkové izolované vzduchové dutiny

Vyhodnocené tepelné odpory celkové vzduchové dutiny jednotlivých měření pro vybrané výrobky a teplotních spádů uvádí tab. 4:

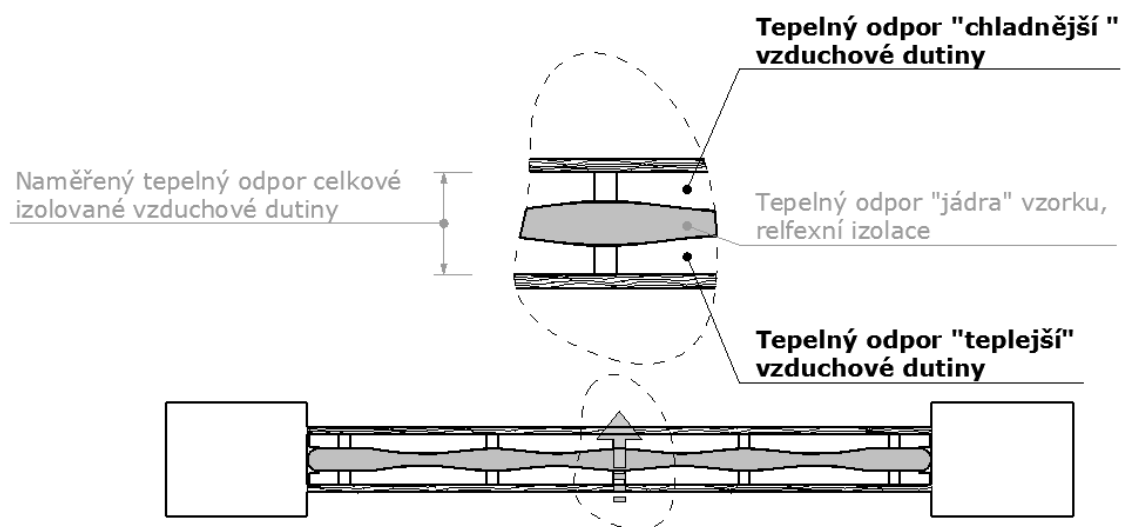
Tab. 4 Naměřené hodnoty tepelného odporu celkové izolované vzduchové dutiny pro jednotlivá měření

Tloušťka jádra použité reflexní izolace [mm]	Rozdíl teplot povrchů celkové vzduchové dutiny [K]	Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
8	~ 21	1,25
8	~ 7	1,28
10	~ 21	1,26
10	~ 7	1,29
12	~ 21	1,27
12	~ 7	1,30
30	~ 15	1,79
30	~ 9	1,74

Z tabulky je patrné, že tepelný odpor celkové vzduchové dutiny roste s vyšší tloušťkou jádra reflexní izolace z důvodu schopnosti jádra omezovat přenos tepla (především vedením) lépe než vzduchové dutiny.

Rozdíly mezi výslednými hodnotami v rámci dané tloušťky jádra reflexní izolace nejsou pro nastavené okrajové podmínky nijak výrazné, pro tloušťku vzorku 8, 10 a 12 mm je to 2,4%, pro tl. 30 mm pak 2,8 % (zde konkrétně $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).

Tepelné odpory dílčích vzduchových dutin – naměřené a vypočtené



Obr. 41 Názorné schéma sledovaných dílčích vzduchových dutin

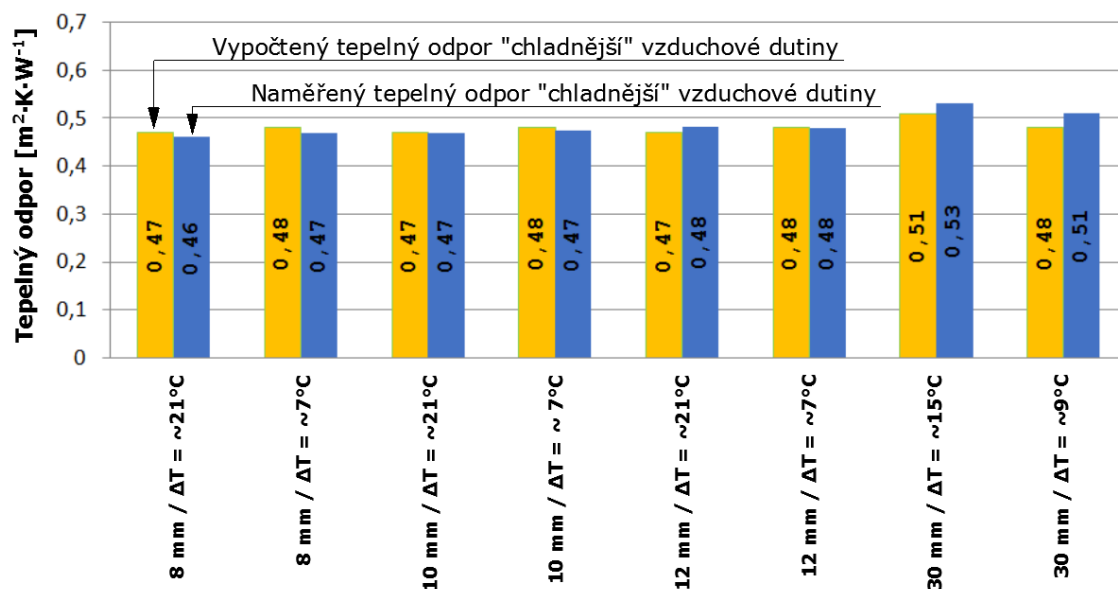
Měřený vzorek byl osazen do konstrukce izolované vzduchové dutiny v souladu ČSN EN 16012 – podrobněji viz B. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY - Stanovení tepelného odporu výrobku metodou teplé skříně.

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny je složen z tepelného odporu:

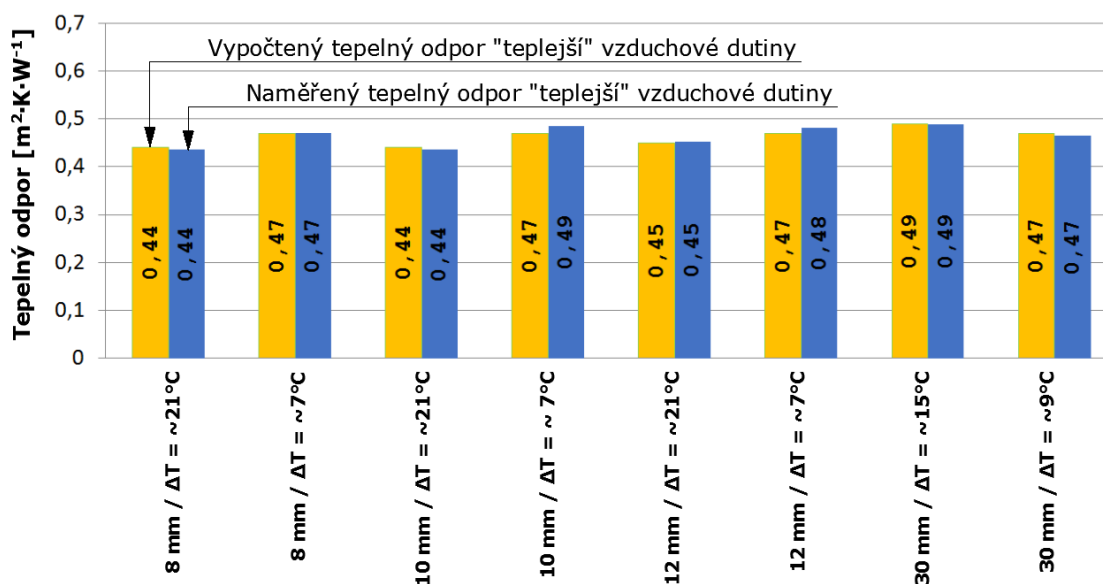
- vzduchové dutiny „před“ měřeným vzorkem;
- měřeného vzorku – reflexní izolace;
- vzduchové dutiny „za“ měřeným vzorkem

Pro vyhodnocení tepelného odporu vzorku bylo nutné nejdříve stanovit tepelné odpory jednotlivých vzduchových dutin. Ty byly získány v souladu s ČSN EN 16012 výpočtem dle ČSN EN ISO 6946, kdy vstupní hodnoty pro výpočet byly změřeny. Druhý způsob, který uvádí tato práce, pod pojmem „naměřené hodnoty“ je bez doplňujících výpočtů a jedná se o vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku.

Vypočtené a naměřené tepelné odpory jednotlivých vzduchových dutin jednotlivých měření pro vybrané tloušťky vzorků vystavených různým teplotním spádům uvádí následující grafy:



Obr. 42 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu „chladnější“ vzduchové dutiny pro jednotlivá měření



Obr. 43 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu „chladnější“ vzduchové dutiny pro jednotlivá měření

V obou případech je patrné, že hodnoty tepelných odporů získaných v rámci „chladnější“ i „teplejší“ vzduchové dutiny vykazují minimální rozdíly. Podrobněji viz následující tabulka.

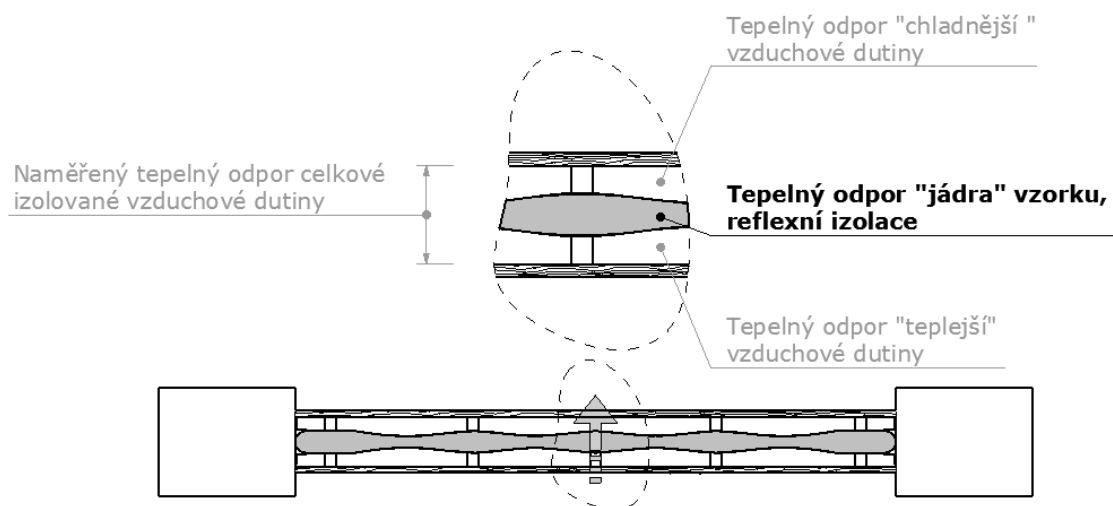
Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu jednotlivých vzduchových dutin pro jednotlivá měření

Tloušťka měřeného vzorku [mm] Teplotní spád [K]	Vypočtený tepelný odpor R [m²·K·W⁻¹] vzduchové dutiny		Naměřený tepelný odpor R [m²·K·W⁻¹] vzduchové dutiny		Rozdíl mezi vypočteným a naměřeným tepelným odporem [m²·K·W⁻¹]	
	„chladnější“	„teplejší“	„chladnější“	„teplejší“		
8 / ~ 21	0,47	0,44	0,461	0,436	0,009	0,004
8 / ~ 7	0,48	0,47	0,47	0,47	0,01	0
10 / ~ 21	0,47	0,44	0,468	0,436	0,002	0,004
10 / ~ 7	0,48	0,47	0,474	0,485	0,006	0,015
12 / ~ 21	0,47	0,45	0,482	0,453	0,012	0,003
12 / ~ 7	0,48	0,47	0,48	0,481	0	0,011
30 / ~ 15	0,51	0,49	0,532	0,488	0,022	0,002
30 / ~ 9	0,48	0,47	0,509	0,465	0,029	0,005

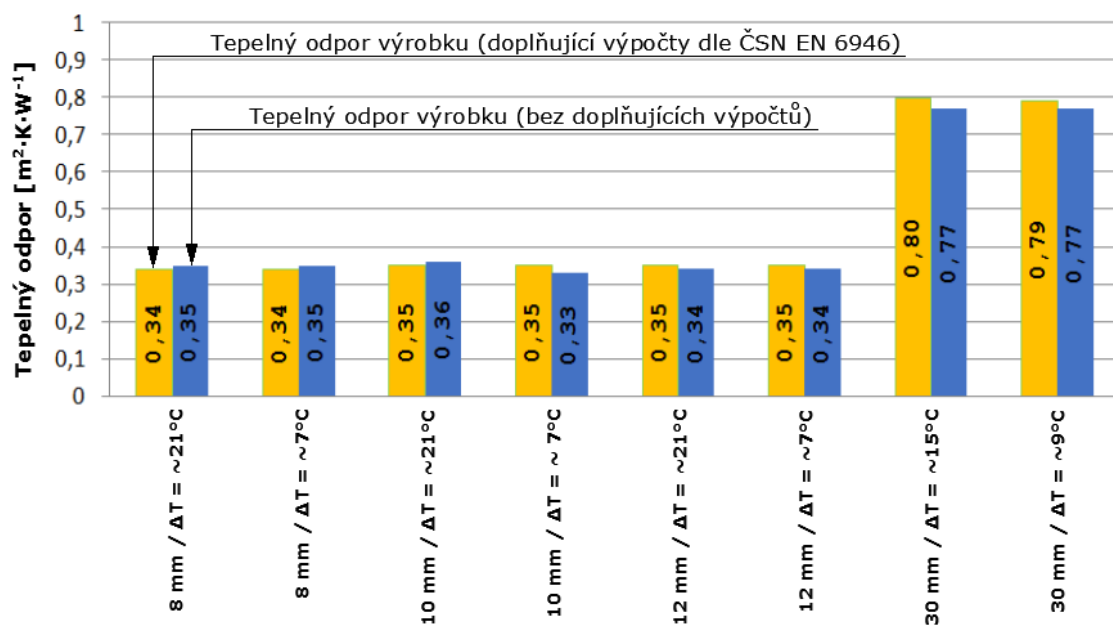
Maximální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými tepelnými odpory vzduchových dutin činí 6 %, tj. $0,029 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ a 4 % v případě měření vzorku tloušťky 30 mm.

Tepelný odpor a součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku – naměřený a vypočtený

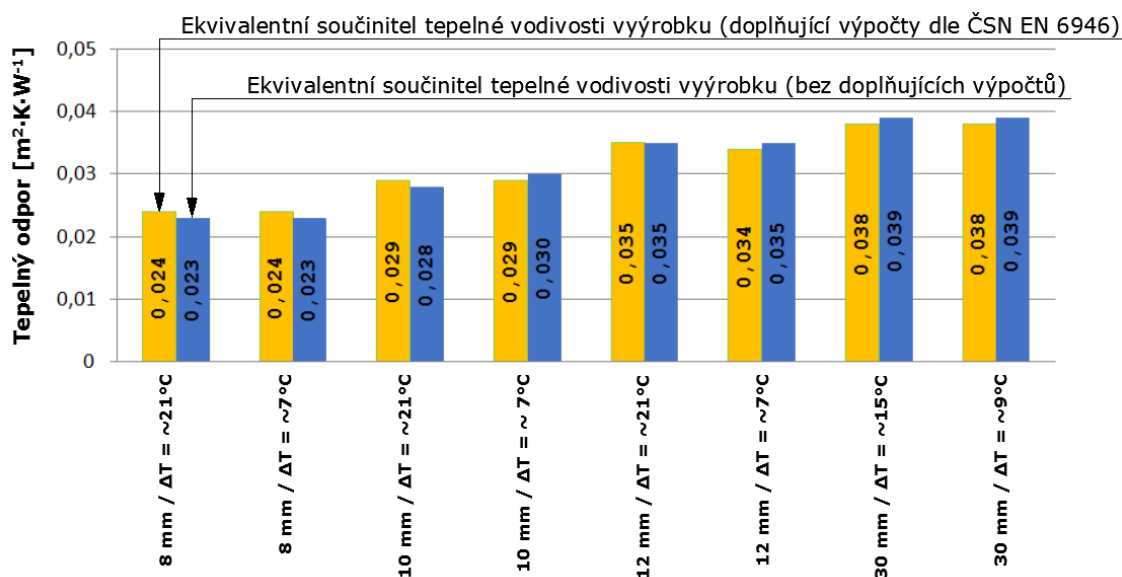
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku je dán rozdílem měřeného tepelného odporu celkové izolované vzduchové dutiny a tepelných odporů dílčích vzduchových dutin.



Obr. 44 Názorné schéma jádra vzorku reflexní izolace



Obr. 45 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu jádra výrobku



Obr. 46 Naměřené a vypočtené hodnoty součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku

Výše uvedené grafy zobrazují poměrně shodné vypočtené a naměřené hodnoty tepelných odporů a ekvivalentních součinitelů tepelné vodivosti. Podrobněji viz následující tab. 6.

Tab. 6 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku

Tloušťka měřeného vzorku [mm] Teplotní spád [K]	Tepelný odpor R [m²·K·W⁻¹] jádra výrobku		Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [W·K⁻¹·m⁻¹] jádra výrobku		Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami	
	„vypočtený“	„naměřený“	„vypočtený“	„naměřený“	R	λ
8 / ~ 21	0,34	0,35	0,024	0,023	0,01	0,001
8 / ~ 7	0,34	0,35	0,024	0,023	0,01	0,001
10 / ~ 21	0,35	0,36	0,029	0,028	0,01	0,001
10 / ~ 7	0,35	0,33	0,029	0,03	0,02	0,001
12 / ~ 21	0,35	0,34	0,035	0,035	0,01	0
12 / ~ 7	0,35	0,34	0,034	0,035	0,01	0,001
30 / ~ 15	0,8	0,77	0,038	0,039	0,03	0,001
30 / ~ 9	0,79	0,77	0,038	0,039	0,02	0,001

Z tabulky je patrný maximální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami, který činí 3,9 % (konkrétně 0,03 m²·K·W⁻¹) u tepelného odporu jádra výrobku o tloušťce 30 mm. V případě ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku se jedná o rozdíl 2,6 % (0,001 W·K⁻¹·m⁻¹).

Z vyhodnocených měření je patrné, že se zvyšující tloušťkou jádra se zvyšuje i ekvivalentní součinitel prostupu tepla. Tento jev je způsobený tím, že při průchodu

elektromagnetického záření prostředím je hustota zářivého toku pohlcována v absorbujiící vrstvě a přeměně se ve vedení. Při vyšších tloušťkách izolace pak ke druhému reflexnímu povrchu menší poměr sálavé složky, proto to patrné zhoršení.

Tab. 7 Hodnoty ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku pro vybrané tloušťky reflexní izolace typu I

Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] jádra výrobku
8 mm	0,023 až 0,024
10 mm	0,028 až 0,030
12 mm	0,034 až 0,035
30 mm	0,038 až 0,039

Podmínkou pro porovnání bylo stejný materiál jádra reflexní izolace, který byl ve všech případech výše uvedeného měření extrudovaný polyetylen s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie) - měnila se pouze tloušťka (8, 10, 12 a 30 mm).

Měřením stejného materiálu se zabýval článek [Hejhálek, 2012]. Měření bylo provedeno jinou metodikou, na tzv. lambda válci, jeho princip publikoval [Hejhálek, 2011]. K měření byl vybrán stavební izolační pás s oboustranným reflexním povrchem v deklarovaných tloušťkách 8 mm, 10 mm a 12 mm. Výsledky měření ukazuje následující tabulka.



Obr. 47 Foto měřeného vzorku [autor]

Tab. 8 Hodnoty ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku pro vybrané tloušťky reflexní izolace [Hejhálek, 2012]

Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] jádra výrobku dle [Hejhálek, 2012]	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] jádra výrobku
8 mm	0,026 až 0,027	0,023 až 0,024
10 mm	0,027 až 0,028	0,028 až 0,030
12 mm	0,028 až 0,029	0,034 až 0,035

Přestože se hodnocení jednotlivých měření mírně liší, které může být způsobené drobně jinou emisivitou reflexního povrchu (např. vlivem oxidace povrchu) lze si opět povšimnout skutečnosti, že s klesající tloušťkou ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra reflexní izolace klesá.

LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií

Tepelný odpor celkové vzduchové dutiny

Vyhodnocené tepelné odpory celkové vzduchové dutiny jednotlivých měření pro nastavené teplotní spády uvádí následující tabulka:

Tab. 9 Naměřené hodnoty tepelného odporu celkové izolované vzduchové dutiny

Tloušťka jádra použité reflexní izolace [mm]	Rozdíl teplot povrchů celkové vzduchové dutiny [K]	Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
15	~ 10	1,84
15	~ 16	1,76

Rozdíl mezi výslednými hodnotami pro nastavené okrajové podmínky jsou 4,5%, ($0,08 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$).

Tepelné odpory dílčích vzduchových dutin – naměřené a vypočtené

Tab. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu dílčích vzduchových dutin

Tloušťka měřeného vzorku [mm]	Vypočtený tepelný odpor R [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$] vzduchové dutiny		Naměřený tepelný odpor R [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$] vzduchové dutiny		Rozdíl mezi vypočteným a naměřeným tepelným odporem [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]	
	„chladnější“	„teplejší“	„chladnější“	„teplejší“		
Teplotní spád [K]						
15/~10	0,48	0,47	0,513	0,502	0,033	0,032
15/~16	0,48	0,47	0,489	0,466	0,009	0,019

V obou případech je patrné, že hodnoty tepelných odporů „chladnější“ i „teplejší“ vzduchové dutiny vykazují minimální rozdíly. Maximální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými tepelnými odpory vzduchových dutin činí 6,9 %, tj. $0,033 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Tepelný odpor a součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku – naměřený a vypočtený

Tab. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku

Tloušťka měřeného vzorku [mm] Teplotní spád [K]	Tepelný odpor R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] jádra výrobku		Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$] jádra výrobku		Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami	
	„vypočtený“	„naměřený“	„vypočtený“	„naměřený“	R	λ
15/~10	0,89	0,83	0,017	0,018	0,06	0,02
15/~16	0,81	0,83	0,019	0,018	0,02	0,01

Dle výše uvedené tabulky činí maximální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami 7,2% (konkrétně $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) u tepelného odporu a případě ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku se jedná o rozdíl 5,9 % ($0,02 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).

Měřením o shodném materiálovém složení jádra reflexní izolace se zabýval článek [Rauchfussová *et* Šťastník, 2016], kdy sice byl měřen pouze tepelný odpor výrobku. Ten lze však převést na ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti.



Obr. 48 Foto měřeného vzorku [autor]

Výsledky měření, při obdobném teplotním spádu (16 ~ 17 K) ukazuje následující tabulka.

Tab. 12 Hodnota tepelného odporu jádra výrobku

Tepelný odpor R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] jádra výrobku [Rauchfussová et Šťastník, 2016] při teplotním spádu 17 K	Tepelný odpor R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] jádra výrobku při teplotním spádu 16 K [autor]	Rozdíl v hodnotě tepelného odporu R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
0,76	0,81	0,05

Tab. 13 Hodnota ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku

Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$] jádra výrobku [Rauchfussová et Šťastník, 2016] při teplotním spádu 17 K	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$] jádra výrobku při teplotním spádu 16 K [autor]	Rozdíl v hodnotě ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]
0,0197	0,0185	0,012

Výše uvedené tabulky uvádí porovnání tepelných odporů LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií, které byly naměřeny pro účely této disertační práce s hodnotami publikované v článku [Rauchfussová et Šťastník, 2016].

Rozdíl mezi jednotlivými hodnotami činí 6,5% (konkrétně $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ u tepelného odporu a $0,012 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ v případě ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku. Vzhledem k minimální rozdílu se lze odkazovat i na ostatní měření publikované v článku [Rauchfussová et Šťastník, 2016], popř. [Rauchfussová, 2016], kdy bylo měřené více výrobků o tomto materiálovém složení (bublinková folie o různých tloušťkách - více vrstvách. Z jednotlivých výsledků a závěru je patrné, že přestože se zvyšují hodnoty tepelného odporu, hodnoty ekvivalentního součinitele prostupu tepla se zhoršují. Tato skutečnost byla potvrzena i u našeho měření reflexní izolace s jádrem z lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem.

Vícevrstvá reflexní izolace z vrstev pěnového polystyrolu a hliníkových foliíTepelný odpor celkové vzduchové dutiny

Vyhodnocený tepelné odpory celkové vzduchové dutiny uvádí následující tabulka:

Tab. 14 Naměřené hodnoty tepelného odporu celkové izolované vzduchové dutiny

Tloušťka jádra použité reflexní izolace [mm]	Rozdíl teplot povrchů celkové vzduchové dutiny [K]	Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
15	~ 14	1,52

Tepelné odpory dílčích vzduchových dutin – naměřené a vypočtené

Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu jednotlivých vzduchových dutin

Tloušťka měřeného vzorku [mm]	Vypočtený tepelný odpor R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] vzduchové dutiny		Naměřený tepelný odpor R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] vzduchové dutiny		Rozdíl mezi vypočteným a naměřeným tepelným odporem [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]	
	„chladnější“	„teplejší“	„chladnější“	„teplejší“		
15/~14	0,41	0,39	0,418	0,371	0,008	0,019

V obou případech je patrné, že hodnoty tepelných odporů „chladnější“ i „teplejší“ vzduchové dutiny vykazují minimální rozdíly. Maximální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými tepelnými odpory vzduchových dutin činí 5,1 %, tj. $0,019 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Tepelný odpor a součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku – naměřený a vypočtený

Tab. 16 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku

Tloušťka měřeného vzorku [mm]	Tepelný odpor R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] jádra výrobku		Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$] jádra výrobku		Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami	
	„vypočtený“	„naměřený“	„vypočtený“	„naměřený“	R	λ
15/~14	0,723	0,729	0,021	0,021	0,02	0,00

Dle výše uvedené tabulky činí maximální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami 1% (konkrétně $0,006 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) u tepelného odporu a v případě ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku dokonce bylo dosaženo shodných hodnot.

Často se prezentují tepelně izolační vlastnosti reflexních izolací prostřednictvím srovnávacího měření mezi dvěma objekty [Tenpierik *et Hasselaar*, 2013]. Princip spočívá v tom, že jeden objekt je zateplen minerální vlnou o známém tepelném odporu a druhý reflexní izolací. Udržování stejného vnitřního prostředí (teplota) v objektech, které jsou vystaveny stejným okrajovým podmínkám, se odhaduje následná hodnota tepelného odporu reflexní izolace popřípadě jejího souvrství se vzduchovou dutinou, tzn.: pokud je referenční objekt zateplený minerální vlnou o celkové tloušťce 200 mm a spotřeba energie pro dosažení totožného stavu vnitřního prostředí v obou objektech stejná, pak lze konstatovat, že tepelný odpor reflexní izolace je roven tepelnému odporu izolace z minerálních vláken. Takové srovnání je možné pouze za předpokladu, že oba objekty jsou naprosto identické a je důležité klást důraz i na další technické parametry, především vzduchotěsnost a provedení tepelných mostů [Tenpierik *et Hasselaar*, 2013]. Například uváděná studie [Lindauer, *et Sinnesbichler*, 2007] poukazuje na význam rozdílů ve vzduchotěsnosti mezi objekty, které vykazovali stejné tepelné ztráty při zateplení objektu minerální vlnou tl. 200 mm versus 20 mm reflexní izolace. Na základě této rovnice se dojde k závěru, že souvrství reflexní izolace a vzduchových dutin mají stejné tepelně izolační vlastnosti jako minerální izolace ze skelných vláken. Při provedení tlakové zkoušky za rozdílu 50 Pa byl zjištěn rozdíl 45 % v neprospěch objekt zatepleného minerální vlnou. Tyto infiltrační ztráty jsou nesprávně připisovány tepelně izolačním vlastnostem reflexní izolace a v téže studii [Lindauer *et Sinnesbichler*, 2007] bylo následně určeno, že tyto vlastnosti jsou srovnatelné přibližně jako cca 130 mm (~ 2/3 z původního 200 mm). V navazujících studiích [Hauser *et al.*, 2014] a [CSTB, 2007] jsou jednotlivé hodnoty zpřesněny. Ze závěrů lze vyvodit, že dům izolovaný reflexní izolací používá dvakrát tolik energie k udržení konstantní a stejné vnitřní teploty jako zkušební dům izolovaný izolací z minerálních vláken 200 mm [Tenpierik *et Hasselaar*, 2013].

Výše uvedené aspekty (vzduchotěsnost, tepelné mosty), popř. různé okrajové podmínky mohou být jedním z důvodů, proč se v literatuře objevují extrémní hodnoty součinitele prostupu tepla ($\lambda < 0,006 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), jak je prezentované například v článkách [Remeš, 2010], [Bílek, 2019].

Porovnání jednotlivých materiálů jádra reflexní izolace z hlediska jejich tepelně izolačních vlastností

Byly měřeny reflexní izolace s následujícím materiálovým složením:

- (1) Reflexní izolace s jádrem z extrudovaného, lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná fólie).
- (2) LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií
- (3) Vícevrstvá / sendvičová reflexní izolace z vrstev pěnového polyetylénu a hliníkových folií

Pro porovnání je v případě reflexní izolace s jádrem z extrudovaného, lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná fólie) uvedený výrobek o tloušťce 12 mm (nejbližší rozměr k ostatním porovnávaným vzorkům).

Tab. 17 Hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku vybraných reflexních izolací

Materiálové složení (viz výše)	Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]	Tepelný odpor R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] jádra výrobku	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$] jádra výrobku
(1)	1,27 – 1,30	0,35	0,034 – 0,035
(2)	1,76 – 1,84	~ 0,85 (0,81 – 0,89)	~ 0,018 (0,017 – 0,019)
(3)	1,52	0,72	0,021

Na základě provedených měření, které jsou shrnuté ve výše uvedené tabulce, lze konstatovat, že z hlediska tepelně izolačních vlastností je nejvhodnějším materiálem LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií o tloušťce 15 mm. O 17 % vyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti má vícevrstvá / sendvičová reflexní izolace a 92 % pak reflexní izolace s jádrem z extrudovaného, lehčeného PE.

Použití reflexní izolace typu 4 - nahrazení jádra reflexní izolace vzduchovou vrstvou

Kdybychom chtěli posoudit, zda-li není výhodnější nahradit jádro reflexní izolace vzduchovou vrstvou, můžeme do vzduchové dutiny vložit více reflexních izolací, kterým se zabýval např. článek [Pastory *et. al.*, 2011], kde byl řešen „počet“ reflexních izolací a jeho vliv na tepelné vlastnosti dutiny. Měření sice probíhalo výrazně menší prvek (metodou chráněné desky – 30 x 30 cm, o celkové tloušťce jen 30 mm).

Dle níže uvedené tabulky lze odvodit, jak by se měnily tepelné vlastnosti reflexní izolace, kdyby bylo materiál jádra nahrazen vzduchovou vrstvou.

Tab. 18 Vztah mezi tepelněizolačními vlastnostmi vzduchové dutiny a počtem vložených reflexních izolací [Pastory et. al., 2011]

Počet reflexních folií vložených do vzduchové dutiny	Počet dutin	Tloušťka jednotlivých vzduchových dutin	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] dutiny
0	1	30	0,069
1	2	15	0,048
3	4	7,5	0,031
5	6	5	0,029
9	10	3	0,028

Tab. 19 Porovnání ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku tvořeného vzduchovou dutinou nebo polyetylenem

Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] jádra výrobku - PE	Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] vzduchové dutiny [PASTORY et. al., 2011]
8 mm	0,023 až 0,024	7,5	0,031
12 mm	0,034 až 0,035	15	0,048
30 mm	0,038 až 0,039	30	0,069

Tab. 20 Porovnání ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku tvořeného vzduchovou dutinou nebo polyetylenem

Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] jádra výrobku: LDPE bublinková folie	Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] vzduchové dutiny [PASTORY et. al., 2011]
15 mm	0,017 až 0,019	15	0,048

Tab. 21 Porovnání ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku tvořeného vzduchovou dutinou nebo polyetylenem

Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] jádra výrobku – vícevrstvá / sendvičová izolace	Tloušťka izolace	Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] vzduchové dutiny [PASTORY <i>et. al.</i> , 2011]
15 mm	0,021	15	0,048

Porovnáním ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku (u všech měřených vzorků) a vzduchové dutiny [PASTORY *et al.*, 2011] lze konstatovat, že lepší tepelně izolační vlastnosti dosahuje „jádro“ tj. reflexní izolace typu 1,2 nebo 3. Každopádně opodstatněný důvod k využití pouze vzduchových dutin, tzn. použití výrobku typu 4 je výrazně nižší cena za tento typ reflexní izolace (bez jádra).

1.2.1. Shrnutí

Laboratornímu měření byly podrobeny reflexní izolace s jádrem z extrudovaného polyetylenu s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie). Dále byla měřena LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií a reflexní izolace složená z vrstev pěnového polyetylenu a hliníkových folií.

Z výsledků měření za ustáleného teplotního stavu vyplynulo, že hodnoty získané experimentálně jsou velmi blízké hodnotám, které byly stanoveny teoreticky (výpočtem).

Během zajišťování vzorků pro měření od jednotlivých dodavatelů reflexních izolací, byla z jejich strany častá neochota vzorky poskytnout především z důvodu krátkého provádění jednotlivých laboratorních měření. Dle jejich tvrzení se projeví vlastnosti reflexních izolací až po několika hodinách, přestože v případě průkazní, úřední, rozhodčí zkoušky součinitele tepelné vodivosti nesmí mít měřící interval kratší než pouhou jednu hodinu. Jelikož vybraná měření jednotlivých konstrukcí probíhala delší dobu (některá i několik dnů), bylo prokázáno, že tepelně izolační vlastnosti konstrukcí se v průběhu měření výrazně nelišily. Proto lze obavy některých dodavatelů považovat za irelevantní.

Při laboratorním měření metodou teplé skříně pro stanovení deklarovaných vlastností reflexních izolací dle ČSN EN 16012 je výsledný tepelný odpor jádra výrobku dán rozdílem měřeného tepelného odporu celé dutiny (metodou teplé skříně)

a vypočtených tepelných odporů vzduchových dutin (podle ČSN EN ISO 6946). Na základě tohoto postupu, je velmi důležité, aby s hodnotou tepelného odporu jádra výrobku (popř. jejího ekvivalentního součinitele prostupu tepla) byla uváděna i hodnota emisivity povrchu zkoušeného vzorku. Jelikož v případě „uvažování“ nižší odrazivosti povrchu (vyšší emisivity), dochází při výpočtu jednotlivých dutin k nižším hodnotám tepelných odporů vzduchových vrstev a tím pádem k vyšším hodnotám tepelného odporu jádra výrobku.

2. NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, MĚŘENÍ IN-SITU

Někteří výrobci reflexních izolací tvrdí, že tepelně izolační vlastnosti jejich výrobků lze prokázat pouze pomocí měření v reálných podmínkách, a ne v laboratoři. V některých případech hodnoty tepelných vlastností, které byly stanoveny podle neznámých metod, které nekorespondují s metodikou platných norem [NPL report, 2007]; [LABC technical guidance note, 2008].

2.1. KONSTRUKCE STĚNY

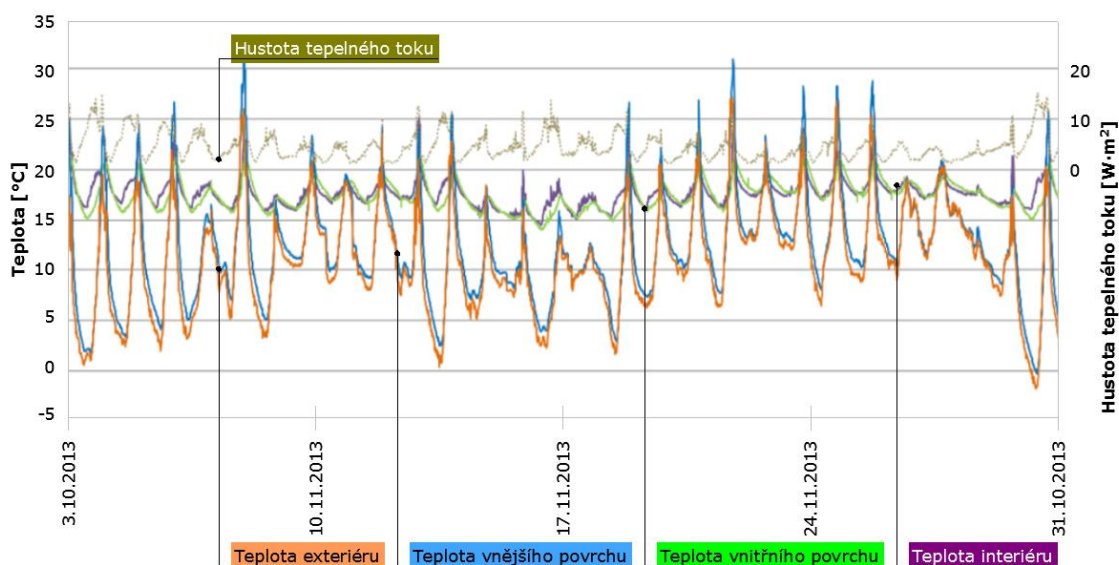
Konstrukce stěny byla podrobena měření nepřetržitě v období „chladnějším“ 3. 10. 2013 – 14. 1. 2014 a v období „teplejším“ 10. 6 - 30. 9. 2014. Důvod zvoleného období byla kapacita měřící ústředny a součinnost majitele. Během tohoto časového úseku však bylo získáno dostatečné množství relevantních dat, pro potřeby disertační práce dostačující. Záznam dat z měření probíhalo v patnáctiminutovém intervalu.

Pro vyhodnocení byly řešeny následující časové úseky:

- časový úsek 1, říjen (3. 10. – 31. 10. 2013);
- časový úsek 2, listopad (1. 11. – 30. 11. 2013);
- časový úsek 3, prosinec (1. 12. – 31. 12. 2013);
- časový úsek 4, leden (1. 1. – 14. 1. 2014);
- časový úsek 5, červen (10. 6. – 30. 6. 2014);
- časový úsek 6, červenec (1. 7. – 31. 7. 2014);
- časový úsek 7, srpen (1. 8. – 31. 8. 2014);
- časový úsek 8, září (1. 9 – 30. 9. 2014).

2.1.1. Celá konstrukce stěny

Časový úsek 1, říjen (3. 10. – 31. 10. 2013), konstrukce stěny



Obr. 49 Průběh měření časového úseku 1, říjen (3. 10. – 31. 10. 2013)

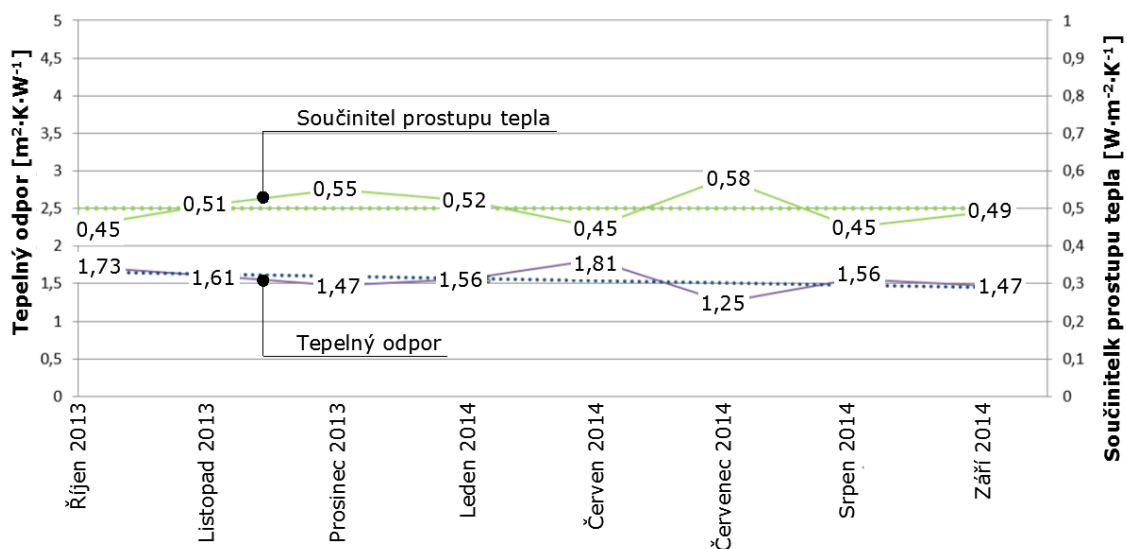
Během tohoto období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 17,74 \text{ °C}$ a průměrná vnější teplota $\theta_e = 10,97 \text{ °C}$. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 17,48 \text{ °C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 12,24 \text{ °C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 3,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 48430,9 \text{ °C}$ a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 29935,1 \text{ °C}$. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 47707,1 \text{ °C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 33415,6 \text{ °C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 8256,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,73 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

V příloze L2.1 jsou zobrazena ostatní provedená měření, včetně jednotlivých vyhodnocení, jejíž shrnutí uvádí následující kapitola (shrnutí vyhodnocených dat).

Shrnutí vyhodnocených datCelá konstrukce stěny

Obr. 50 Grafické znázornění vyhodnocení jednotlivých měsíců

Na základě výše uvedeného grafu je patrné, že tepelně technické vlastnosti posuzované konstrukce v jednotlivých měsících nevykazují výraznější rozdíly (pro názornost proloženo lineární přímkou). Toto tvrzení zobrazuje tab. 22 s vyhodnocením pro jednotlivé časové úseky.

Tab. 22 Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla jednotlivých úseků

Období	Tepelný odpor [m ² ·K·W ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
Říjen	1,73	0,45
Listopad	1,61	0,51
Prosinec	1,47	0,55
Leden	1,56	0,52
Červen	1,81	0,45
Červenec	1,25	0,58
Srpen	1,56	0,45
Zář 2014	1,47	0,49

V průběhu celého měřeného období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 23,28$ °C a průměrná vnější teplota $\theta_e = 17,53$ °C. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 22,74$ °C a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 18,39$ °C. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 2,86$ W·m⁻².

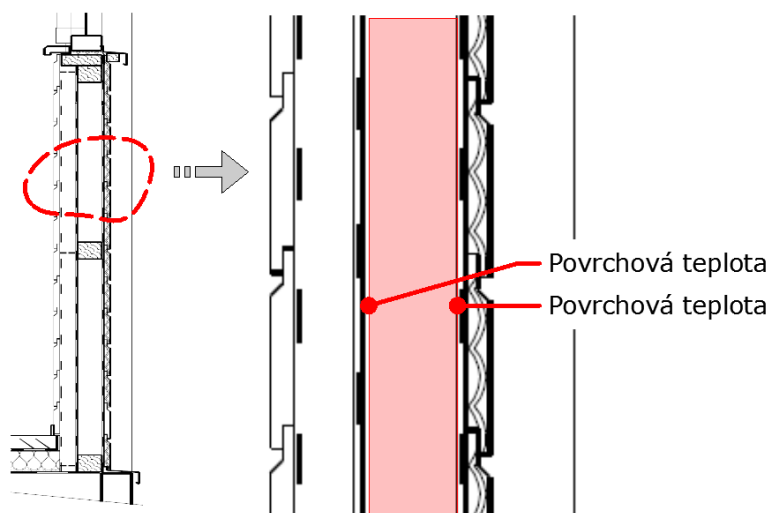
Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 282318,3$ °C a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 212660,5$ °C. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 275767,6$ °C a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 223075,4$ °C. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 34709,6$ W·m⁻².

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,52$ m²·K·W⁻¹
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,50$ W·m⁻²·K⁻¹

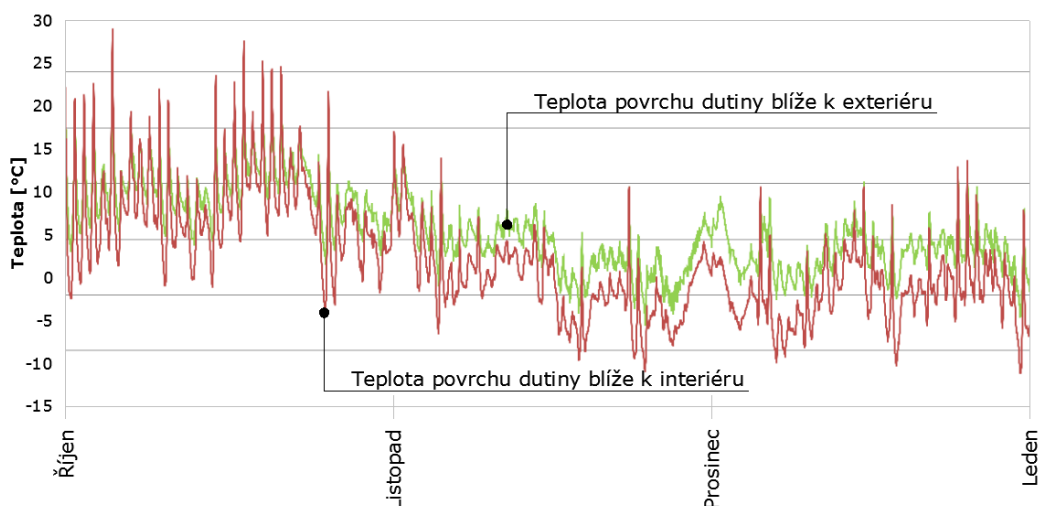
2.1.2. Vzduchová dutina konstrukce stěny

Pro vyhodnocení museli být měřeny následující parametry: povrchová teplota na vnitřní a vnějším povrchu vzduchové dutiny a hustota tepelného toku.



Obr. 51 Vyznačení měřené vzduchové dutiny v konstrukci, včetně schématického znázornění osazení čidel povrchových teplot

Na následujícím grafu je zobrazen průběh teplot ve sledovaném období. Hustota tepelného toku není pro názornost zobrazena ve grafu (tepelný tok viz průběh měření celé konstrukce).



Obr. 52 Průběh měření vzduchové dutiny stěny (3. 10. 2013. – 14. 1. 2014)

Časový úsek 1, říjen (3. 10. – 31. 10. 2013)

Během tohoto období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},i} = 15,11 \text{ °C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},e} = 13,32 \text{ °C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 3,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity},i} = 41248,2 \text{ °C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity},e} = 36358,6 \text{ °C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 8256,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor vzduchové vrstvy $R = 0,59 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

Časový úsek 2, listopad (1. 11. – 30. 11. 2013)

Během tohoto období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},i} = 10,47 \text{ °C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},e} = 7,61 \text{ °C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 5,00 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity},i} = 30146,2 \text{ °C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity},e} = 21921,5 \text{ °C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 14402,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor konstrukce $R = 0,57 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

Časový úsek 3, prosinec (1. 12. – 31. 12. 2013)

Během tohoto období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,i}} = 8,29 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,e}} = 4,70 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 6,67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity,i}} = 24677,2 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity,e}} = 13984,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 19863,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor konstrukce **$R = 0,54 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$**

Časový úsek 4, leden (1. 1. – 14. 1. 2014)

Během tohoto období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,i}} = 9,13 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,e}} = 5,76 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 5,68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity,i}} = 11844,6 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity,e}} = 7475,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 7368,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor konstrukce **$R = 0,59 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$**

Shrnutí vyhodnocených dat

Tab. 23 Tepelný odpor vybrané vzduchové dutiny konstrukce stěny

Období	Tepelný odpor [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
Říjen	0,59
Listopad	0,57
Prosinec	0,54
Leden	0,59

Během celého měřeného období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,i}} = 10,92 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu

povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,e}} = 8,07 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 5,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity,i}} = 107916,2 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity,e}} = 79739,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 49891,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor vzduchové vrstvy $R = 0,56 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

2.2. KONSTRUKCE STŘECHY

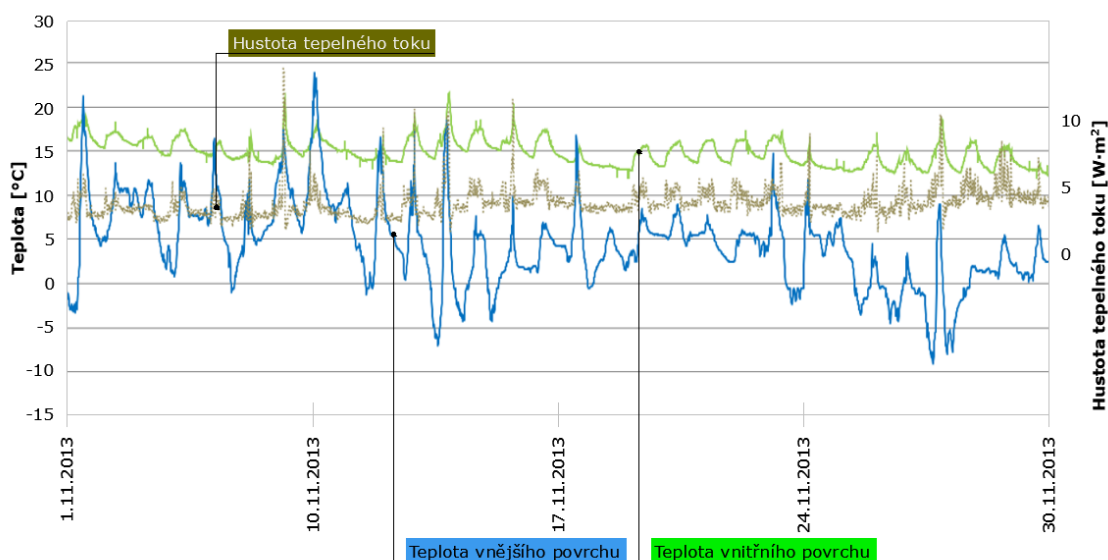
Konstrukce střechy byla podrobena měření nepřetržitě v období 1. 11. 2013 – 14. 1. 2014. Pro vyhodnocení byly řešeny následující časové úseky:

- Časový úsek 1, listopad (1. 11. – 30. 11. 2013);
- časový úsek 2, prosinec (1. 12. – 31. 12. 2013);
- časový úsek 3, leden (1. 1. – 14. 1. 2014);

Důvod rozdělení časového úseku pro vyhodnocení dat je sledování vlivu různých okrajových podmínek na tepelně izolační vlastnosti konstrukce.

2.2.1. Celá konstrukce střechy

Listopad (1. 11. – 30. 11. 2013), střešní konstrukce



Obr. 53 Průběh měření časového úseku 1, listopad (1. 11. – 30. 11. 2013)

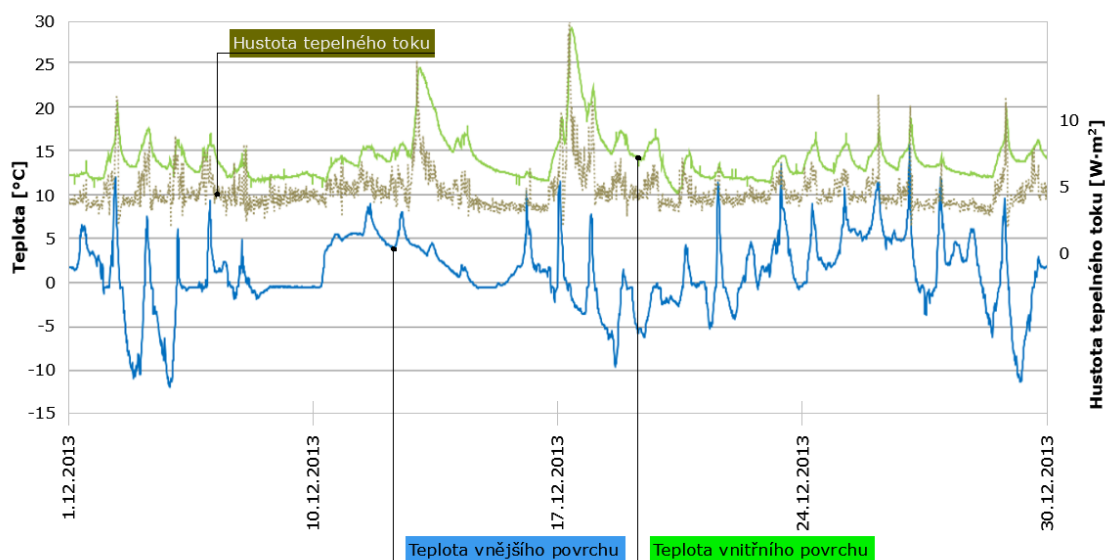
V měsíci listopadu byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu $\theta_{si} = 14,84 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 4,36 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 3,73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 42752,8 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 12567,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 10736,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

Tepelný odpor konstrukce $R = 2,81 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Prosinec (1. 12. – 31. 12. 2014), střešní konstrukce



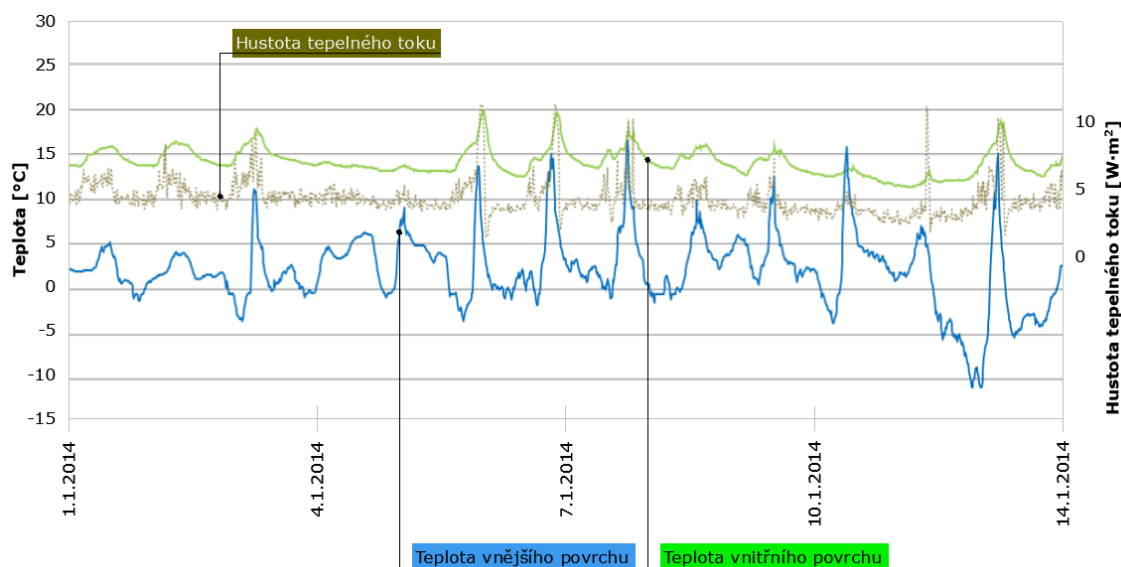
Obr. 54 Průběh měření časového úseku 2, prosinec (1. 12. – 31. 12. 2014)

V prosinci byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu $\theta_{si} = 14,06 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 1,05 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 4,72 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 41832,8 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 3120,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 14046,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

Tepelný odpor konstrukce $R = 2,76 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Leden (1. 1. – 14. 1. 2014), střešní konstrukce

Obr. 55 Průběh měření časového úseku 3, leden (1. 1. – 14. 1. 2014)

V lednu byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu $\theta_{si} = 14,09 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 2,04 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 4,51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 18274,3 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 2640,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 5847,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

Tepelný odpor konstrukce $R = 2,67 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Shrnutí vyhodnocených dat

Na základě výše uvedeného grafu je patrné, že tepelně technické vlastnosti posuzované konstrukce v jednotlivých měsících nevykazují výraznější rozdíly. Toto tvrzení zobrazuje o tabulka s vyhodnocením pro jednotlivé měřené období.

Tab. 24 Tepelný odpor konstrukce střechy jednotlivých úseků

Termín měření	Tepelný odpor [m ² ·K·W ⁻¹]
1. 11. – 30. 11. 2013	2,81
1. 12. – 31. 12. 2013	2,76
1. 1. – 14. 1. 2014	2,67

V průběhu celého měřeného období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu $\theta_{si} = 14,38$ °C a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 2,56$ °C. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 4,28$ W·m⁻².

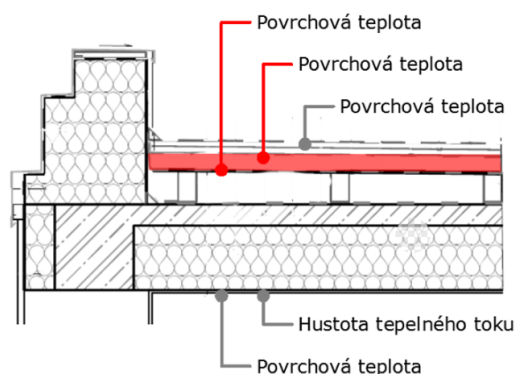
Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 102859,9$ °C a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 18328,9$ °C. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 30630,3$ W·m⁻².

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 2,76$ m²·K·W⁻¹

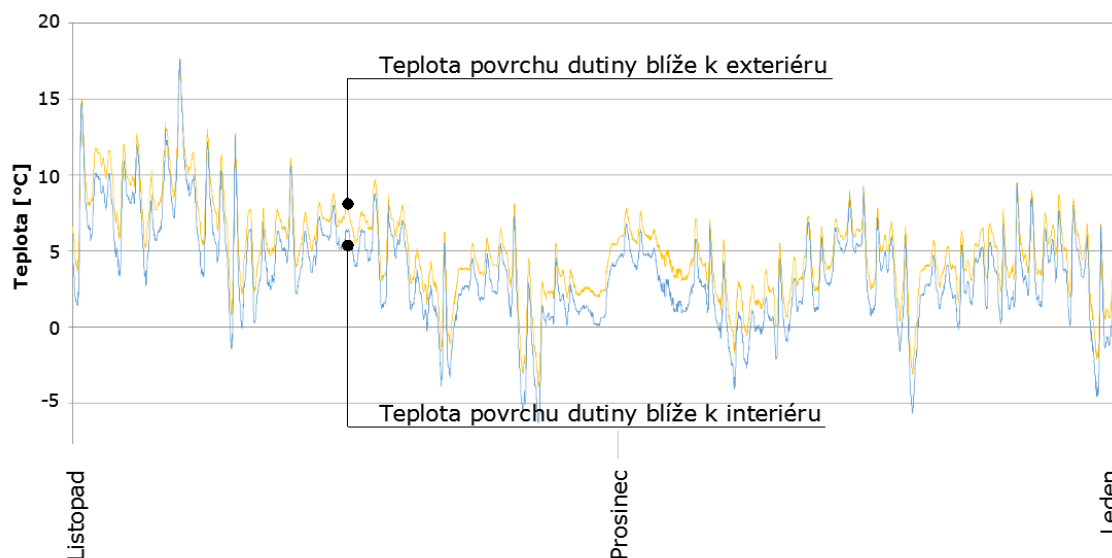
2.2.2. Vzduchová dutina konstrukce střechy

Konstrukce stropu byla podrobena měření nepřetržitě v období 1. 11. 2013 – 14. 1. 2014. Záznam dat z měření probíhalo v patnácti minutovém intervalu. Pro vyhodnocení museli být měřeny následující parametry: povrchová teplota na vnitřní a vnějším povrchu vzduchové dutiny a hustota tepelného toku.



Obr. 56 Vyznačení měřené vzduchové dutiny v konstrukci ploché střechy

Na následujícím grafu je zobrazen průběh teplot ve sledovaném období. Hustota tepelného toku je zobrazena ve grafu průběhu měření celé konstrukce.



Obr. 57 Průběh měření (1. 11. 2013. – 14. 1. 2014)

Časový úsek 1, listopad (1. 11. – 30. 11. 2013)

Během tohoto období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},i} = 10,47 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},e} = 7,61 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 5,00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity},i} = 19809,4 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity},e} = 15506,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 10736,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor konstrukce $R = 0,40 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Časový úsek 2, prosinec (1. 12. – 31. 12. 2013)

Během tohoto období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},i} = 3,59 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity},e} = 2,07 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 4,72 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity},i} = 10686,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny

$\Sigma\theta_{\text{cavity,e}} = 6147 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 14046,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor konstrukce **$R = 0,32 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$**

Časový úsek 3, leden (1. 1. – 14. 1. 2014)

Během tohoto období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,i}} = 4,47 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,e}} = 3,05 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 4,51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity,i}} = 5795,4 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota vnějšího povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity,e}} = 3954,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 5847,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor konstrukce **$R = 0,31 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$**

Shrnutí vyhodnocení jednotlivých úseků

Tab. 25 Tepelný odpor vybrané vzduchové dutiny konstrukce střechy

Období	Tepelný odpor [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
Listopad	0,57
Prosinec	0,54
Leden	0,59

Během celého měřeného období byla naměřena průměrná teplota vnitřního povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,i}} = 5,07 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\theta_{\text{cavity,e}} = 3,58 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 4,28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot teplot vnitřního povrchu vzduchové dutiny byla $\Sigma\theta_{\text{cavity,i}} = 36291,3 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota vnějšího povrchu povrchu vzduchové dutiny $\Sigma\theta_{\text{cavity,e}} = 25608,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 30630,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Tepelný odpor konstrukce **$R = 0,35 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$**

2.3. TEORETICKÉ STANOVENÍ TEPELNĚ IZOLAČNÍCH VLASTNOSTÍ MĚŘENÝCH KONSTRUKCÍ ZA NEUSTÁLENÉHO TEPLOTNÍHO STAVU

Pro stanovení tepelných vlastností výpočtem využijeme metodiku ČSN EN ISO 6946. Hodnoty vstupující do výpočtu byly stanoveny především dle ČSN 730540-3:2005 (Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin).

Emisivita povrchů obklopující vzduchovou vrstvu byla uvažována hodnotou $\varepsilon = 0,16$ (předpokládá se, že emisivita povrchů reflexní parozábrany a reflexního stavebního izolačního pásu bude velmi blízká této hodnotě, viz např. článek [KALÁNEK, 2013]).

Součinitel tepelné vodivosti jádra reflexního stavebního izolačního pásu byl stanoven dle provedeného laboratorního měření (viz kapitola výše).

Stěna – celá konstrukce

Tab. 26 Návrhové hodnoty veličin vstupující do výpočtu, konstrukční uspořádání skladby stěny

#	Název vrstvy	d [m]	λ_u [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	Dřevo měkké	0,0100	0,180
2	Parozábrana s reflexním povrchem	0,0002	0,390
3	Uzavřená vzduchová dutina	0,0460	0,079*
4	Reflexní izolace - lehčený PE	0,0080	0,024
5	Uzavřená vzduchová dutina	0,0800	0,135**
6	Reflexní izolace - lehčený PE	0,0080	0,035
7	Dřevo měkké	0,0100	0,180

* emisivita povrchů obklopující vzduchovou vrstvu: $\varepsilon = 0,16$, průměrná teplota ve vzduchové dutině = 13 °C, rozdíl teplot povrchů dutiny = 2 °C.

** emisivita povrchů obklopující vzduchovou vrstvu: $\varepsilon = 0,16$, průměrná teplota ve vzduchové dutině = 10 °C, rozdíl teplot povrchů dutiny = 2 °C.

Tab. 27 Vypočtený tepelný odpor a součinitel prostupu tepla konstrukce stěny

Tepelný odpor:	1,92 m ² ·K·W ⁻¹	Součinitel prostupu tepla:	0,48 W·m ⁻² ·K ⁻¹
----------------	--	----------------------------	---

Stěna - vzduchová dutina v konstrukci

Návrhové hodnoty veličin vstupující do výpočtu jsou popsány u konstrukčního uspořádání celé konstrukce. Jedná se emisivitu povrchů obklopující vzduchovou vrstvu: $\varepsilon = 0,16$, průměrná teplota ve vzduchové dutině = 10 °C a rozdíl teplot povrchů vzduchové dutiny = 2°C. Tloušťka vzduchové vrstvy je 8 cm.

- Součinitel přestupu prouděním h_a : **1,25 W·m⁻²·K⁻¹**
- Součinitel přestupu sáláním h_r : **0,44 W·m⁻²·K⁻¹**
- Tepelný odpor R : **0,59 m²·K·W⁻¹**
- Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti $\lambda = \mathbf{0,135 W·m^{-1}·K^{-1}}$

Střecha – celá konstrukce

Tab. 28 Návrhové hodnoty veličin vstupující do výpočtu, konstrukční uspořádání skladby ploché střechy

#	Název vrstvy	d [m]	λ_u [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	Omítka štuková	0,002	0,800
2	Výztužná vrstva ETIC	0,005	0,750
3	Stropní konstrukce	0,280	0,225
4	Reflexní izolace	0,0002	0,390
5	Uzavřená vzduchová dutina	0,06	0,146*
6	Reflexní izolace - lehčený PE	0,008	0,024
7	Uzavřená vzduchová dutina	0,04	0,095**
8	Reflexní izolace	0,0002	0,390
9	OSB desky 2x 20	0,04	0,130
10	Tekutá guma	0,004	0,170

* emisivita povrchů obklopující vzduchovou vrstvu: $\varepsilon = 0,16$, průměrná teplota ve vzduchové dutině = 19 °C, rozdíl teplot povrchů dutiny = 1°C.

** emisivita povrchů obklopující vzduchovou vrstvu: $\varepsilon = 0,16$, průměrná teplota ve vzduchové dutině = 6 °C, rozdíl teplot povrchů dutiny = 1°C.

Tab. 29 Vypočtený tepelný odpor a součinitel prostupu tepla konstrukce střechy

Tepelný odpor:	2,75 m ² ·K·W ⁻¹	Součinitel prostupu tepla:	0,35 W·m ⁻² ·K ⁻¹
----------------	--	----------------------------	---

Střecha – vzduchová dutina v konstrukci

Návrhové hodnoty veličin vstupující do výpočtu jsou popsány u konstrukčního uspořádání celé konstrukce. Jedná se emisivitu povrchů obklopující vzduchovou vrstvu: $\varepsilon = 0,16$, průměrná teplota ve vzduchové dutině = 6 °C a rozdíl teplot povrchů vzduchové dutiny = 1°C. Tloušťka vzduchové vrstvy je 4 cm.

- Součinitel přestupu prouděním h_a : **1,95 W·m⁻²·K⁻¹**
- Součinitel přestupu sáláním h_r : **0,43 W·m⁻²·K⁻¹**
- Tepelný odpor R : **0,42 m²·K·W⁻¹**
- Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,98 \text{ W·m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

2.4. ZÁVĚR K EXPERIMENTÁLNÍMU MĚŘENÍ ZA NEUSTÁLENÉHO TEPLOTNÍHO STAVU**2.4.1. Porovnání experimentálně a teoreticky stanovených hodnot****Konstrukce stěny – celá konstrukce**

Tab. 30 Experimentálně a teoreticky stanovené hodnoty tepelného odporu a součinitele prostupu tepla konstrukce stěny

Termín měření	Tepelný odpor R [m ² ·K·W ⁻¹]		Součinitel prostupu tepla U [W·m ⁻² ·K ⁻¹]		Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami	
	„naměřený“	„vypočtený“	„naměřený“	„vypočtený“	R	U
Říjen	1,73	1,923	0,45	0,478	0,193	0,028
Listopad	1,61		0,51		0,313	0,032
Prosinec	1,47		0,55		0,453	0,072
Leden	1,56		0,52		0,363	0,042
Červen	1,81		0,45		0,113	0,028
Červenec	1,25		0,58		0,673	0,102
Srpen	1,56		0,45		0,363	0,028
Září	1,47		0,49		0,453	0,012

Tabulka uvádí jednotlivé naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu a součinitele prostupu tepla. Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami jsou patrné z tabulky, kdy maximální rozdíl činí 0,673 m²·K·W⁻¹ v případě tepelného

odporu. Jedná se o měsíce červenec, u kterého došlo k maximální odchylce i při stanovení součinitele prostupu tepla o $0,102 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. V obou případech byla naměřená hodnota „horší“ než vypočtená.

V průběhu celého měřeného období bylo vyhodnocení naměřených dat následující:

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,52 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Kdy především v případě součinitele prostupu tepla (vypočtená hodnota $U = 0,478 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je rozdíl pouhých $0,022 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Konstrukce stěny – vybraná vzduchová dutina

Tab. 31 Experimentálně a teoreticky stanovené hodnota tepelného odporu vzduchové dutiny uvnitř konstrukce stěny

Termín měření	Tepelný odpor vzduchové dutiny R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]		Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami
	„naměřený“	„vypočtený“	
3. 10. – 31. 10. 2013	0,59	0,59	0
1. 11. – 30. 11. 2013	0,57		0,02
1. 12. – 31. 12. 2013	0,54		0,05
1. 1. – 14. 1. 2014	0,59		0

Tabulka uvádí jednotlivé naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu vybrané vzduchové dutiny. Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami jsou patrné z tabulky, kdy maximální rozdíl činí pouhých $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ v měsíci prosinci a $0,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ v měsíci listopadu.

V průběhu celého měřeného období (3. 10. 2013. – 14. 1. 2014) bylo vyhodnocení naměřených dat následující:

- Tepelný odpor konstrukce $R = 0,56 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

V tomto případě rozdíl činí rozdíl $0,03 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Střecha – celá konstrukce

Tab. 32 Experimentálně a teoreticky stanovená hodnota tepelného odporu konstrukce střechy

Termín měření	Tepelný odpor vzduchové dutiny R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]		Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami
	„naměřený“	„vypočtený“	
1. 11. – 30. 11. 2014	2,81	2,75	0,06
1. 12. – 31. 12. 2014	2,76		0,01
1. 1. – 14. 1. 2015	2,67		0,08

Tabulka uvádí jednotlivé naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu. Jsou patrné rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami z tabulky, kdy maximální rozdíl činí „poměrně“ pouhých $0,08 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ v měsíci lednu a $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ v měsíci listopadu.

V průběhu celého měřené období (1. 11. 2014 – 1. 1. 2015) bylo vyhodnocení naměřených dat následující:

- Tepelný odpor konstrukce $R = 2,76 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

V tomto případě rozdíl činí rozdíl $0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Střecha – vybraná vzduchová dutina v konstrukci

Výše uvedený graf zobrazuje vypočtené a naměřené hodnoty tepelných odporů vybrané vzduchové dutiny. Podrobněji viz následující tabulka.

Tab. 33 Experimentálně a teoreticky stanovené hodnota tepelného odporu vzduchové dutiny uvnitř konstrukce střechy

Termín měření	Tepelný odpor vzduchové dutiny R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]		Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami
	„naměřený“	„vypočtený“	
1. 11. – 30. 11. 2014	0,4	0,42	0,02
1. 12. – 31. 12. 2014	0,32		0,10
1. 1. – 14. 1. 2015	0,31		0,11

Tab. 33 uvádí jednotlivé naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu vybrané vzduchové dutiny. Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami jsou patrné z tabulky, kdy maximální rozdíl činí $0,11 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ v měsíci prosinci lednu.

V průběhu celého měřeného období (1. 11. 2014. – 14. 1. 2015) byl naměřen tepelný odpor konstrukce $R = 0,35 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. V tomto případě rozdíl činí rozdíl $0,07 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

2.4.2. Shrnutí

Z výsledků měření za neustáleného teplotního stavu vyplynulo, že hodnoty získané experimentálně jsou velmi blízké hodnotám, které byly stanoveny teoreticky (výpočtem). Jelikož jednotlivá měření jednotlivých konstrukcí probíhala delší dobu (několik měsíců), bylo prokázáno, že tepelně izolační vlastnosti konstrukcí se v průběhu roku výrazně nelišily. Ve všech případech tepelně izolační vlastnosti reflexních izolací včetně přilehlých vzduchových vrstev korespondují s naměřenými hodnotami tepelných odporů získaných experimentálně za ustáleného teplotního stavu – v laboratorních podmínkách.

F. ZÁVĚRY PRO TECHNICKOU PRAXI

Dobré tepelně izolační vlastnosti ochlazované obálky budovy jsou jedním z předpokladů, že splníme legislativní požadavky na energetickou náročnost budov [Zákon 406/2000 Sb.], [Vyhláška č. 78/2013 Sb.]. Obvyklý způsob, jak toho docílit, je navýšení tloušťky tepelné izolace v konstrukci tak, aby byly splněny požadavky součinitele prostupu tepla [ČSN 73 0540-2, 2011 + Z1:2012]. Tímto způsobem omezujeme přenos tepla vedením. Dále je možné využít tepelně izolačních vlastností kombinace reflexního povrchu se vzduchovou vrstvou. Pro stanovení tepelného odporu konstrukce s reflexní izolací a jí přilehlou vzduchovou vrstvou můžeme použít zjednodušený výpočtový model, experimentální měření v laboratoři nebo v reálných podmínkách.

Prvním cílem této disertační práce bylo stanovení tepelně izolačních vlastností vybraných reflexních izolací. Podrobnějšímu laboratornímu měření byly podrobeny reflexní izolace o shodném materiálu jádra výrobku při různých tloušťkách tak, bylo relevantnější porovnání vybraných charakteristik ovlivňujících tepelně izolační vlastnosti (tloušťka jádra výrobku a teplotní spád). Jedná se o reflexní izolaci s jádrem z extrudovaného - lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie). Dále byla měřena LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií a vícevrstvá / sendvičová reflexní izolace složená z vrstev pěnového polyetylenu a hliníkových folií.

Na základě vyhodnocení naměřených hodnot za ustáleného teplotního stavu, lze konstatovat, že při menších tloušťkách je jádro reflexní izolace více ovlivněno obklopujícím reflexním povrchem, tzn., že dochází k mírnějšímu pohlcení hustoty zářivého toku v této absorbující vrstvě a tím vykazuje lepší ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti. Jev pohlcení zářivého toku v absorbující vrstvě při průchodu elektromagnetického záření prostředím je chápán jako přeměna zářivého toku na tepelný. Pro celkový tepelný odpor zde potom hraje důležitou roli i tloušťka daného výrobku, v našem případě nejširší zkoušený vzorek měl i největší naměřený tepelný odpor, přestože jeho ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti byl nejvyšší. Různý teplotní spád, kterému byly vystaveny jednotlivé zkoušené výrobky, nepoukázal na výraznější změnu jejich tepelně izolačních vlastností.

Dále byly porovnány jednotlivé druhy materiálu, z hlediska jejich tepelně izolačních vlastností. Nejlepších výsledků, nejnižšího ekvivalentního součinitele prostupu tepla, dosáhla LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou

hliníkovou folií. Vyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti měla vícevrstvá, sendvičová reflexní izolace a nejvyšší z měřených výrobků pak reflexní izolace s jádrem z extrudovaného, lehčeného PE. Tento stav se dal předpokládat, vzhledem ke skutečnosti, že bublinková folie obsahuje největší podíl průteplivého materiálu, konkrétně vzduch.

Laboratorní měření publikované v této disertační práci bylo prováděno i v délce několika dnů a jednotlivé povrchové teploty ani hustota tepelného toku nevykazovali monotónně vzestupnou či sestupnou tendenci. To znamená, že v případě průkazní zkoušky součinitele tepelné vodivosti jádra reflexní izolace nemusí být měřící interval výrazně delší, než stanovuje norma, což vyvrátilo tvrzení několika výrobců a dodavatelů reflexních izolací.

Druhým cílem této disertační práce bylo stanovení tepelně izolačních vlastností vzduchových dutin v kontaktu s reflexním povrchem. V rámci jednotlivých experimentálních měření za ustáleného teplotního stavu, bylo mimo tepelně izolačních vlastností jádra reflexní izolace sledovány i tepelně izolační vlastnosti přilehlých vzduchových vrstev. Ve všech případech korespondovali (s minimálními odchylkami) teoreticky stanovené hodnoty s výsledky experimentálního měření. Vyhodnocení provedených měření prokázalo, že tepelné odpory vzduchových vrstev jsou v porovnání s tepelným odporem jádra výrobku reflexní izolace nezanedbatelné. Z tohoto důvodu je pro smysluplné použití reflexní izolace nezbytné zajistit její aplikaci ve stavebních konstrukcích vždy ve spojení se vzduchovou mezerou.

Třetí cíl disertační práce spočíval v porovnání experimentálního měření s algoritmem výpočtového modelu, tj. normativního postupu.

Rozdíly mezi vypočtenými hodnotami tepelných odporů vzduchových vrstev dle ČSN EN ISO 6946 a výsledky laboratorních měření za ustáleného teplotního stavu jsou minimální.

I výsledky měření reálných konstrukcí za neustáleného teplotního stavu jsou velmi blízké hodnotám, které byly stanoveny teoreticky (výpočtem).

Přehled zjištěných závěrů z disertační práce pro technickou praxi:

- Menší tloušťka jádra reflexní izolace téhož materiálu vykazuje lepší tepelně izolační vlastnosti;
- změna teplotního spádu běžných okrajových podmínek má zanedbatelný vliv na změnu tepelně izolačních vlastností reflexních izolací;
- nejnižší hodnotu ekvivalentního součinitele prostupu tepla jádra měřených výrobků (běžných výrobků – materiálů vyskytujících se na našem trhu) má LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií;
- délka provedených laboratorních měření nemá vliv na přesnost výsledků tepelně izolačních vlastností reflexních izolací a přilehlých vzduchových dutin;
- deklarované tepelně izolační vlastnosti reflexních izolací musí být uváděny i s hodnotou emisivity jednotlivých povrchů;
- tepelně izolační vlastnosti reálných konstrukcí se v průběhu roku výrazně neliší;
- tepelné odpory vzduchových vrstev v kontaktu s reflexním povrchem v porovnání s tepelným odporem jádra výrobku reflexní izolace jsou významné;
- tepelně izolační vlastnosti vzduchových vrstev (v kontaktu s reflexním povrchem) měřených za neustáleného teplotního stavu (v reálných podmínkách) i za ustáleného teplotního stavu (v laboratoři) korespondují s metodikou výpočtu vzduchových vrstev dle ČSN EN ISO 6946;
- metodiku výpočtu vzduchových vrstev dle ČSN EN ISO 6946 lze doporučit pro využití v praxi.

G. MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU

Na základě výsledků disertační práce lze konstatovat, že stále je v dané oblasti řada otázek, na které by měly odpovědět další výzkumné práce. Níže uvádím témata pro další vědeckou práci.

Materiál jádra reflexní izolace

Hledání alternativních průteplivých materiálů jádra reflexních izolací. ČSN 730540-3 uvádí mezi průteplivé materiály mj. sklo nebo některé druhy plastů. Následně pak tyto materiály doplněné o reflexní povrch podrobit experimentálnímu měření.

Návrh vhodného konstrukčního uspořádání skladeb

Tato disertační práce byla zaměřená především na stanovení tepelněizolačních vlastností reflexních izolací, respektive jejich vlivu na přilehlou vzduchovou vrstvu. Abychom našli vhodné konstrukční uspořádání skladeb, je vhodné tepelně izolační vlastnosti doplnit o další poznatky jiných oborů, např. akustika, požárně bezpečnostní řešení, tepelná pohoda (letní simulace), vzduchotěsnost, ekonomika apod. S ohledem na možnost reálné aplikace na stavbě.

Řešení konstrukčních detailů

Jednotlivá laboratorní měření včetně následného hodnocení prezentované v této disertační práci byla prováděna za předpokladu jednorozměrného šíření tepla - přenos mezi velkými rovnoběžnými povrchy. V reálných budovách jsou problematická většinou místa, kde jsou tyto jednotlivé plochy spojeny, nebo v horším případě v místech systematických tepelných mostů. Měření a počítačová simulace konstrukčních detailů s aplikovanou reflexní izolací jak v laboratorních, tak reálných podmínkách, napomůže kritické detaily lépe řešit již v průběhu návrhu stavby.

Vliv stárnutí na tepelně izolační vlastnosti reflexních izolací

Vliv emisivity povrchů je pro tento typ izolace zcela zásadní. Povrchy reflexních izolací jsou provedeny z kovů, které i přes ochranu proti oxidaci mohou s postupem času způsobit nárůst emisivity povrchu izolace a tím snížit jejich tepelně izolační vlastnosti. Bylo by tedy vhodné provádět další měření, která by byla zaměřena na změnu účinnosti izolace vlivem stárnutí.

H. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- AIRAH Handbook. Australian Institute of Refrigeration, Air-conditioning and Heating. (2007)
- ASHRAE Handbook of Fundamentals. Design Heat Transmission Coefficients. The American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers is now located in Atlanta, Georgia, USA. (1972)
- BAGOŇA, M.; LOPUŠNIAK, M.; VERTAL, M. Posúdenie vybraných stavebných konštrukcií v stacionárnych aj nestacionárnych teplotných okrajových podmienkach. 121-122. Zborník prednášok z 16. medzinárodnej konferencie *Tepelná ochrana budov 2011 - Aktuálne tepelnotechnické požiadavky a trendy, Thermal protection of buildings 2011*. Vydání první 2011. BB Print, s.r.o. ISBN 978-80-970595-4-5
- Bílek M.: Reflexní izolace: měřením na VUT potvrzena tepelná vodivost λ : 0,003 W/mK!, 7. 10. 2019, dostupné z: <http://www.drevmag.com/cs/materialy/6473-reflexni-izolace-merenim-na-vut-potvrzena-tepelna-vodivost-0-003-w-mk>
- ČERNÝ R.; MICHÁLEK P.; PAVLÍK Z.; TYDLITÁT V. Tepelné a vlhkostní vlastnosti hydrofilních minerálních vln. *Stavební obzor*, 15, 2006, č. 6. s. 183-186. ISSN 1210-4027
- Česká republika. Vyhláška č. 78/2013 Sb., *o energetické náročnosti budov*. Sbírka zákonů ČR, 2013, ve znění pozdějších předpisů.
- Česká republika. ZÁKON 406/2000 Sb., *o hospodaření energií v*. Sbírka zákonů ČR, 2000, ve znění pozdějších předpisů.
- FLUKE. Hodnoty emisivity běžných materiálů. Fluke v České republice [online]. © 1995 - 2012 [cit. 2012-07-14]. Dostupné z: <http://www.fluke.eu/>
- CRAVEN CC and GARBER-SLAGHT R (2010) Product test: reflective insulation in cold climates. Technical Report no. TR 2011-01, 12 April. Fairbanks, AK: Cold Climate Housing Research Center (CCHRC) Dostupné z: www.cchrc.org
- ČSN 72 7012-1. *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Deskové metody. Část 1: Společná ustanovení*. Praha. Český normalizační institut, 1994
- ČSN 72 7012-2. *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 2: Metoda chráněné teplé desky*. Praha. Český normalizační institut, 1994
- ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011 + Z1:2012
- ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- G. Hauser, M. Kersken, A. Schade, H. Sinnesbichler, Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien, *Bauphysik* 33 (11) (2011) 33–42.

- CSTB, Comparative measurements of energy consumption of two cells put in external environment, report CSTB, CSTB, Marne-la-Vallee, 2007
- ČSN EN 15976. Hydroizolační pásy a fólie - Stanovení emisivity. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, meteorologii a státní zkušebnictví. 2011
- ČSN EN 16012. *Tepelná izolace budov – reflexní izolační výrobky – stanovení deklarovaných tepelných vlastností*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012
- ČSN EN 1946-1. *Tepelné chování stavebních výrobků a stavebních dílců - Specifická kritéria pro posuzování laboratorních měření veličin šíření tepla - Část 1: Společná ustanovení*. Praha. Český normalizační institut. 2000
- ČSN EN ISO 6946. *Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda*. Praha. Český normalizační institut, 2008
- ČSN EN ISO 8990:1998 (73 0557) *Tepelná izolace – Stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu – Kalibrovaná a chráněná teplá skříň*. Praha: Vydavatelství Český normalizační institut. 1998
- DICKENSON H. C. a van Dusen M. S.: The testing of thermal insulations. American Society of Refrigerating Engineering, 3/2 (1916), 5-25.
- EBERT H-P., HEMBERGER F., *Intercomparison of thermal conductivity measurements on a calcium silicate insulation material*, International Journal of Thermal Sciences, 50 (2011) 1838-1844
- EC-THERM, s.r.o.: firemní literatura [online]. [cit. 2020-2-18]. Dostupné z: <http://www.ec-therm.eu/>
- EPBD I - Směrnice evropského parlamentu a rady 2002/91/ES ze dne 16. prosince 2002 o energetické náročnosti budov. 2002, Úřední věstník Evropské unie L 001
- EPBD II - Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepřevzatí). 2010, Úřední věstník Evropské unie L 153/13.
- EPBD III - Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2010/31/EU o energetické náročnosti budov a směrnice 2012/27/EU o energetické účinnosti. 2018, Úřední věstník Evropské unie L 156/75.
- FICKER, T. *Stavební tepelná technika-akustika a denní osvětlení*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004. 266 s. ISBN 80-214-2670-5.
- FRICKER, J. M. – YARBROUGH, D.: Review of reflective insulation estimation methods. [Proceedings], 12th Conference of International Building Performance Simulation Association in Sydney, 2011, 1989-1996.

- FLIMEL, M. Riziká pri určovaní súčiniteľa prechodu tepla stavebných konštrukcií budov s dôrazom na aplikáciu metódy merania tepelného toku. 137-140. Zborník prednášok z 16. medzinárodnej konferencie Tepelná ochrana budov 2011 - Aktuálne tepelnotechnické požiadavky a trendy, Thermal protection of buildings 2011. Vydání první 2011. BB Print, s.r.o. ISBN 978-80-970595-4-5.
- FRANCŮ, J. a SVANSTEDT, N.: Some remarks on two-scale convergence and periodic unfolding. *Applications of Mathematics*, 57 (2012), 359-375.
- HALAHYJA, M. Stavebná tepelná technika akustika a osvetlenie. Bratislava ALFA, 1986.
- HAMEURY J., HAY B., FILT J.: Measurement of total hemispherical emissivity using a calorimetric technique, *Int. J. Thermophys.*: Vol. 28, pp.1607–1620, 2007
- Hejhálek, J.: Oboustranný stavební izolační pás RTI Haasová-Menhart® s více vrstvami, 24. 2. 2012, <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/oboustranny-stavebni-izolacni-pas-rti-haasova-menhart-s-vice-vrstvami>
- Hejhálek, J.: Podlahová fólie Sunflex Floor s izolační deskou EPS – výsledky měření, *Stavebnictví a interiér* č. 9/2011, str. 57, www.stavebnictvi3000.cz/c3983.
- HOLLANDS K.G.T.: Thermal Radiation Fundamentals, ISBN:1-56700-203-X, 2004
- HOTTEL H. C., SAROFIM A. F.: Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, 1967
- ISO 9869. Thermal insulation - building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, 1994.
- KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M., Stanovení tepelného odporu reflexních izolací laboratorním měřením, příspěvek na konferenci *Sborník anotací konference Juniorstav 2013*, ISBN 978-80-214-4669-4, Brno, 2013
- KIRCHHOFF, G. Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. In: *Annalen der Physik*. Volume 185, Issue 2. 1860. Dostupné z <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18601850205/pdf>
- LABC Technical Guidance Note: Use of multi-foil insulation products, compliance with regulation 7 and requirement L1, Duben 2008, Ref. No. 06/001 Revision c.
- Lindauer E., Sinnesbichler H., Field Tests Regarding the Thermal and Energy Performance of an ACTIS Roof Insulation System Compared to Conventional Mineral-fibre Insulation Materials, Brief Progress Report Part D, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, 2007.
- LÓPEZ G. BASTERRA L.A., ACUNA L. CASADO M.: Determination of the emissivity of wood for inspection by infrared thermography. *Nondestruct Eval.* 2013, č. 32.

- NASH G. D. , COMRIE J., BROUGHTON H. F., The thermal insulations of buildings: Design Data and How to use Them, Her majesty's Stationery Office, London, 1955
- NPL Report Mat 8: Evaluation of the thermal performance of insulation systems used in roof structures, Prosinec 2007.
- OTSUKA A: A survey of hemispherical total emissivity of the refractory metals in practical use, Energy: Vol. 30, pp.535–543, 2005
- PASTORY Z., PERALTA P.N., I. PESZLEN, Multi-layer heat insulation system for frame construction buildings, Energy and Buildings 43 (2011) 713–717.
- PAVELEK, 2007, M. Vizualizační a optické měřicí metody [online]. 2007 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/Pavelek,2007/optika/>
- PETŘÍČEK, Tomáš, Petr KACÁLEK a Radim SMOLKA. SKLADBY ŠIKMÉ STŘECHY A VHODNÁ APLIKACE TEPELNÉ IZOLACE. In: Brno, 2011, s. 5. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/1.2/Petricek_Tomas_CL.pdf
- RAUCHFUSSOVÁ, K. a S. ŠŤASTNÍK. Tepelněizolační vlastnosti bublinových termoreflexních izolací. iMateriály [online]. Brno, 2017, 17.10.2017 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/tepelneizolacni-vlastnostibublinovych-termoreflexnich-izolaci_45153.html
- RAUCHFUSSOVÁ, K. Studium užitných vlastností tepelně-reflexních izolací pro stavebnictví. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
- Reflective Insulation, Radiant Barriers And Radiation Control Coatings. In: [online]. RIMA International, 2002 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.rimainternational.org/pdf/handbook.pdf>
- Remeš M.: Vícevrstvé reflexní izolace, 23. 4. 2010, Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zatepleni/vicestvrstve-reflexni-izolace>
- ROBINSON H. E., COSGROVE L., POWELL F. J., The Thermal Resistance of Airspaces and Fibrous Insulations Bounded by Reflective Airspaces, Building Materials and Structures Report 151, U.S. National Bureau of Standards. (1957)
- ROBINSON H. E., POWELL F. J., The Thermal Insulating Value of Airspaces, Housing Research Paper No. 32, National Bureau of Standards Project ME-12, U.S. Government Printing Office, Washington, DC. (1954)
- SALMON D., Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and source of reference materials, Measurement Science and Technology, 12 (2001) 89-98.
- SAZIMA M. a kol.: Sdílení tepla, SNTL, 1. Vydání, 1. Část, ISBN 80-85341-42-5,1993

- SIAU, John F. Transport Processes in Wood. Berlin: Springer-Verlag, 1984. ISBN 978-3-642-69215-4.
- SIEGEL R., HOWELL J. R.: Thermal Radiation Heat Transfer, 4th Ed., Taylor & Francis, ISBN:1560328398, 2001
- ŠIMONÍK, J. *Fyzika – termika*. 3. vydání. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1. 1977. 82p.
- SPRAT, T. The History of the Royal-Society of London: for the Improving of Natural Knowledge. London: HardPress Publishing, 2012, 472 s. ISBN 978-1290376686.
- ŠŤASTNÍK S., HOLLAN J, STEUER R. Možnosti určení emisivity materiálů pomocí infračervené termografie. Amper [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://amper.ped.muni.cz/LW-infrared/omitky06.pdf>
- ŠŤASTNÍK, S. a J. VALA. K možnostem identifikace tepelných vlastností reflexních izolací se vzduchovými bublinami. STAVEBNÍ OBZOR 06/2013 [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.stavebniobzor.cz/clanek/k-moznostem-identifikace-tepelnych-vlastnosti-reflexnich-izolaci-se-vzduchovymi-bublinami/>
- TENPIERIK, M.J. a E. HASSELAAR. Reflective multi-foil insulations for buildings: A review. Energy and Buildings [online]. 2. 10. 2012, 233-243 [cit. 2020-2-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005129>
- TIPPNER, E. TROPPOVÁ, R. HRČKA, P. HALACHAN, R. LAGAŇA, V. SEBERA, M. TRCALA, Probabilistic Numerical Analysis of Quasi-stationary Thermal Measurement of Medium Density Fiberboard. 57th SWST International convention, 7th Wood structure and properties conference, 6th European hardwood conference, (2014) 878-886.
- VACÍKOVÁ. P.. Měření spektrální emisivity vysokoteplotních povlaků. Plzeň, 2013. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta aplikovaných věd. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.
- W. P. GOSS, R. G. MILLER, Literature Review of Measurement and predictions of Reflective Building Insulation Performance: 1900 - 1989, ASHRAE Transactions 1995. (1989) 651-664.
- YÜCEL, K a BASYIGIT, C a OZEL, C. (2003). Thermal insulation properties of expanded polystyrene as construction and insulating materials.
- ZHOU J., ZHOU H., HU C., HU S., *Measurement of thermal and dielectric properties of medium density fiberboard with different moisture contents*, BioResources, 8 (2013) 4185-4192.

I. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	pohltivost, tj. podíl pohlceného sálání a dopadajícího sálání [-]
A	plocha vzorku [m^2]
c	rychlost šíření elektromagnetického záření v daném prostředí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
c_0	rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
d	tloušťka vzorku [m]
E	intenzita vyzařování reálného tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
E	součinitel vzájemného sálání
E_0	je intenzita vyzařování černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
E_1	hustota zářivého toku před absorbující vrstvou [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
EU	Evropská Unie
f	je frekvence elektromagnetického záření [Hz] nebo [s^{-1}]
FAST	Fakulta stavební
$grad T$	teplotní gradient [$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$]
h_a	součinitel přestupu tepla vedením a prouděním [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
h_r	součinitel přestupu tepla sáláním [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
h_{r0}	je součinitel přestupu tepla sálání černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I	intenzita vyzařování šedého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I_0	je intenzita vyzařování černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
n	index lomu prostředí [-]
PE	Polyetylen
q	je hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Q	je celková energie (množství tepla) dopadající na těleso [W]
Q	tepelný tok [W]
q	hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Q_A	pohlcená energie tělesem [W]
q_k	je hustota tepelného toku při proudění [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Q_R	odražená energie [W]
Q_T	procházející energie [W]
R	odrazivost, tj. podíl odraženého sálání a dopadajícího sálání [-]
R	je tepelný odpor konstrukce [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]

R_g	je tepelný odpor vzduchové vrstvy [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
R_s	je tepelný odpor při přestupu tepla [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
T	propustnost, tj. podíl propuštěného sálání a dopadajícího sálání [-]
T	termodynamická teplota [K]
$T_1 - T_2$	termodynamický povrchový rozdíl vzorku [K]
$T_{1,2}$	střední termodynamická teplota povrchu a jeho okolí [K]
T_e	teplota prostředí exteriéru [K]
T_i	teplota prostředí interiéru [K]
tl.	tloušťka [m]
T_m	střední termodynamická teplota povrchu a jeho okolí [K]
T_{si}	vnitřní povrchová teplota [K]
U	součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
VUT	Vysoké učení technické
z	vzdálenost [m]
α_k	součinitel přestupu tepla při proudění [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
β	součinitel pohltivosti [m^{-1}]
ε	emisivita tělesa [-]
θ_i	teplota vzduchu [$^{\circ}C$]
θ_{si}	teplota povrchu konstrukce [$^{\circ}C$]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ	vlnová délka elektromagnetického záření [m]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

J. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma rozdělení sálavé energie dopadající na povrch tělesa [autor]	13
Obr. 2 Spektrum elektromagnetického záření [autor podle Pavelek, 2007]	14
Obr. 3 Planckův zákon vyzařování černého tělesa a Wienův posunovací zákon v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření [Pavelek, 2007]	15
Obr. 4 Stefan–Boltzmannův zákon v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření [Pavelek, 2007]	16
Obr. 5 Závislosti spektrální hustoty zářivého toku různých zdrojů záření na vlnové délce záření [Pavelek, 2007]	17
Obr. 6 Závislosti spektrální hustoty zářivého toku různých zdrojů záření na vlnové délce záření [ČSN EN 15976, 2011]	19
Obr. 7 Schéma složení reflexní izolace [autor, dle ČSN EN 16012]	20
Obr. 8 Typický příklad reflexní izolace typu 1, jádro z pěnového polyetylénu [autor]	21
Obr. 9 Reflexní izolace typu 2 [autor dle ČSN EN 16012, 2012]	21
Obr. 10 Typický příklad reflexní izolace typu 1, bublinková folie [autor]	21
Obr. 11 Reflexní izolace typu 3 [ČSN EN 16012, 2012]	22
Obr. 12 Vývojový diagram pro rozhodování při určení typů výrobků [autor dle ČSN EN 16012, 2012]	22
Obr. 13 Výběr zkušebních metod pro výrobek typu 1 při použití metody teplé desky [autor, dle ČSN EN 16012, 2012]	24
Obr. 14 Typický zkušební prvek použitý k měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny [ČSN EN 16012, 2012]	24
Obr. 15 Schéma jedno-vzorkového zkušebního zařízení chráněné teplé desky [Autor, dle ČSN EN 72 7012-2, 1994]	26
Obr. 16 Náhradní elektrické schéma tepelného odporu vzduchové vrstvy [autor]	29
Obr. 17 Schéma výměny vyzářeného tepla mezi dvěma plochami [autor]	30
Obr. 18 Pohled na chladičí box [archiv autora] (nahrazení zařízení s kalibrovanou teplou skříní dle ČSN EN ISO 8990)	34

Obr. 19 Schéma nahrazení zkušebního zařízení s kalibrovanou teplou skříní [autor]	36
Obr. 20 Schéma typického zkušební prvku pro měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny metodou teplé skříně [autor dle ČSN EN 16012]	37
Obr. 21 Ukázka z realizace typického zkušebního prvku pro měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny [autor]	37
Obr. 22 Vytvořený typický zkušební prvek použitý k měření tepelného odporu izolované vzduchové dutiny [autor]	38
Obr. 23 Pohledy na budovu mateřské školy v obci Dříteč [autor]	39
Obr. 24 Schématický řez mateřské školy s vyznačením měřených konstrukcí [autor, dokumentace Zlatý dům daparts s.r.o.]	39
Obr. 25 Půdorysné schéma mateřské školy s vyznačením měřených konstrukcí [autor, dokumentace Zlatý dům daparts s.r.o.]]	40
Obr. 26 Pohled na měřenou konstrukci	40
Obr. 27 Řez měřené konstrukce, včetně konstrukčního uspořádání [autor]	41
Obr. 28 Schéma rozmístění měřících čidel [autor]	41
Obr. 29 Pohled na konstrukci - osazení čidel, z interiérové a exteriérové strany [autor]	42
Obr. 30 Pohled na měřenou konstrukci – plochá střecha [autor]	42
Obr. 31 Řez měřené konstrukce, včetně konstrukčního uspořádání [autor]	43
Obr. 32 Schéma rozmístění měřících čidel [autor]	43
Obr. 33 Aplikace měřících čidel, pohled na měřící ústředny [autor]	44
Obr. 34 Pohled na konstrukci - osazení čidel, z exteriérové a interiérové strany [autor]	44
Obr. 35 Pohled na zkušební prvek včetně měřeného vzorku [archiv autora]	48
Obr. 36 Pohled na měřící ústřednu - datalogger univerzální ALMEMO 2890-9 a osazení měřícího čidla - snímače tepelného toku a povrchové teploty [archiv autora]	48
Obr. 37 Průběh laboratorního měření vzorku tl. 8 mm při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K	48

Obr. 38 Schéma rozmístění čidel a průměrné naměřené hodnoty, vzorku tl. 8 mm, při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K	49
Obr. 39 Vyhodnocení laboratorního měření vzorku tl. 8 mm při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K	49
Obr. 40 Názorné schéma celkové izolované vzduchové dutiny	51
Obr. 41 Názorné schéma sledovaných dílčích vzduchových dutin	52
Obr. 42 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu „chladnější“ vzduchové dutiny pro jednotlivá měření	53
Obr. 43 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu „chladnější“ vzduchové dutiny pro jednotlivá měření	54
Obr. 44 Názorné schéma jádra vzorku reflexní izolace	55
Obr. 45 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu jádra výrobku	55
Obr. 46 Naměřené a vypočtené hodnoty součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku	56
Obr. 47 Foto měřeného vzorku [autor]	57
Obr. 48 Foto měřeného vzorku [autor]	59
Obr. 49 Průběh měření časového úseku 1, říjen (3. 10. – 31. 10. 2013)	67
Obr. 50 Grafické znázornění vyhodnocení jednotlivých měsíců	68
Obr. 51 Vyznačení měřené vzduchové dutiny v konstrukci, včetně schématického znázornění osazení čidel povrchových teplot	69
Obr. 52 Průběh měření vzduchové dutiny stěny (3. 10. 2013. – 14. 1. 2014)	70
Obr. 53 Průběh měření časového úseku 1, listopad (1. 11. – 30. 11. 2014)	72
Obr. 54 Průběh měření časového úseku 2, prosinec (1. 12. – 31. 12. 2014)	73
Obr. 55 Průběh měření časového úseku 3, leden (1. 1. – 14. 1. 2014)	74
Obr. 56 Vyznačení měřené vzduchové dutiny v konstrukci ploché střechy	75
Obr. 57 Průběh měření (1. 11. 2013. – 14. 1. 2014)	76

K. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hodnoty emisivity vybraných reflexních materiálů [Fluke, 2012]	19
Tab. 2 Vyhodnocení laboratorního měření vzorku tl. 8 mm při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K, ve smyslu ČSN EN 16012	50
Tab. 3 Vyhodnocení laboratorního měření vzorku tl. 8 mm, při teplotním spádu celkové izolované vzduchové dutiny ~ 21 K měřičem tepelného toku, bez doplňujících výpočtů tepelných odporů vzduchových dutin	50
Tab. 4 Naměřené hodnoty tepelného odporu celkové izolované vzduchové dutiny pro jednotlivá měření	52
Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu jednotlivých vzduchových dutin pro jednotlivá měření.....	54
Tab. 6 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku	56
Tab. 7 Hodnoty ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku pro vybrané tloušťky reflexní izolace typu 1	57
Tab. 8 Hodnoty ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku pro vybrané tloušťky reflexní izolace [Hejhálek, 2012]	58
Tab. 9 Naměřené hodnoty tepelného odporu celkové izolované vzduchové dutiny	58
Tab. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu dílčích vzduchových dutin.....	58
Tab. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku	59
Tab. 12 Hodnota tepelného odporu jádra výrobku	60
Tab. 13 Hodnota ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku.....	60
Tab. 14 Naměřené hodnoty tepelného odporu celkové izolované vzduchové dutiny	61
Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu jednotlivých vzduchových dutin	61
Tab. 16 Naměřené a vypočtené hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku	61
Tab. 17 Hodnoty tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku vybraných reflexních izolací.....	63

Tab. 18 Vztah mezi tepelněizolačními vlastnostmi vzduchové dutiny a počtem vložených reflexních izolací [Pastory et. al., 2011].....	64
Tab. 19 Porovnání ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku tvořeného vzduchovou dutinou nebo polyetylenem	64
Tab. 20 Porovnání ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku tvořeného vzduchovou dutinou nebo polyetylenem	64
Tab. 21 Porovnání ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti jádra výrobku tvořeného vzduchovou dutinou nebo polyetylenem	65
Tab. 22 Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla jednotlivých úseků	68
Tab. 23 Tepelný odpor vybrané vzduchové dutiny konstrukce stěny	71
Tab. 24 Tepelný odpor konstrukce střechy jednotlivých úseků	75
Tab. 25 Tepelný odpor vybrané vzduchové dutiny konstrukce střechy	77
Tab. 26 Návrhové hodnoty veličin vstupující do výpočtu, konstrukční uspořádání skladby stěny.....	78
Tab. 27 Vypočtený tepelný odpor a součinitel prostupu tepla konstrukce stěny	78
Tab. 28 Návrhové hodnoty veličin vstupující do výpočtu, konstrukční uspořádání skladby ploché střechy.....	79
Tab. 29 Vypočtený tepelný odpor a součinitel prostupu tepla konstrukce střechy	79
Tab. 30 Experimentálně a teoreticky stanovené hodnoty tepelného odporu a součinitele prostupů tepla konstrukce stěny.....	80
Tab. 31 Experimentálně a teoreticky stanovené hodnota tepelného odporu vzduchové dutiny uvnitř konstrukce stěny.....	81
Tab. 32 Experimentálně a teoreticky stanovená hodnota tepelného odporu konstrukce střechy.....	82
Tab. 33 Experimentálně a teoreticky stanovené hodnota tepelného odporu vzduchové dutiny uvnitř konstrukce střechy.....	82

L. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

Články zahrnuté v databázi SCOPUS

- **KALÁNEK, J.; ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.** Compare of Experimental and Numerical Evaluation of Structure with Application of Reflective Insulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, roč. 2016, č. 824, s. 34-42. ISSN: 1662-7482.
- **KALÁNEK, J; ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.:** Evaluation of the Thermal Resistance of Structure with Reflective Insulation: Measurement under Non-Stationary Boundary Conditions. *AMR - Advanced Materials Research*, 2014, roč. 1041, č. 1041, s. 150-153. ISSN: 1662- 8985.
- **KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.; ŠTEFFEK, L.** Calculation and Experimental Evaluation of the Thermal Resistance of a Structure with Reflective Insulation. *Advanced Materials Research*, 2014, roč. 899, č. 2, s. 374-380. ISSN: 1022- 6680.
- **ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.; KALÁNEK, J.** Simulation of Summer Thermal Stability of the Room and its comparison with the Real Measurement. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, roč. 2016, č. 824, s. 536-543. ISSN: 1662-7482.
- **ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.; KALÁNEK, J.** Analysis and Quantification of the Influence of Thermal Properties of Building Envelope on the Energy Balance. *AMR - Advanced Materials Research*, 2014, roč. 1041, č. 1041, s. 146-149. ISSN: 1662- 8985.
- **ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.; KALÁNEK, J.; JELÍNEK, P.** The Impact of the Choice of Computational Methods on the Results of Simulations of Specific Heat Consumption for Heating a Family House. *Advanced Materials Research*, 2014, roč. 2014, č. 899, s. 161-165. ISSN: 1022- 6680.

Články v českých recenzovaných časopisech

- **KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.; ŠTEFFEK, L.** Způsoby stanovení tepelně izolačních vlastností konstrukcí s reflexní izolací a možnosti využití výsledků ve stavební praxi. *Tepelná ochrana budov*, 2016, roč. 19, č. 4, s. 47-51. ISSN: 1213-0907.
- **ŠTEFFEK, L.; KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.** Srovnání výsledků energetických simulací budovy s reálným provozem. *Tepelná ochrana budov*, 2015, roč. 18, č. 5, s. 14-17. ISSN: 1213-0907.

Články v ostatních časopisech a sbornících

- **KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.**, Ekvivalentní součinitel prostupu tepla konstrukce s reflexní izolací, příspěvek na konferenci *Buildings and Environment 2012 Proceedings*, ISBN 978-80-214-4505-5, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2012
- **KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.**, Stanovení tepelného odporu reflexních izolací laboratorním měřením, příspěvek na konferenci *Sborník anotací konference Juniorstav 2013*, ISBN 978-80-214-4669-4, Brno, 2013
- **KALÁNEK, J.; ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.** Emisivita a její vliv na stanovení deklarovaných tepelných vlastností reflexních izolací laboratorním měřením - metodou teplé skříně. In *Sborník Juniorstav 2015*. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. - (- s.) ISBN: 978-80-214-5091- 2.
- **KALÁNEK, J.; ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.**, Porovnání tepelného odporu reflexní izolace s různou tloušťkou jádra při rozdílném teplotním spádu, příspěvek na konferenci *Sborník anotací Juniorstav 2014*, ISBN 978-80-214-4851-3, 2014
- **KALÁNEK, J.; ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.**, Způsoby stanovení koeficientu emisivity reflexní izolace a jeho vliv na tepelný odpor., příspěvek na konferenci *Stavební fyzika v pozemním stavitelství: teorie a praxe*, ISBN 978-80-214-4926-8, 2014

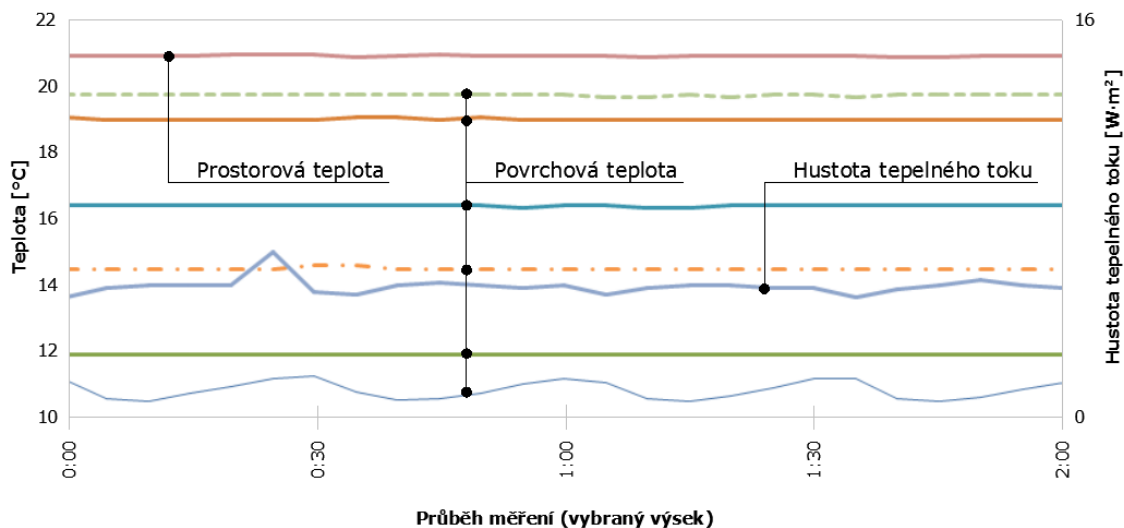
- **ŠTEFFEK, L.; KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.** BYTOVÉ VĚTRÁNÍ A KONCENTRACE CO₂. In *Sborník Juniorstav 2015*. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. - (- s.)ISBN: 978-80-214-5091- 2.
- **ŠTEFFEK, L.; KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.**, Porovnání tepelného odporu vzduchové vrstvy z různou tloušťkou při rozdílném teplotním spádu, příspěvek na konferenci *Sborník anotací Juniorstav 2014*, ISBN 978-80-214-4851-3, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2014
- **ŠTEFFEK, L.; KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.**, Vliv parametrů okenních výplní pro dosažení energeticky pasivního standardu domu, příspěvek na konferenci *Sborník anotací Juniorstav 2014*, ISBN 978-80-214-4851-3, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2014
- **ŠTEFFEK, L.; KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.**, Volba vhodného zasklení a sledování vlivu jeho parametrů, příspěvek na konferenci *Sborník z konference - Stavební fyzika v pozemním stavitelství: Teorie a praxe*, ISBN 978-80-214-4926-8, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2014
- **ŠTEFFEK, L.; OSTRÝ, M.; KALÁNEK, J.**, Effects of Glazing on the Specific Heat Demand of a Passive House, , OÖ Energiesparverband, Wels, Austria, 2014
- **VLACH, F.; KALÁNEK, J.**, Vnější omítky v současné stavební praxi, článek v *ERA 21*, ISSN 1801-089X, ERA Média s.r.o., Praha, 2013
- **JELÍNEK, P.; ŠTEFFEK, L.; KALÁNEK, J.; OSTRÝ, M.; SEDLÁK, J.**, Hodnocení energetické náročnosti a vnitřního mikroklimatu kruhového domu v Rapoticích, příspěvek na konferenci *Sborník 36. mezinárodní vědecká konference kateder a ústavů pozemního stavitelství*, ISBN 978-80-214-4536-9, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Brno, 2012

M. PŘÍLOHY

1. USTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Reflexní izolace s jádrem z lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie) - Měření 1b - tl. 8 mm

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 7 K



Obr. Průběh laboratorního měření

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,28 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,48 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,33 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	8 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,024 W·K⁻¹·m⁻¹

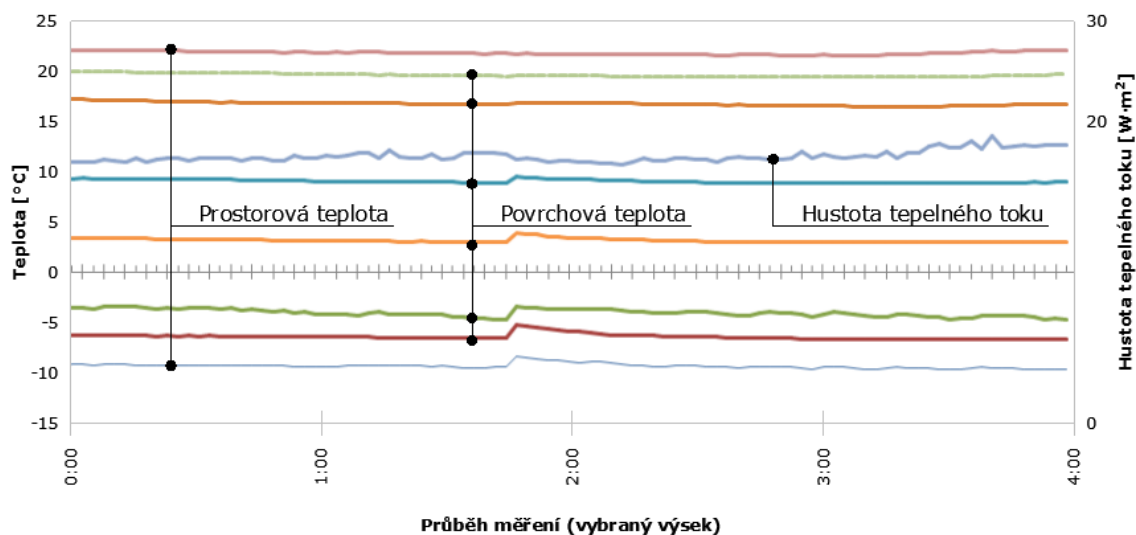
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,470 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,470 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,35 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,023 W·K⁻¹·m⁻¹

Měření 1b – 10 mm

Reflexní izolace s jádrem z lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie) tl. 10 mm.

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 21 K



Obr. Průběh laboratorního měření

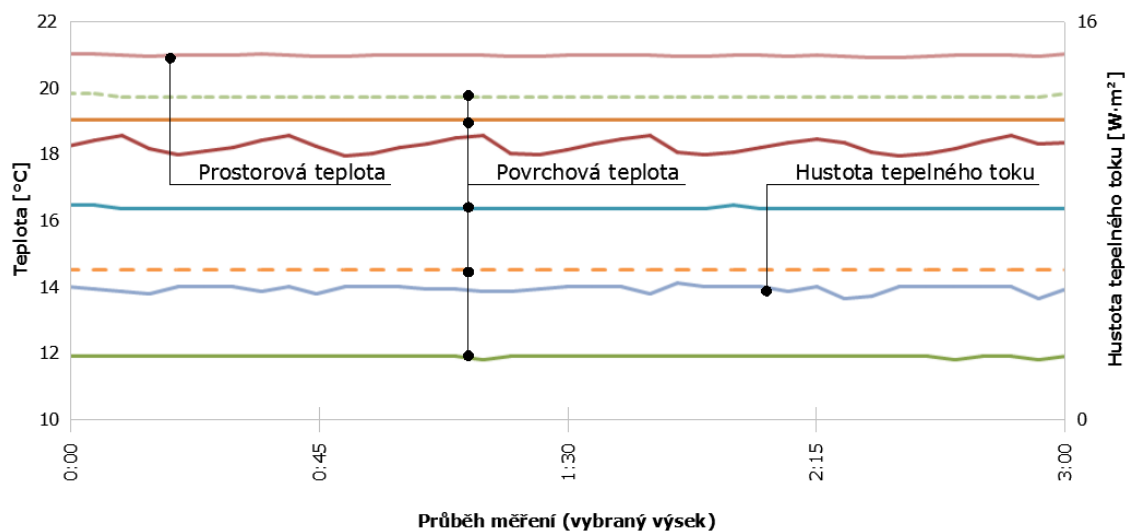
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,26 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,44 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,35 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	10 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,029 W·K⁻¹·m⁻¹

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,468 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,436 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,36 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,028 W·K⁻¹·m⁻¹

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 7 K



Obr. Průběh laboratorního měření

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,29 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,48 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,35 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	10 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,029 W·K⁻¹·m⁻¹

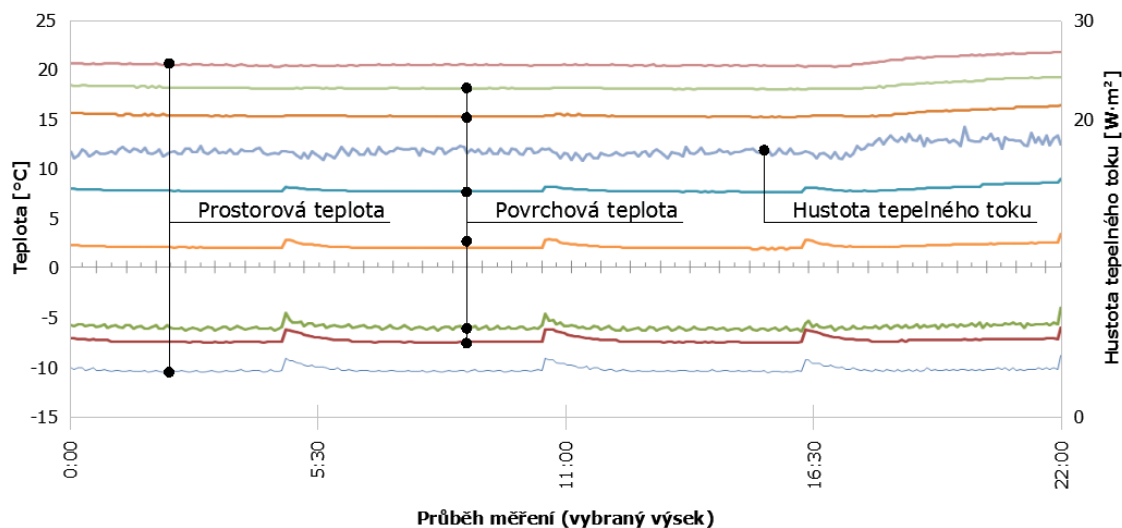
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,29 m ² ·K·W ⁻¹
Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,474 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,485 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,33 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,030 W·K⁻¹·m⁻¹

Měření 1c – 12 mm

Reflexní izolace s jádrem z lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie) tl. 12 mm.

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 21 K



Obr. Průběh laboratorního měření

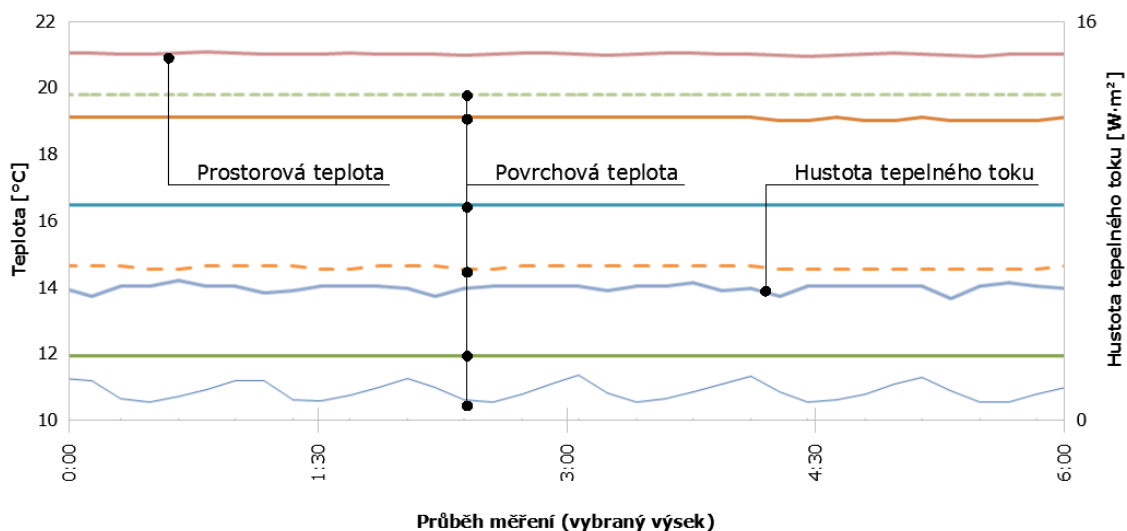
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,27 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,45 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,35 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	12 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,035 W·K⁻¹·m⁻¹

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,482 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,453 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,34 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,035 W·K⁻¹·m⁻¹

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 7 K



Obr. Průběh laboratorního měření

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,30 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,48 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,35 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	12 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,034 W·K⁻¹·m⁻¹

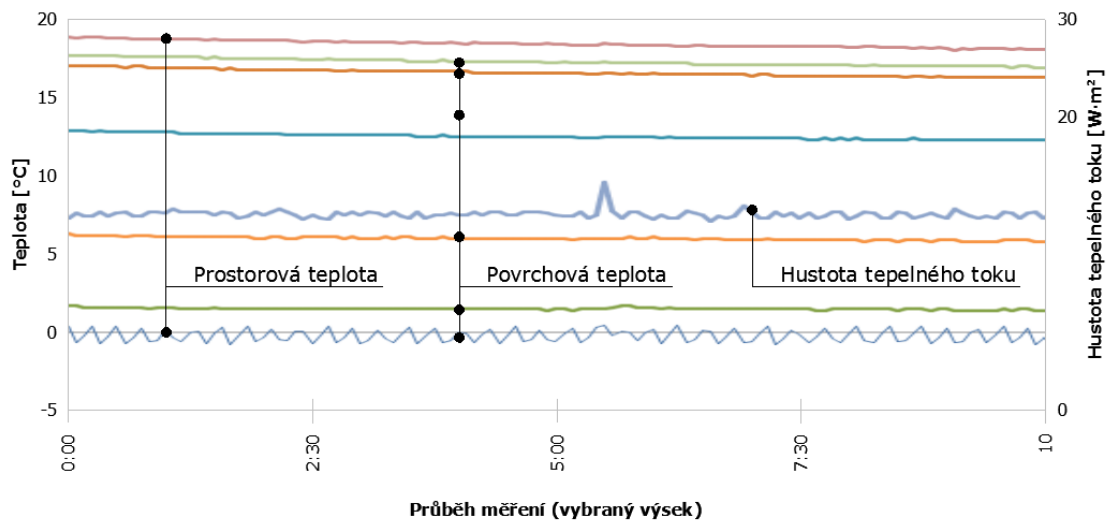
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,480 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,481 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,34 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,035 W·K⁻¹·m⁻¹

Měření 1d

Reflexní izolace s jádrem z lehčeného PE s oboustranným reflexním povrchem (metalizovaná folie) tl. 30 mm.

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 15 K



Obr. Průběh laboratorního měření

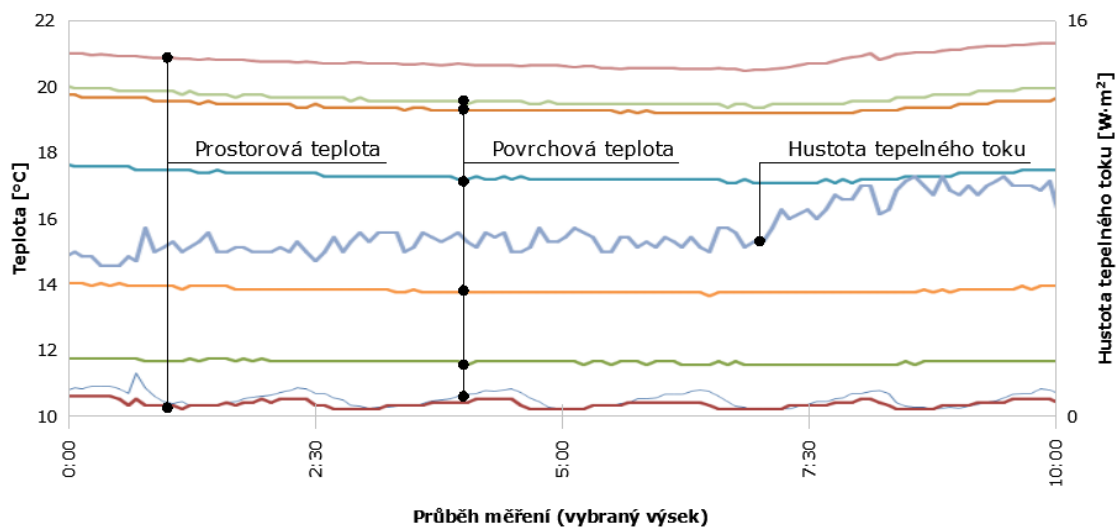
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,79 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,51 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,49 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,80 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	30 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,038 W·K⁻¹·m⁻¹

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,532 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,488 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,77 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,039 W·K⁻¹·m⁻¹

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 9 K



Obr. Průběh laboratorního měření

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

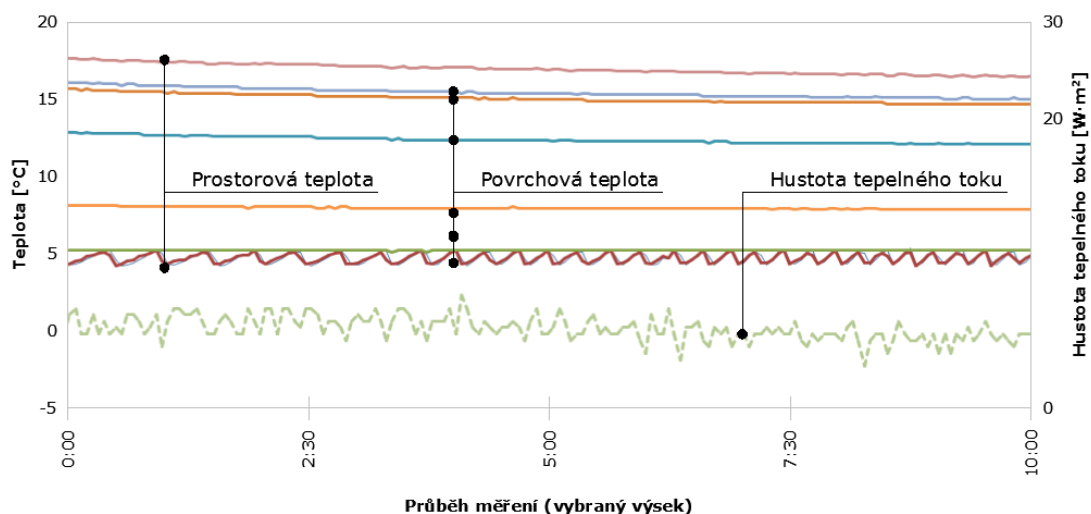
Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,74 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,48 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,79 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	30 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,038 W·K⁻¹·m⁻¹

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,509 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,465 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,77 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,039 W·K⁻¹·m⁻¹

LDPE bublinkové fólie s oboustranně natavenou metalickou hliníkovou folií

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 10 K



Obr. Průběh laboratorního měření

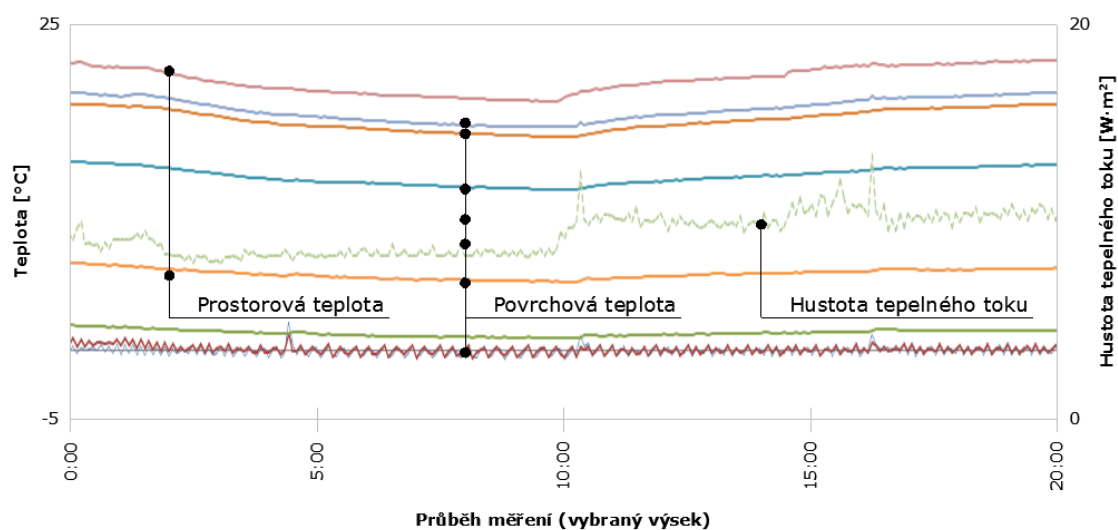
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,84 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,48 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,89 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	15 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,017 W·K⁻¹·m⁻¹

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,513 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,502 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,83 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,018 W·K⁻¹·m⁻¹

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 16 K



Obr. Průběh laboratorního měření

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

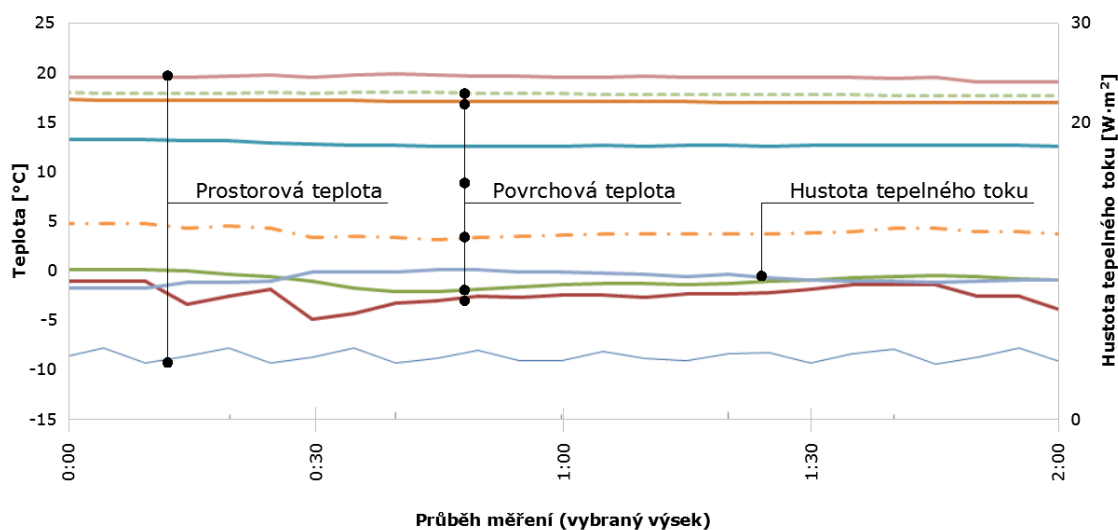
Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,76 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,48 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,47 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,81 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	15 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,019 W·K⁻¹·m⁻¹

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,489 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,466 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,83 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,018 W·K⁻¹·m⁻¹

Sendvičová reflexní izolace z vrstev pěnového polyetylénu a hliníkových folií

Celková izolovaná vzduchová dutina vystavena teplotnímu spádu ~ 14 K



Obr. Průběh laboratorního měření

Tab. Vyhodnocení laboratorního měření ve smyslu ČSN EN 16012

Tepelný odpor celkové izolované vzduchové dutiny	1,52 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,41 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,39 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,723 m²·K·W⁻¹
Tloušťka měřeného prvku	15 mm
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,021 W·K⁻¹·m⁻¹

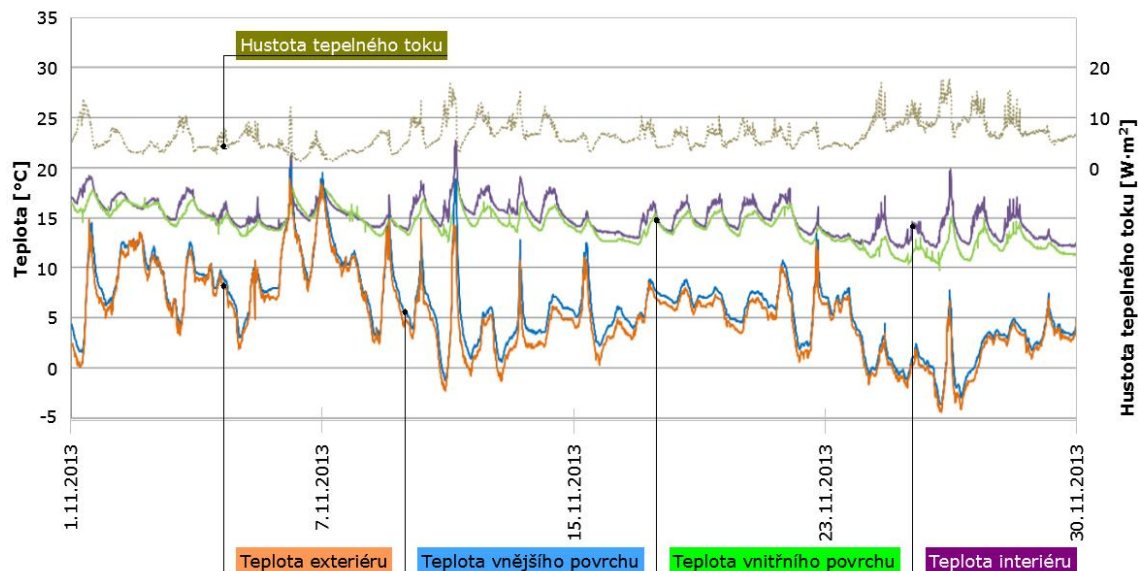
Tab. Vyhodnocení laboratorního měření měřičem tepelného toku

Tepelný odpor chladnější vzduchové dutiny	0,418 m ² ·K·W ⁻¹
Vypočtený tepelný odpor teplejší vzduchové dutiny	0,371 m ² ·K·W ⁻¹
Výsledný tepelný odpor jádra výrobku	0,729 m²·K·W⁻¹
Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti jádra výrobku	0,021 W·K⁻¹·m⁻¹

2. NEUSTÁLENÝ TEPLOTNÍ STAV, MĚŘENÍ IN-SITU

2.1. KONSTRUKCE STĚNY

Listopad (1. 11. – 30. 11. 2013)



Obr. Průběh měření

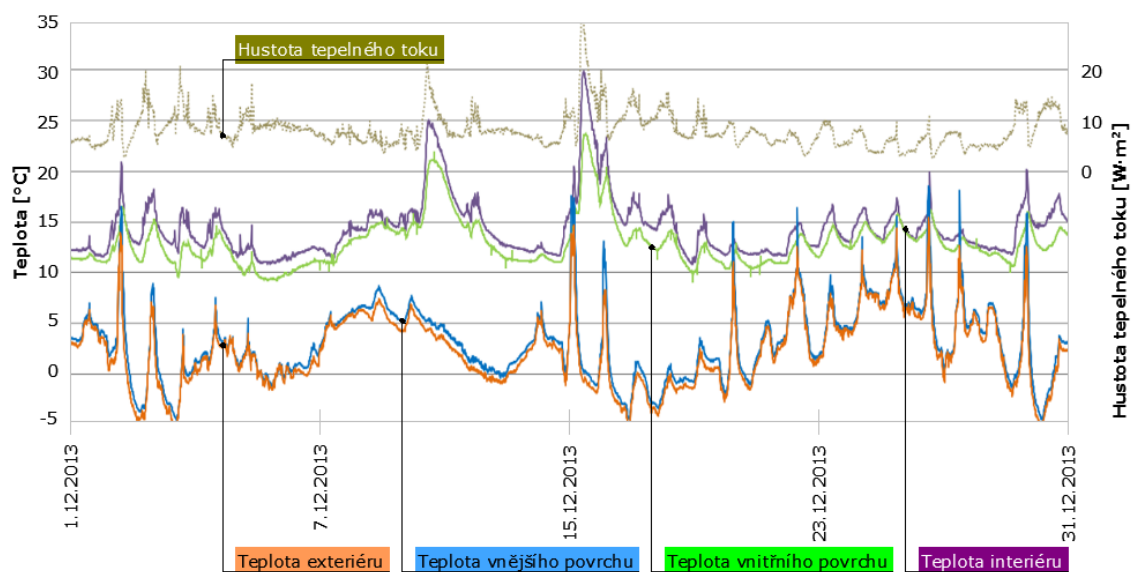
Během tohoto období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 14,99 \text{ °C}$ a průměrná vnější teplota $\theta_e = 5,22 \text{ °C}$. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 14,11 \text{ °C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 6,07 \text{ °C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 4,99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 43878,5 \text{ °C}$ a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 15292,7 \text{ °C}$. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 41314,4 \text{ °C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 17760,7 \text{ °C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 14625,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,61 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Prosinec (1. 12. – 31. 12. 2013)



Obr. Průběh měření

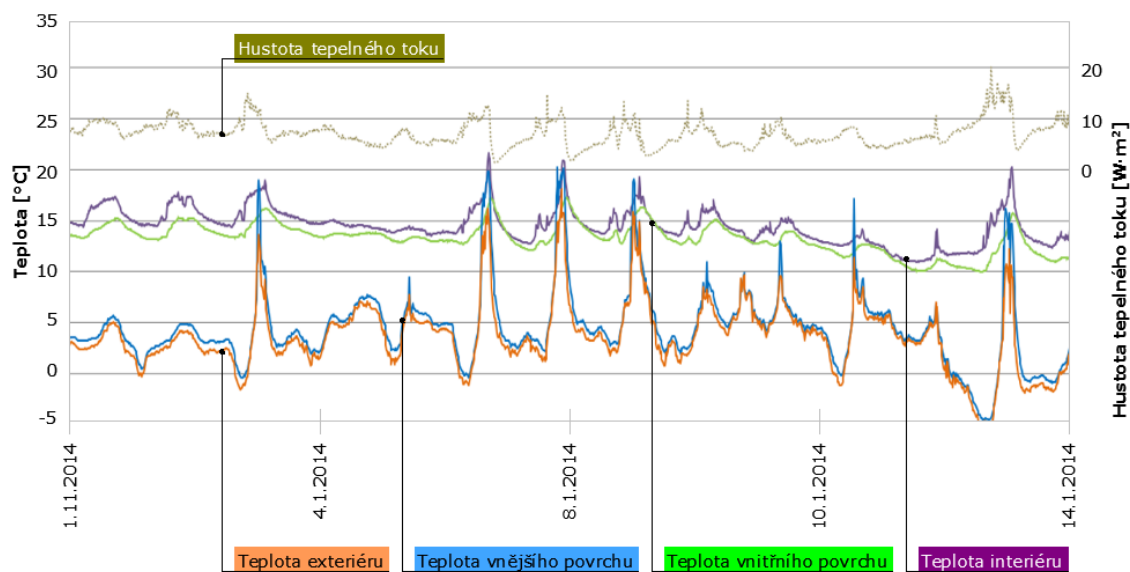
Během tohoto období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 14,33 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná vnější teplota $\theta_e = 2,29 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 12,91 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 3,08 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 6,67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 42641,1 \text{ }^\circ\text{C}$ a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 6824,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 38412,0 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 9160,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 19863,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,47 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Leden (1. 1. – 14. 1. 2014)



Obr. Průběh měření

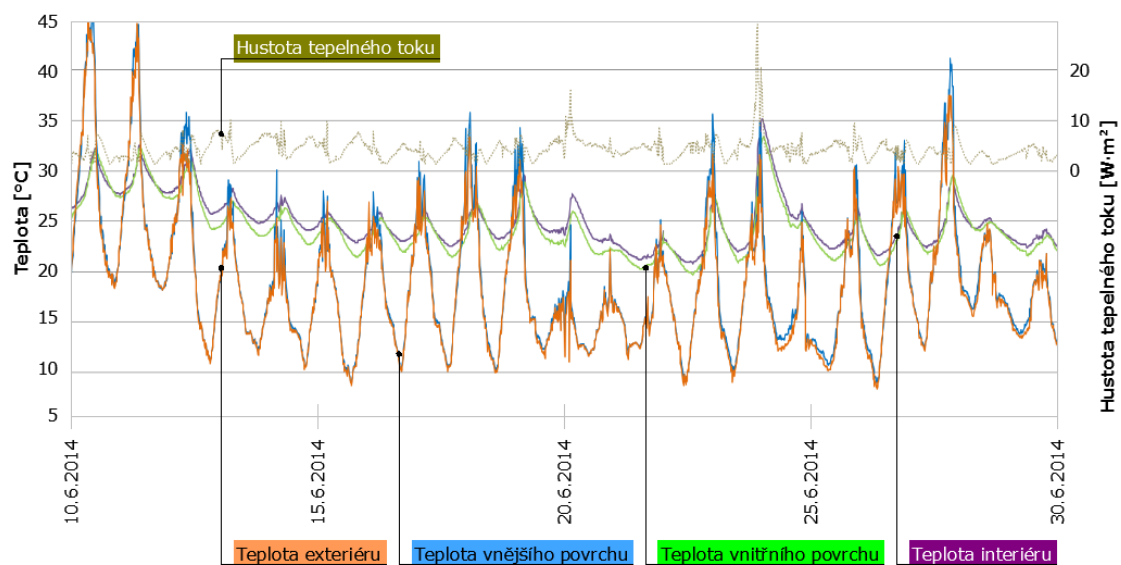
Během tohoto období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 14,50 \text{ °C}$ a průměrná vnější teplota $\theta_e = 3,56 \text{ °C}$. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 13,28 \text{ °C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 4,44 \text{ °C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 5,68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 18804,8 \text{ °C}$ a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 4613,0 \text{ °C}$. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 17227,6 \text{ °C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 5753,1 \text{ °C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 7368,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,56 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Červen (10. 6. – 30. 6. 2014)



Obr. Průběh měření

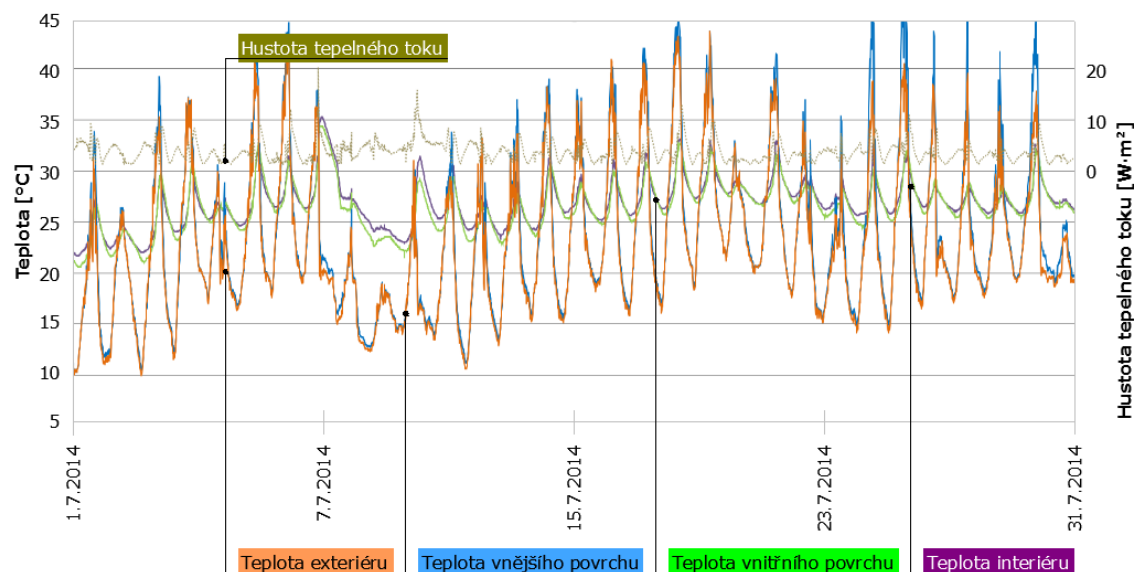
V období 10. 6. – 30. 6. 2014 byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 25,00$ °C a průměrná vnější teplota $\theta_e = 18,55$ °C. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 24,36$ °C a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 19,06$ °C. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 2,93$ W·m⁻².

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 50006,8$ °C a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 37090,3$ °C. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 48721,1$ °C a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 38122,3$ °C. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 27340,9$ W·m⁻².

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,81$ m²·K·W⁻¹
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,45$ W·m⁻²·K⁻¹

Červenec (1. 7. – 31. 7. 2014)



Obr. Průběh měření

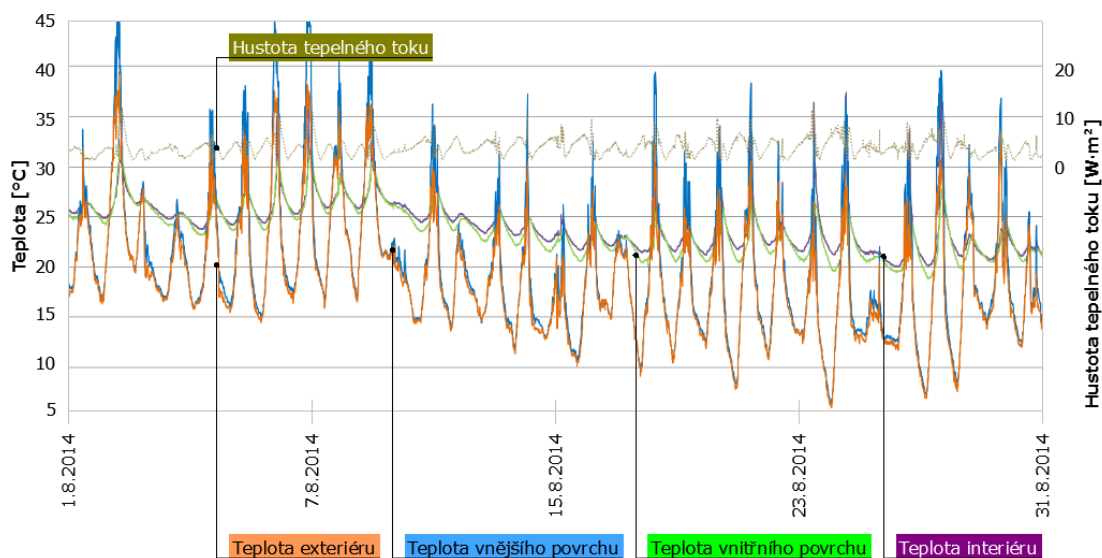
Během tohoto období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 26,88 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná vnější teplota $\theta_e = 22,65 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 26,48 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 23,38 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 2,47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 80000,4 \text{ }^\circ\text{C}$ a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 67413,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 78801,9 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 69580,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 7351,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,25 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Srpen (1. 8. – 31. 8. 2015)



Obr. Průběh měření

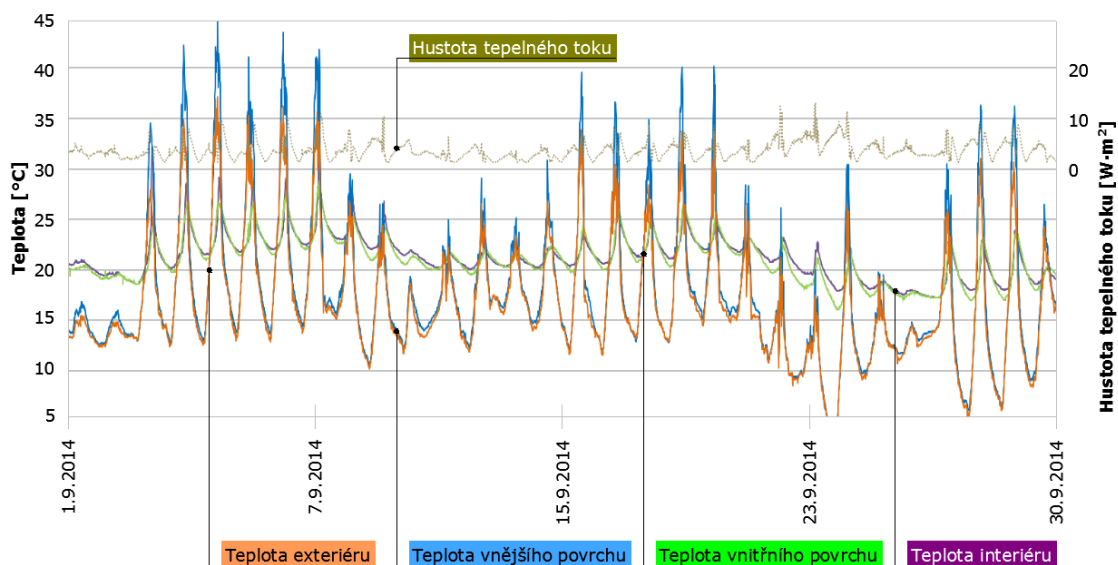
Během tohoto období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 24,25 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná vnější teplota $\theta_e = 18,75 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 23,70 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 19,82 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 2,49 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 72176,2 \text{ }^\circ\text{C}$ a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 55809,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 70520,7 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 58993,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 7409,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,56 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
- Součinitel prostupu tepla $U = 0,45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Září (1. 9 – 30. 9. 2014)



Obr. Průběh měření

Během tohoto období byla naměřena průměrná vnitřní teplota $\theta_i = 21,30 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná vnější teplota $\theta_e = 16,57 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná teplota vnitřního povrchu byla $\theta_{si} = 21,01 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná teplota vnějšího povrchu konstrukce $\theta_{se} = 17,58 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hustota tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 2,34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Suma naměřených hodnot vnitřních teplot $\Sigma\theta_i = 61330,1 \text{ }^\circ\text{C}$ a vnějších teplot $\Sigma\theta_e = 47733,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Suma hodnot teplot vnitřního povrchu byla $\Sigma\theta_{si} = 60496,3 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplot vnějšího povrchu konstrukce $\Sigma\theta_{se} = 50626,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový součet naměřených hodnot hustoty tepelného toku z vytápěného prostoru do exteriéru byla $q = 6726,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vyhodnocení tepelného odporu a součinitele prostupu tepla ISO 9869 (1994):

- Tepelný odpor konstrukce $R = 1,47 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Součinitel prostupu tepla $U = 0,49 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$