



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ  
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

# OPTIMALIZACE LEHKÉHO ŠIKMÉHO STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ K REDUKCI LETNÍCH TEPELNÝCH ZISKŮ

OPTIMIZATION OF A LIGHTWEIGHT PITCHED ROOF IN ORDER TO REDUCE SUMMER HEAT  
GAINS

DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Sylvia Svobodová

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Libor Matějka, CSc., Ph.D., MBA

BRNO 2019

## **Abstrakt**

Předložená práce se zabývá problematikou přehřívání podkrovních místností během letního období. U převážné většiny rodinných a bytových domů, kde je využito podkroví pro obytné účely, je opláštění krovu řešeno střešním pláštěm tvořeným lehkou konstrukcí. Takový plášť není schopen dostatečně odolávat letním okrajovým podmínkám a to se projevuje na tepelných ziscích v interiéru. V této práci je pozornost soustředěna pouze na prostup tepla střešním pláštěm.

Je zde hodnocen vliv jednotlivých konstrukčních opatření doporučených pro redukci tepelných zisků střešním pláštěm – barva krytiny; tepelně akumulční vlastnosti; reflexní povrchy v dutině pod krytinou a větraná vzduchová vrstva. Jsou sledovány teplotní a rychlostní profily ve větrané vzduchové dutině a hodnocena účinnost tohoto opatření. Při tvorbě dílčích analýz bylo využito simulačních softwarů – na principu metody konečných prvků a také pro dynamickou simulaci. Rovněž bylo provedeno dlouhodobé měření teplot na modelech střešních pláštů, krátkodobé měření povrchových teplot různých druhů krytin, laboratorní měření odrazivosti na vzorcích krytiny. Také je zde diskutován vliv krycích mřížek větracích otvorů, které byly testovány na ventilátorové dráze. V publikaci je věnován prostor pro vysvětlení obecných principů přirozeného proudění, mezních vrstev a teorii výpočtu součinitele přestupu tepla.

Součástí práce je vyhotovený standard metodiky přesných výpočtů větraných střešních pláštů, který lze využít pro snadnou orientaci při tepelně technickém výpočtu střešního pláště.

Z poznatků dílčích analýz a energetických bilancí je prokazatelný pozitivní vliv větrané vzduchové vrstvy na redukci tepelných zisků v podkrovní místnosti. Současné řešení hřebene zajišťuje pouze odvod vlhkosti ze skladby a pro účely odvětrání přebytečných tepelných zisků není zdaleka dostačující. To vedlo k návrhu inovativního řešení konstrukce hřebene, tak aby se podpořila výměna vzduchu v dutině, a tím zvýšilo přirozené odvádění tepla.

## **Klíčová slova**

šikmá střecha, střešní plášť, dvouplášťová střecha, letní období, redukce tepelných zisků, pasivní chlazení, větraná vzduchová vrstva, součinitel přestupu tepla, standard metodiky výpočtu, střešní hřeben



## **Abstract**

The thesis deals with the topic of overheating of attic rooms during the summer period. In vast majority of family houses and apartment houses with inhabited attic spaces is the roof solved as lightweight. This kind of roof assembly is not able to sufficiently resist the summer boundary conditions and leads to increased heat gains in the interior. In this work, the attention is drawn entirely to the heat penetration through the roof.

Different aspects of passive cooling were applied to the roof and the impact of each change was assessed. This concerns the color of the tiles, thermal accumulation, reflective surfaces and the ventilated air layer. The temperature and velocity profiles in the ventilated cavity were monitored and an analysis of the ventilated cavity efficiency was conducted. For individual analyses was used software – based on the principles of the Finite Element Method or the dynamic simulation software. Also other methods were employed: long-term measurement of temperatures on roof models; short-term measurement of surface temperature of various kinds of roof tiles; and laboratory measurement of reflexivity. Also the effect of insect grilles on the air flow is discussed; which was tested on a ventilator track. In this publication are explained the principles of natural convection; boundary layers and the theory of the coefficient of heat transfer.

This work includes a standard of the precise calculation methodology for ventilated roofs which was developed for the purpose of creating a user-friendly guide.

The results of individual analyses show, a definitely positive effect of the ventilated cavity on the heat gain reduction of attic rooms. The current technical solution of a roof ridge provides the exhaust of the water vapor from a roof assembly; but for providing ventilation for reducing heat gains is insufficient. This lead to a concept of an innovative roof ridge design which enhances the air exchange between the cavity and outdoor environment.

## **Keywords**

pitched roof, double-skin roof, summer period, heat gain reduction, passive cooling, ventilated air layer, coefficient of heat transfer, calculation methodology standard, roof ridge

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Sylvia Svobodová *Optimalizace lehkého šikmého střešního pláště k redukci letních tepelných zisků*. Brno, 2019. 192 s., 192 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Libor Matějka, CSc., Ph.D., MBA

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Optimalizace lehkého šikmého střešního pláště k redukci letních tepelných zisků zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 7. 2019

.....

Ing. Sylvia Svobodová

autor práce

## Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod .....  | 4  |
| 2     | Přehled o současném stavu problematiky střešních pláštů z hlediska redukce letních tepelných zisků..... | 7  |
| 2.1   | Existující konstrukční opatření bránící přehřívání podstřeší .....                                      | 8  |
| 2.1.1 | Vrstva s tepelně akumulací schopností.....  | 9  |
| 2.1.2 | Reflexní fólie.....   | 13 |
| 2.1.3 | Větraná vzduchová vrstva.....   | 14 |
| 2.1.4 | Typ a barva krytiny.....  | 14 |
| 2.1.5 | Vegetační střecha .....   | 15 |
| 2.1.6 | Materiály se změnou skupenství.....   | 15 |
| 2.1.7 | Kombinace konstrukčních opatření.....   | 16 |
| 2.2   | Požadavky na vnitřní prostředí.....   | 16 |
| 2.3   | Typická střešní skladba realizovaná v ČR.....   | 17 |
| 2.4   | Parametry větrané vzduchové vrstvy.....   | 18 |
| 2.5   | Metodika hodnocení budov v letním období .....  | 19 |
| 3     | Cíle .....  | 21 |
| 4     | Teoretický základ práce a zvolené metody zpracování .....   | 23 |
| 4.1   | Způsoby přenosu tepla .....   | 25 |
| 4.1.1 | Vedení tepla.....   | 25 |
| 4.1.2 | Proudění.....   | 28 |
| 4.1.3 | Sálání.....   | 31 |
| 4.2   | Matematická formulace sálání na površích střešního pláště.....  | 37 |
| 4.3   | Vybrané fyzikální veličiny .....  | 38 |
| 4.4   | Principy přirozeného proudění ve větrané dvouplášťové střeše .....                                      | 44 |
| 4.4.1 | Přirozené proudění podél horké plochy.....  | 47 |
| 4.4.2 | Tepelná mezní vrstva.....   | 48 |
| 4.4.3 | Optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy.....  | 50 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.5   | Numerický model větraného střešního pláště .....   | 53  |
| 4.6   | Modelování distribuce tepla ve střešní konstrukci metodou konečných prvků ....                   | 56  |
| 4.6.1 | Model větraného střešního pláště v softwaru COMSOL.....  | 58  |
| 4.6.2 | Model nevětraného střešního pláště v softwaru COMSOL.....  | 62  |
| 4.7   | Dynamická simulace podkrovní místnosti .....   | 64  |
| 4.8   | Experimentální měření.....   | 67  |
| 4.8.1 | Maximální teploty vybraných druhů krytin .....   | 67  |
| 4.8.2 | Experimentální měření teploty na modelech střešních pláštů .....                                 | 69  |
| 4.8.3 | Testování krycích mřížek na ventilátorové dráze .....  | 74  |
| 5     | Výsledky práce .....   | 76  |
| 5.1   | Analýza hlavních faktorů ovlivňujících šíření tepla ve střešním plášti v letním období .....     | 76  |
| 5.1.1 | Posouzení „typické střešní skladby“ .....  | 77  |
| 5.1.2 | Materiál tepelné izolace .....   | 81  |
| 5.1.3 | Materiál stropního podhledu .....  | 83  |
| 5.1.4 | Kombinace materiálového řešení tepelné izolace a podhledu .....                                  | 85  |
| 5.1.5 | Reflexní povrchy .....   | 87  |
| 5.1.6 | Barva krytiny.....   | 89  |
| 5.1.7 | Experimentální ověření účinnosti vybraných variant .....   | 91  |
| 5.1.8 | Parametrická studie materiálových vlastností .....   | 98  |
| 5.2   | Vlivy konstrukčního řešení na proudění ve větrané vzduchové vrstvě .....                         | 104 |
| 5.2.1 | Teplotní a rychlostní pole ve větrané vzduchové dutině.....                                      | 105 |
| 5.2.2 | Vliv sálání mezi horním a dolním pláštěm na proudění v dutině .....                              | 109 |
| 5.2.3 | Tepelná bilance větraného střešního pláště oproti nevětrané variantě .....                       | 115 |
| 5.2.4 | Krycí mřížky větracích otvorů.....   | 121 |
| 5.3   | Sjednocený postup při výpočtu šíření tepla střešním pláštěm.....                                 | 131 |
| 5.4   | Návrh detailu hřebene podporující proudění vzduchu v dutině – „hřebenová větrací tvarovka“ ..... | 155 |
| 6     | Závěr .....  | 162 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 6.1 | Materiálové řešení a konstrukční opatření ..... | 162 |
| 6.2 | Proudění vzduchu v dutině .....                 | 163 |
| 6.3 | Metodika výpočtu .....                          | 163 |
| 6.4 | Návrh nového konstrukčního opatření.....        | 164 |
| 7   | Přínosy a možnosti dalšího výzkumu.....         | 165 |
|     | Bibliografie.....                               | 167 |
|     | Seznam vlastní literatury.....                  | 174 |
|     | Seznam použitých veličin .....                  | 176 |
|     | Seznam obrázků .....                            | 183 |
|     | Seznam tabulek .....                            | 189 |
|     | Poděkování.....                                 | 191 |

## 1 Úvod

Od počátku 90. let 20. stol. se začalo u většiny novostaveb rodinných domů se šikmou střechou využívat podkrovních prostor k obytným účelům. U stávajících rodinných domů si vlastníci také zřizovali podkrovní obytné místnosti a na bytových domech se začaly objevovat střešní nástavby. Tento trend byl odstartován novou érou bydlení a snahou maximálního využití obestavěného prostoru. V ten okamžik se výrazně zvýšily požadavky na střešní plášť, tak aby dokázal chránit přilehlé prostory a byly tak splněny požadavky pro obytné místnosti. Všechny tyto požadavky se promítají do střešní skladby. V první řadě jde o vytvoření kvalitní hydroizolační vrstvy, tak aby nedocházelo k zatékání srážkové vody do obytného interiéru. Další nutností je provedení tepelně izolační vrstvy, bránící tepelným únikům z vytápěného vnitřního prostředí přes střešní plášť do exteriéru. Třetím úkolem je zabránit vlhkosti produkované v interiéru, aby pronikala do střešního souvrství. V nynější době již existuje celá řada materiálů, výrobků a systémových řešení pro vybudování funkčního střešního pláště z hlediska vodonepropustnosti, tepelných ztrát a vlhkostní bilance.

I při správném návrhu a kvalitním provedení však není zaručen tepelný komfort v podkrovních místnostech. V teplých obdobích roku, tj. především na jaře a v létě dochází k přehřívání těchto prostorů. Čím delší je teplé období, tím k výraznějšímu ohřátí vnitřního prostoru dojde. Není to způsobeno pouze okny orientovanými na jih či západ, i když výplně otvorů hrají v přehřívání interiérů významnou roli. Teplo se však šíří i přímo skrze střešní plášť. Šikmá střešní konstrukce bývá tvořena lehkou skladbou s minimální akumulací schopností. Taková obálka budovy není schopna po delší dobu odolávat vyšším teplotám a chránit tak interiér před přehřátím. Stejný problém se objevuje i u staveb, kde je obvodový plášť tvořen lehkou konstrukcí, např. u budov s lehkým obvodovým pláštěm nebo u moderních dřevostaveb, kdy nízká tepelná setrvačnost stavebních konstrukcí má za následek příliš rychlé ohřátí interiéru a následný diskomfort. Bohužel je však mezi odbornou veřejností rozšířen názor, že dostatečná tloušťka tepelného izolantu zamezí tepelnému namáhání interiéru skrze konstrukci. Na tento jev upozorňoval i prof. Ing. Jan Krňanský, CSc. (†2011), když uvedl, že tento názor je koncepčně mylný. Tloušťkou tepelné izolace lze snížit tepelný tok konstrukcí (v zimě, kdy

v interiéru je zdroj tepla), nikoliv však rychlost, jakou se promítne změna venkovních podmínek v interiéru. [1] Zmíněnou funkci může převzít jedině materiál s vysokou tepelnou akumulací.

Při návrhu podkroví, kde je vysoký podíl lehkých obalových konstrukcí, se jeví jako vhodné podrobit samotnou střešní skladbu tepelně technickému posouzení stejně tak, jako je to předepsáno pro zimní období, avšak pro neustálený teplotní stav, protože v interiéru není uvažováno se zdrojem chladu, který by udržoval konstantní teplotu vzduchu. K tomuto účelu lze využít též veličiny jako například teplotní útlum či fázový posun teplotního kmitu. Dle současné legislativy se hodnotí pouze jediná veličina z hlediska letního období, jíž je maximální teplota vzduchu v interiéru, v rámci výpočtu tepelné stability kritické místnosti. Zde výpočet ovlivňuje více faktorů, jako jsou objem místnosti, velikost oken a orientace vůči světovým stranám, stínící technika, atd. V našich klimatických podmínkách dochází k velkým klimatickým výkyvům, kromě chladných zimních období zde panují horká letní období. Z těchto důvodů by bylo vhodné věnovat více pozornosti problematice chování střešního pláště za letních okrajových podmínek.

Předložená práce se detailně zabývá distribucí tepla ve střešním plášti podkrovních místností rodinných a bytových domů v letním období. Pochopení fyzikálních jevů, ke kterým dochází při šíření tepla konstrukcí, je klíčové k navržení obálky budovy, která bude lépe chránit vnitřní prostor z tepelně technického hlediska. Existují různá konstrukční opatření redukující tepelné zisky skrze neprůhledné konstrukce. Jedná se o modifikaci povrchových a materiálových charakteristik oproti běžně používaným materiálům. Tímto způsobem lze snížit venkovní povrchovou teplotu, zvýšit tepelnou akumulaci konstrukce, snížit tepelný tok mezi povrchy ve vzduchové dutině a zvýšit proudění ve větrané vzduchové dutině. Další metody pasivního chlazení jsou založeny na proudění okolo konstrukcí, které jsou tímto způsobem ochlazovány. Otázka účinnosti větrané vzduchové vrstvy ve střešním plášti z hlediska odvedení části tepelných zisků je stále diskutovaná. Mnozí výzkumníci svými výpočty a experimenty dokazují její vliv, nicméně mezi odbornou veřejností převládá názor opačný, tedy, že její vliv je zanedbatelný. V této práci jsou hodnoceny vlivy jednotlivých parametrů konstrukce a použitých materiálů, včetně vlivu větrané vzduchové vrstvy, na tepelně technické chování



střešní skladby. Např. vliv barvy a materiálu krytiny, materiálu a tloušťky tepelné izolace, tepelně akumulární schopnosti podhledu, tloušťky větrané vzduchové vrstvy, umístění reflexní vrstvy a další. Zároveň je snahou nalezení optimální skladby či konstrukčního opatření, které dokáže odstínit či utlumit tepelné namáhání interiéru. Součástí práce je modelování větrané vzduchové vrstvy, jakožto preferovaného způsobu přirozeného snížení teploty celého střešního pláště.

Cílem disertační práce je zjistit do jaké míry lze ovlivnit teplotu v interiéru aplikací různých konstrukčních opatření, vyhodnotit účinnost větrané vzduchové vrstvy, navrhnout standard metodiky přesného výpočtu šíření tepla pláštěm a navrhnout vhodné konstrukční opatření pro minimalizaci tepelných zisků skrze střešní plášť. Vzhledem ke zvyšujícím se tepelně technickým požadavkům na obalové konstrukce, jsou všechna opatření hodnocena na skladbách, které jsou doporučeny pro nízkoenergetické domy.

## 2 Přehled o současném stavu problematiky střešních pláštů z hlediska redukce letních tepelných zisků

Problematikou větraných šikmých střešních pláštů se zabývala již řada vědců a výzkumníků po celém světě. Většina zpracovaných studií se věnuje vlivu větrané vzduchové vrstvy na redukci tepelných zisků skrze střešní plášť během letního období. Tyto studie zahrnují dílčí posouzení vlivu jednotlivých parametrů střešního pláště, jako je tloušťka a sklon větrané vzduchové vrstvy, presence či absence reflexní vrstvy uvnitř vzduchové mezery, solární odrazivost krytiny či tepelný odpor horního pláště. Jednotlivé studie se od sebe liší zvolenou metodou zkoumání. První skupina studií je experimentální, kdy je testován model střešního pláště v reálných či laboratorních podmínkách [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Druhá skupina prací prezentuje výsledky získané výpočetní cestou z CFD simulace nebo matematického modelu [11], [12], [13], [14]. Sledovanými veličinami obvykle bývají povrchové teploty a teplotní profily vzduchu ve větrané dutině, rychlosti proudění v dutině, procento odvedeného tepla prouděním a tepelný tok spodním pláštěm. U modelů zahrnujících přilehlé podkroví bývá hodnocena také teplota vzduchu v místnosti.

Někteří vědci mají komplexnější přístup k dané problematice a prezentují své výsledky v podobě Nusseltova a Rayleighova čísla [7], [14], [15], které pak mohou být využity dalšími výzkumníky pro validaci svých modelů. Popřípadě vytváří vlastní korelační vztahy pro tyto veličiny, při jejichž využití na obdobném modelu a oblasti okrajových podmínek lze dosáhnout zpřesnění výpočtu.

Průkopníky v oblasti přirozeného proudění mezi dvěma nakloněnými paralelními rovinami byli L. F. A. Azevedo a E. M. Sparrow (80. léta 20. stol.). Využitím modelu s vyhřívanými měděnými deskami ve vodním prostředí dokázali vizualizovat proudění a vytvořili korelační vztah pro Nusseltovo číslo pro proudění v dutinách [16], jenž se využívá dodnes. Další významnou osobností je Adrian Bejan, který je považován za současného největšího odborníka na termodynamiku, a publikoval několik knih, kde se detailně zabývá šířením tepla prouděním.

Jak bylo již zmíněno, řada výzkumníků se zabývá možnostmi snižování tepelných zisků skrze střešní plášť. Např. F. Miranville působící na univerzitě na Reuionu se nyní zabývá výzkumem na téma integrace materiálů se změnou skupenství ve spodním plášti šikmé větrané střechy. Dříve se zabýval využitím reflexních fólií ve střešním souvrství. Na vnitřní prostředí budov je zaměřená výzkumná skupina pod vedením prof. Arnolda Janssense na Gentské univerzitě v Belgii. Provádí simulace energetických bilancí budov, převážně v programu TRNSYS.

Z oblasti praktického využití je širokou odbornou veřejností v USA využíváno technických podkladů organizace CRRC (Cool Roof Rating Council), která laboratorně měří hodnoty solární odrazivosti komerčně dostupné krytiny. V nynější době uvádí hodnoty přes 2500 druhů krytin. Jednoznačně jsou preferovány krytiny světlých barev a u tmavých odstínů typy se studenými pigmenty. Studenými pigmenty se rozumí pigmenty, které mají sice vysokou pohltivost ve viditelném spektru, ale odráží vysoký podíl v infračerveném spektru solárního záření. Tímto způsobem je zároveň snižováno tepelné namáhání u městských tepelných ostrovů. Další organizací v USA zabývající se okrajově i snižováním povrchové teploty krytiny je Florida Solar Energy Center (založena v 70. letech 20. století), která se primárně zabývá výzkumem v oblasti fotovoltaiky.

## **2.1 Existující konstrukční opatření bránící přehřívání podstřeší**

Vždy má být snahou najít vhodné konstrukční opatření, tak aby nemusela být zvýšená teplota v interiéru kompenzována klimatizací [17], a tím zvyšována energetická náročnost budovy. Při komplexním návrhu objektu patří mezi nejběžnější konstrukční opatření vhodná orientace stavebních otvorů vůči světovým stranám, stínění oken předsazenými konstrukcemi a stínicí technikou, či volba zasklení s vhodnými parametry. Zlepšení lze však dosáhnout i na úrovni jednotlivých konstrukcí, zejména jedná-li se o lehký obvodový plášť. Zvýšení odolnosti střešního pláště vůči letním tepelným ziskům lze zajistit několika způsoby. Mezi ně patří návrh větrané vzduchové vrstvy, zvýšení tepelné kapacity konstrukce, zabudování materiálu se skupenskou změnou či umístění reflexní fólie do skladby. Teplotu v interiéru lze ovlivnit i povrchovými vlastnostmi krytiny [18]. Výrazné redukce tepelných zisků lze dosáhnout návrhem intenzivní vegetační střechy.

### 2.1.1 Vrstva s tepelně akumulací schopností

Každá stavební konstrukce má větší či menší schopnost akumulovat ve své hmotě tepelnou energii. Obecně lze konstatovat, že těžké konstrukce mají mnohem vyšší akumulací schopnost oproti lehkým konstrukcím. Je to dáno objemovou hmotností  $\rho$  použitých materiálů, jejich měrnou tepelnou kapacitou  $c_p$  a součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$ . Tyto tři veličiny jsou klíčové k určení kolik tepla konstrukce přijme, jak rychle bude docházet k jejímu ohřívání a také jak rychle bude konstrukce chladnout. Jako srovnávací veličinu pro vyjádření tepelně akumulací schopnosti materiálu lze použít součinitel teplotní vodivosti (17), tepelnou jímavost (56) či veličinu „thermal inertia“ / „thermal effusivity“ (57), která je často používaná v zahraniční literatuře. Jejich bližší popis je uveden v kapitole 4.3.

Další veličinou charakterizující materiálové vlastnosti, která je využívána pro porovnání jednotlivých materiálů, je objemová tepelná kapacita (1), vyjadřující tepelnou kapacitu na jednotku objemu. Orientační hodnoty pro vybrané druhy tepelné izolace a podhledu uvádí Tab. 2. Nebo v případě stavebního výrobku s konkrétní tloušťkou lze užít plošnou tepelnou kapacitu (2).

$$c_V = c_p \cdot \rho \quad (1)$$

$$c_A = c_p \cdot \rho \cdot d = c_V \cdot d \quad (2)$$

kde  $c_V$  je objemová tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ],  $c_p$  je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $\rho$  je objemová hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $c_A$  je plošná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ] a  $d$  je tloušťka materiálu [m]. Přehled hodnot součinitele teplotní vodivosti  $\alpha$ , tepelné jímavosti  $b$ , „thermal inertia“  $i$  a objemové tepelné kapacity  $c_V$  u vybraných stavebních materiálů uvádí Tab. 1. Je zde patrný nepoměr mezi teplotní vodivostí a tepelnou jímavostí. Zatímco první sloupec hodnot uvádí rychlost, kterou se teplo šíří materiálem, druhý sloupec znázorňuje schopnost v sobě uchovávat tepelnou energii. Beton dokáže pojmout mnohem více tepla než XPS, přičemž teplo se v nich šíří obdobnou rychlostí.

Akumulace významně přispívá k tepelné stabilitě místnosti v letním i zimním období. Má výrazný vliv na teplotní útlum při pronikání „tepelné vlny“ skrze konstrukci a na fázový posun teplotního kmitu. Prodlouží se doba potřebná pro prohřátí konstrukce.

Tab. 1 Tepelně technické charakteristiky vybraných stavebních materiálů důležité pro určení tepelné setrvačnosti budovy

| Materiál  | Součinitel teplotní vodivosti<br>$\alpha$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] | Tepelná jímavost<br>$b$ [ $\text{W}^2\text{s}\cdot\text{m}^{-4}\text{K}^{-2}$ ] | „Thermal inertia“<br>$i$ [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ ] | Objemová tepelná kapacita<br>$c_V$ [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ ] |
|---|---|---|---|---|
| minerální vata*1  | $1,19\cdot 10^{-6}$   | $1,3\cdot 10^3$   | 36  | 33,6  |
| EPS*2   | $1,04\cdot 10^{-6}$   | $1,3\cdot 10^3$   | 36  | 35,6  |
| XPS*3   | $0,55\cdot 10^{-6}$   | $2,1\cdot 10^3$   | 46  | 61,8  |
| dřevovláknitá vata*4  | $0,13\cdot 10^{-6}$   | $12,6\cdot 10^3$  | 112   | 315,0   |
| beton*5   | $0,60\cdot 10^{-6}$   | $3284,4\cdot 10^3$  | 1812  | 2346,0  |
| *1 $\lambda=0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , $\rho=40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $c_p=840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ; *2 $\lambda=0,037 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , $\rho=28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $c_p=1270 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ; *3 $\lambda=0,034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , $\rho=30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $c_p=2060 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ; *4 $\lambda=0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , $\rho=150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $c_p=2100 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ; *5 $\lambda=1,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , $\rho=2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $c_p=1020 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ . |   |   |   |   |

Problematikou akumulace tepla ve stavebních konstrukcích se zabývá i práce Sylvie Klímové [19], kde porovnává chování těžkých, lehkých a smíšených konstrukcí během letního období. Jedním z poznatků je, že pokud má budova obvodový plášť tvořený lehkými konstrukcemi, pak alespoň vnitřní konstrukce je vhodné navrhnout jako těžké. Je výhodné navrhovat skladbu s fázovým posunem 8 – 12 h, minimálně je však doporučeno 5 h [19]. Až teplota vzduchu v interiéru poklesne, začne se teplo uvolňovat z konstrukcí. Pokud je však fázový posun skladby příliš velký, nedojde během noci k vychlazení skladby a konstrukce se tak další den ohřeje dříve. Je nutné zde zmínit, že k tepelné stabilitě celé budovy významně přispívají i konstrukce neosluněné a vnitřní, které se také podílejí na snížení teploty vzduchu v interiéru tím, že do sebe akumulují teplo z okolního vzduchu v interiéru. Množství tepelné energie akumulované v konstrukci lze vyjádřit výpočtem:

$$W = \sum_{(m)} \left[ S_m \sum_{(j)} (c_{m,j} \rho_{m,j} d_{m,j} \theta_{m,j,m}) \right] \quad (3)$$

kde  $W$  je tepelná energie akumulovaná uvnitř konstrukcí [J],  $S_m$  je plocha vnitřního povrchu  $m$ -té konstrukce [ $m^2$ ],  $c_{m,j}$  je měrná tepelná kapacita  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [ $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$ ],  $\rho_{m,j}$  je objemová hmotnost  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [ $kg \cdot m^{-3}$ ],  $d_{m,j}$  je tloušťka  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [m],  $\theta_{m,j,m}$  je průměrná teplota  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [K].

Tab. 2 Orientační hodnoty objemové tepelné kapacity vybraných stavebních materiálů

| Tepelné izolace       |   | Podhledy       |   |
|-----------------------|---|----------------|---|
| Materiál              | Objemová tepelná kapacita<br>$c_v$ [ $kJ \cdot m^{-3} K^{-1}$ ] | Materiál       | Objemová tepelná kapacita<br>$c_v$ [ $kJ \cdot m^{-3} K^{-1}$ ] |
| minerální vlna        | 34  | sádrokarton    | 795   |
| EPS                   | 36  | OSB            | 1105  |
| XPS                   | 62  | dřevěná prkna  | 1000  |
| PUR                   | 45  | hliněné panely | 2460  |
| dřevovláknitá izolace | 315   |                |   |
| celulósová izolace    | 124   |                |   |

Jedním z konstrukčních řešení jak zmírnit teplotní namáhání interiéru je tedy použití materiálu s vyšší akumulací schopností. Dále jsou v této kapitole uvedeny materiály s potenciálem využití ve střešní skladbě z důvodu vyšší akumulací schopnosti oproti běžným materiálům.

### ***Těžká nosná konstrukce***

Princip spočívá ve vytvoření stropní konstrukce nad posledním nadzemním podlažím z panelů nebo železobetonové desky ve sklonu, většinou jako sedlová či pultová střecha o mírném spádu. Má zároveň i nosnou funkci a lze ji využít jako nosnou konstrukci pro vegetační střechy. Toto konstrukční řešení je často užívané v zemích jižní Evropy, např. v Itálii, Španělsku, Chorvatsku, Řecku. V posledních letech v České republice zařadilo několik výrobců stavebního materiálu do svého sortimentu systémové řešení šikmých

střešních konstrukcí tvořených z nosníků a vložek. Stropní vložky jsou dostupné v materiálových variantách pórobeton nebo pálená keramika, je vyžadována nadbetonávka. Zatím však toto řešení není mezi stavebníky vyhledáváno.

### *Tepelná izolace s akumulací schopností*

Běžně používané materiály tepelné izolace, jako jsou minerální vata, pěnový polystyrén, PUR a PIR mají výborné tepelně izolační vlastnosti v zimním období, to samé však neplatí pro letní období. Jejich malá objemová tepelná kapacita způsobuje rychlé prohřátí celé konstrukce. Některé druhy tepelných izolací na bázi přírodních materiálů, např. dřevovláknitá vlna, celulózová izolace a jiné, mají vyšší tepelně akumulací schopnost.

Dřevovláknité desky:  $\rho=150-260 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\lambda=0,039-0,049 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $c=2100 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\mu=5$

Jejich největší výhodou spočívá v tom, že je lze použít do běžné lehké střešní skladby, navíc bez dalších zvláštních konstrukčních opatření. Kromě toho má i dobré zvukově izolační vlastnosti a značnou sorpční schopnost. Dokáže opakovaně zachytit vzdušnou vlhkost a později ji uvolnit zpět do okolního prostředí, aniž by došlo k jakýmkoliv změnám v její struktuře. Je to materiál, který klade jen minimální odpor difúzi vodních par, ale při správném návrhu není nutné ve skladbě užít parotěsnou zábranu. Tím se zajistí určitá prodyšnost pláště a minimalizuje se tak vznik plísní v interiéru.

Celulózová vlna:  $\rho=30-65 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\lambda=0,035-0,039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $c=1907 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\mu=1-3$

Aplikuje se ve formě foukané, stříkané nebo dutinové izolace. V případě zateplení šikmé střechy v obytném podkroví bývá volen způsob foukání celulózové vlny do dutiny. Jednoznačnou výhodou je možnost dokonalého zaizolování všech dutin libovolného tvaru. Dostupnost i na špatně přístupných místech, které by se daly jen obtížně provést běžnými způsoby. Přitom nedochází k sesedání materiálu. Stejně jako všechny materiály na přírodní bázi, také celulóza reguluje vlhkost v interiéru. Má dobré zvukově izolační vlastnosti a je difúzně propustná. Dalšími výhodami jsou bezodpadová technologie, možnost využití recyklátu a její výhřevnost je-li materiál likvidován.



Konopí, len, juta:  $\rho=30-40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\lambda=0,038-0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $c=2350 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\mu=1-2$

Rovněž tepelná izolace z přírodních vláken jednoletých rostlin jako jsou konopní, len a juta má vysokou měrnou tepelnou kapacitu. Jedná se o přírodní produkty s vysokou sorpcí vlhkosti. Jejich použití je vhodné pro difúzně otevřené skladby. Užívají se v kombinaci s dřevovláknitou izolací. Jedná se o materiály z obnovitelného zdroje a jsou kompostovatelné.

### *Podhledy s akumulací funkcí*

Další možností zabudování materiálu s akumulací funkcí je instalace podhledu s vyšší objemovou tepelnou kapacitou, namísto běžně používaného sádrokartonu nebo OSB desek. Lze dosáhnout fázového posunu teplotního kmitu až 12 hod i při použití tepelné izolace z minerální vaty.

Panely z lisované slámy:  $\rho=379 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\lambda=0,102 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $c=2400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\mu=13$

Kromě vysoké tepelné kapacity mají panely z lisované slámy také nízkou hodnotu měrné tepelné vodivosti, tudíž lze redukovat tloušťku tepelné izolace při tepelně technickém návrhu pláště. K výhodám patří, tak jako u jiných rostlinných produktů, zabudování CO<sub>2</sub>, nízká výrobní energie, kompostovatelnost a také výhřevnost při likvidaci.

Desky z nepálené hlíny:  $\rho=1170-1520 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\lambda=0,33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $c=2100 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\mu=4-6$

Hliněné nebo jílové panely s přídavkem pilin se využívají pro zvýšení tepelné akumulace konstrukce. Mohou sloužit také jako nosič stěnového vytápění. Jsou vysoce difúzně propustné, vyrovnávají vlhkost a tím regulují klima v interiéru. Jsou recyklovatelné, kompostovatelné a vyžadují minimální spotřebu energie na výrobu.

### **2.1.2 Reflexní fólie**

Reflexní fólie lze využít dvěma způsoby. Mají-li snižovat tepelné ztráty budovy, umísťují se co nejbližší k vnitřnímu povrchu skladby, naopak pro minimalizaci tepelných zisků se fólie klade na stranu exteriéru, pod střešní krytinu. V druhém případě reflexní fólie odráží tepelné záření sálající ze střešní krytiny, tím snižuje tepelné namáhání zbytku skladby. Zabezpečují též funkci pojistně hydroizolační, vyrábí se rovněž v difúzně otevřené



variantě propustné pro vodní páru. Hodnota emisivity reflexních fólií se pohybuje okolo 0,17, u některých výrobků dokonce 0,1.

Touto metodou lze docílit 23 – 45% snížení tepelného toku skrze střešní plášť a potřebu energie pro chlazení lze snížit o 6 – 20 % [20]. Miranville et al. [21] se zabývali chováním vícevrstvé reflexní izolace ve větraném střešním plášti v tropických podmínkách. Někteří autoři využili reflexní vrstvu pro redukci tepelného toku ze solárních kolektorů směrem do střešní skladby [7].

### 2.1.3 Větraná vzduchová vrstva

Toto konstrukční opatření spočívá ve vytvoření průběžné odvětrávané vzduchové vrstvy ve střešní skladbě. Je vymezena buď dvěma vzájemně rovnoběžnými plášti, nebo může být trojúhelníkového tvaru mezi střechou a stropem posledního podlaží nebo jejich vzájemnou kombinací. Pohyb vzduchu ve větrané vrstvě nastává vlivem rozdílných hustot vzduchu v dutině a ve venkovním prostředí, dále může být umocňován vlivem větru. Výměnu vzduchu v dutině lze zvýšit i nuceným větráním. Vzduch proudící v této vrstvě odvádí teplo hromadící se pod krytinou a přebytečnou vlhkost.

Úspěšnost uvedeného řešení však předpokládá dostatečné větrání vzduchové vrstvy, jež podléhá samostatnému návrhu. Je nutné zajistit dostatečně velkou plochu přiváděcích a odváděcích otvorů.

Tímto způsobem lze snížit tepelný tok skrze střešní plášť až o 50 % [11]. Existuje mnoho výzkumů zabývajících se optimální tloušťkou vzduchové vrstvy v závislosti na sklonu střešního pláště, délce větrané vrstvy a dalších faktorech [2], [4], [6], [8], [22]. Biwole et al. [6] se zabývali problematikou přehřívání jednoplášťových plechových střech a snažili se redukovat tepelné zisky již stávajících střech vytvořením horního pláště přidáním další vrstvy plechové krytiny, pod níž je ponechán prostor pro větranou vzduchovou vrstvu.

### 2.1.4 Typ a barva krytiny

V neposlední řadě jsou tepelné zisky střechou ovlivněny jejími povrchovými vlastnostmi, tedy vlastnostmi krytiny a materiálem, z něhož je vyrobena [23]. Barvu, materiál a

hladkost krytiny lze charakterizovat veličinami solární pohltivost a emisivita, a jsou schopny výrazně ovlivnit množství tepla prostupujícího střechou. Byla zavedena též veličina SRI (Solar Reflectance Index), která vyjadřuje solární vlastnosti krytiny [18]. Některé speciální druhy nátěrů odráží více záření v infračervené vlnové délce, tudíž i tmavší odstíny mohou mít relativně vysokou solární odrazivost [18].

Dle simulací Gentle et al. [24] má solární pohltivost výrazně vyšší vliv na snížení tepelných zisků než emisivita. Yu et al. [25] se snažili najít vhodnou tloušťku tepelné izolace střešního pláště pro různé barvy krytiny v rámci celoroční kalkulace pro různé klimatické oblasti Číny.

### 2.1.5 Vegetační střecha

U vegetační střechy dochází ke značnému snížení tepelného namáhání střešní skladby a přilehlého interiéru. Jednak má zemina vysokou tepelně akumulaci schopnost, ale dále napomáhá ke snižování teploty vypařování vody ze substrátu a rostlin a stínění vegetací. Např. Tabares-Velasco a Srebric [26] upřesnili výpočetní postupy jak uvažovat vegetační střechy v numerických výpočtech. Je zde zohledněno i vypařování vody ze substrátu a transpirace rostlin.

### 2.1.6 Materiály se změnou skupenství

Alternativou je zabudování materiálu na bázi parafínu, který má teplotu tání okolo 27 °C, při překročení této hodnoty se změní skupenství z pevného na kapalné. Touto fázovou změnou je spotřebována část tepla a docílí se nižších povrchových teplot stropu v interiéru. Až okolní teplota poklesne, hmota odevzdává teplo a postupně tuhne. Ideálními klimatickými podmínkami pro to, aby princip správně fungoval, je střídání horkých slunečných dní s chladnými nocemi.

Pasupathy a Velraj [27] se zabývali umístěním panelů z materiálu se skupenskou změnou ve střechě na těžkou nosnou konstrukci a zakryté vrstvou cihelné drtě a malty. Zkušební model však byl lokalizován v klimatických podmínkách nevhodných pro tento typ opatření, proto nebylo dosaženo optimálních výsledků.

### 2.1.7 Kombinace konstrukčních opatření

Pro zvýšení efektivity těchto jednotlivých konstrukčních opatření, může být přistoupeno k jejich vzájemné kombinaci. Yew et al. [28] měřili na modelech střešního pláště vliv speciálního reflexního nátěru (s obsahem oxidu titaničitého) a větrané vzduchové vrstvy tvořené systémem trubek, dosáhli teplotní redukce v podstřešním prostoru 13 °C. Roels a Deurinck [5], kteří zkoumali větraný střešní plášť se skládanou krytinou s níže umístěnou reflexní fólií, zjistili, že přínos reflexní fólie se projeví zejména ve spodní části střechy. Dle výsledků, které obdrželi z in situ měření, mohou ostatní vlivy, jako je netěsnost spodního pláště, vliv větru a komínový efekt v dutině střechy, negativně ovlivnit přínos reflexní fólie.

Větrané vzduchové vrstvy ve střešním plášti mohou být též konstruovány jako solární komín pohánějí přírozené větrání interiéru budovy. Prostor vzduchové vrstvy pod krytinou je úmyslně silně zahříván, např. provedením krytiny z plechu černé barvy. Ve spodní části dutiny je realizováno propojení s interiérem, v horní části jsou odváděcí otvory ven nad střechu. Touto problematikou se zabýval i DeBlois et al. [12].

## 2.2 Požadavky na vnitřní prostředí

*Pohoda vnitřního prostředí v budově se posuzuje pro kritickou místnost, tj. ta, kde se předpokládá největší teplotní namáhání. Hodnotí se následující kritérium.*

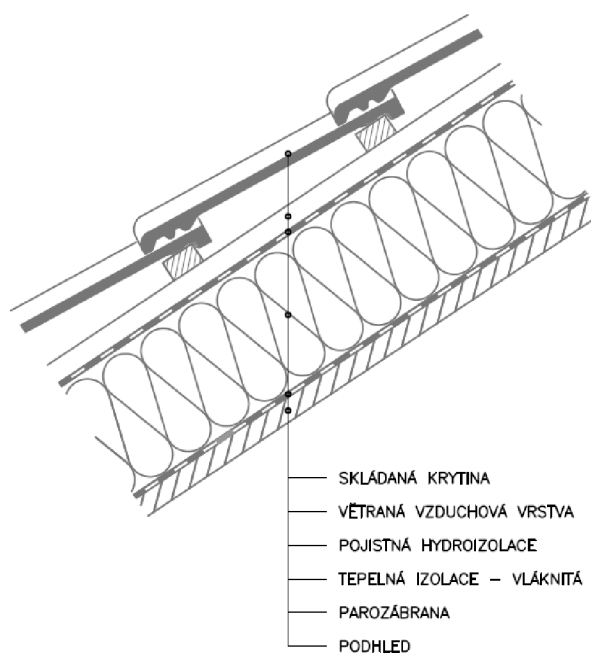
$$\theta_{ai,max} \leq \theta_{ai,max,N} \quad (4)$$

*kde  $\theta_{ai,max}$  je nejvyšší denní teplota vzduchu v místnosti [°C] a  $\theta_{ai,max,N}$  je požadovaná hodnota nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období [°C].*

*Pro nevýrobní budovy je ustanovena normová hodnota  $\theta_{ai,max,N} = 27$  °C. U obytných budov je možné připustit překročení požadované hodnoty nejvíce o 2 °C na souvislou dobu nejvíce 2 hodin během normového dne, pokud s tím investor souhlasí. [17]*

### 2.3 Typická střešní skladba realizovaná v ČR

Pro účely této práce je zaveden pojem „typická střešní skladba“, který označuje nejčastěji realizovanou skladbu šikmých střešních pláštů na daném území. Nejběžnějším konstrukčním řešením šikmých střech v České republice na rodinných a bytových domech je dřevěný krov s tepelnou izolací umístěnou mezi a pod krokvy a se skládanou střešní krytinou. Ze skládaných střešních krytin se nejčastěji vyskytují pálené keramické nebo betonové tašky. Tloušťka větrané vzduchové vrstvy by měla odpovídat normovému doporučení v Tab. 3, avšak v praxi se často odvíjí od výšky kontralatí, které stavebník použije, nejčastěji tento rozměr činí 30 – 50 mm. Pojistná hydroizolace bývá tvořena difúzně otevřenou fólií s emisivitou pohybující se okolo hodnoty 0,9. V tomto typu souvrství bývá volena měkká tepelná izolace většinou z minerálních vláken. Parozábrana zde bývá provedena z parotěsnící fólie lehkého typu. Podhled bývá tvořený deskovým materiálem, nejčastěji sádkokartónem, OSB deskami nebo dřevěnými palubovými prkny.



Obr. 1 Schéma typické lehké střešní skladby

Převážná většina těchto střech má problémy s přehříváním přilehlých podkrovních místností. Tato skladba vykazuje nedostatečnou účinnost chránění vnitřního prostoru před letními tepelnými zisky. Přehřívání interiéru je způsobeno především nízkou akumulační schopností této lehké skladby a nedostatečným větráním vzduchové vrstvy.

Konstrukce s plošnou hmotností do  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  označované jako lehké stavební konstrukce, tvořené především tepelným izolantem mají obecně problém udržet tepelnou stabilitu místnosti jak v zimním období během otopné přestávky, tak i v letním období. Větraná vzduchová vrstva v těchto střešních pláštích bývá navrhována z důvodu odvedení přebytečné vlhkosti v dimenzích dle normového doporučení [29]. Z hlediska letního období bývá výměna vzduchu ve větrané vrstvě nedostatečná, ale rovněž pro odvod vlhkosti bývají odváděcí otvory v oblasti hřebene poddimenzované. Norma ČSN 73 1901 uvádí, že pro snížení nežádoucích tepelných zisků má být proveden samostatný návrh vzduchové vrstvy, ale není zde uvedena metodika výpočtu ani odkaz na jinou normu.

## 2.4 Parametry větrané vzduchové vrstvy

Předběžný návrh větrané vzduchové vrstvy ve střešním plášti se řídí dle normy ČSN 73 1901. Jsou zde uvedeny doporučené tloušťky vzduchové vrstvy a plochy přírodních a odváděcích otvorů (Tab. 3). Doporučené dimenze mají být účelné pro odvedení vzdušné vlhkosti ze skladby, nikoliv pro redukci tepelných zisků. Má-li větraná dutina sloužit k tomuto účelu, je nutný samostatný návrh a posouzení. Už zde ale není uvedeno jakým způsobem. Dále je v této normě [29] řečeno, že uvedené dimenze větrání platí pro střechy se součinitelem prostupu tepla dle požadované hodnoty v ČSN 73 0540-2, tj.  $0,24 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ , pro střechy s lepší tepelně izolační schopností se doporučuje tloušťku větrané vzduchové vrstvy navýšit minimálně na 100 mm. V normě samotné odůvodnění k tomuto kroku uvedeno není. V rozhovoru s Ing. Karlem Sedláčkem, Ph.D. [30], odborníkem na větrané obvodové konstrukce a členem Technické normalizační komise, se k tomuto tématu vyjádřil následovně. Důvodem tohoto doporučení je zimní období, kdy je střecha zapadaná sněhem, krytina není zahřívána sluncem a větrání vázne. U méně zateplených střech dochází k ohřívání vzduchové vrstvy vlivem prostupujícího tepla z interiéru skrze střešní plášť, což má pomoci pohybu vzduchu v dutině. U více zateplených střešních plášťů již dutina není dotována teplem z interiéru, a proto by větrání měla podpořit větší tloušťka vzduchové vrstvy. Současně upozornil na to, že tento předpoklad není správný a že větší tloušťka vzduchové vrstvy v této situaci nepřispěje k proudění. Bylo to dokázáno měřením i výpočty a je uvažováno s vyškrtnutím tohoto doporučení v příští změně normy.

Tab. 3 Doporučené tloušťky větrané vzduchové vrstvy a velikosti větracích otvorů [29]

| Sklon vzduchové vrstvy | Min. tloušťka větrané vzduchové vrstvy [mm] | Plocha přiváděcích otvorů k ploše větrané střechy |
|------------------------|---|---|
| < 5°                   | 100   | 1/100   |
| 5° - 25°               | 60  | 1/200   |
| 25° - 45°              | 40  | 1/300   |
| > 45°                  | 40  | 1/400   |

Uvedené tloušťky vzduchové vrstvy jsou dány pro střešní konstrukci o maximální délce 10 m. Na každý další 1 m délky je třeba vzduchovou vrstvu navýšit o 10 %. Plocha odváděcích otvorů se zvětšuje zpravidla alespoň o 10 %. Plochy větracích otvorů jsou uvažovány jako čistá plocha po odečtení plochy větrací sítě či mřížky. [29]

## 2.5 Metodika hodnocení budov v letním období

Nejvýznamnější národní normou týkající se tepelné techniky budov je ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov, skládající se ze čtyř částí; Část 1: Terminologie [31], Část 2: Požadavky [17], Část 3: Návrhové hodnoty veličin [32] a Část 4: Výpočtové metody [33]. V části 2 [17] je z hlediska letního období kladen na budovu jediný požadavek, a sice zajištění tepelné stability místnosti v letním období. U nevýrobních objektů je požadováno, aby teplota vzduchu v místnosti nepřesáhla hodnotu 27 °C. Jedná-li se o obytnou budovu je přípustné překročení této hodnoty až o 2 °C po souvislou dobu nejvíce 2 hodin během normového dne, pokud s tím investor souhlasí. Hodnocení se provádí pro tzv. kritickou místnost, která je definována jako místnost s nejvyšší předpokládanou teplotou vzduchu v interiéru. Zpravidla se jedná o místnost s největší plochou prosklených výplní otvorů orientovaných západním, jihozápadním, jižním, jihovýchodním nebo východním směrem, v poměru k podlahové ploše dané místnosti. V Části 4 [33] této normy je uvedena metoda pro výpočet denního vzestupu teploty vzduchu v místnosti v letním období. Požadavek na tuto hodnotu však byl zrušen a nyní se již nevyhodnocuje. Dále je zde uvedeno, že při zjednodušeném výpočtu se užívá postupů uvedených v ČSN EN ISO 13792, při přesnějším výpočtu postup uvedený v ČSN EN ISO 13791, anebo lze užít

jakýkoliv jiný postup, který splňuje kritéria přesnosti výpočtu definované v těchto dvou evropských normách. Tyto dvě normy však již pozbyly platnosti a od dubna 2018 jsou nahrazeny skupinou evropských norem „Energetická náročnost budov“.

Dříve platná evropská norma ČSN EN ISO 13792 Tepelné chování budov – Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení – Zjednodušené metody [34] uváděla dva výpočetní postupy pro stanovení nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti. První z nich je RC-metoda založená na principu podobnosti s elektrickým obvodem. Kritická místnost je definována výpočetním modelem tvořeným uzly, odpory a kapacitami. V každém uzlu lze vyčíslit teplotu. Tepelné odpory se uvažují pro celé konstrukce nebo dílčí vrstvy, u hmotných konstrukcí lze zahrnout do výpočtu její tepelnou kapacitu. Druhou metodou uvedenou v této normě je metoda tepelné jímavosti. Ta zohledňuje časový posun hustoty tepelného toku v důsledku harmonického kolísání teploty a také činitel poklesu.

Nynější výpočetní postupy uvádí norma ČSN EN ISO 52017-1 [35], ty jsou srovnatelné s výpočetními postupy dřívější evropské normy ČSN EN ISO 13791 Tepelné chování budov – Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení – Základní kritéria pro validační postupy [36]. Při výpočtu je teplota vzduchu uvažována v celé místnosti stejná. Je uvažováno s jednorozměrným vedením tepla konstrukcemi, tedy povrch jednotlivé konstrukce má v celé ploše stejnou teplotu, a vliv tepelně akumulačních vlastností tepelných mostů je zanedbán. Rovněž tepelně fyzikální vlastnosti materiálů jsou konstantní, nejsou teplotně závislé. Vzduchové vrstvy jsou vymezené dvěma paralelními isothermními povrchy. Jsou zde uvedené postupy pro výpočet teploty vzduchu v místnosti, teploty vnitřních i venkovních povrchů. Dále je zde uveden výpočet pro soustavu bilančních rovnic potřebný pro kalkulaci místnosti jako celku. Vliv větrané vzduchové vrstvy, která je napojená pouze na venkovní prostředí, je započítán pomocí součinitele přestupu tepla a teplotního rozdílu mezi pláštěm a teplotou vzduchu v dutině. Součinitelé přestupu tepla jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 13789 [37]. Otázka tepelné akumulace je řešena v normě ČSN EN ISO 13786 [38]. Jsou tam definovány dva způsoby výpočtu tepelné kapacity stavebních konstrukcí, detailní a zjednodušený.



### 3 Cíle

Lehké střešní pláště představují nedostatečnou ochranu interiéru před působením letních klimatických podmínek. Rychlý postup „teplé vlny“ konstrukcí, tvořené převážně měkkou tepelnou izolací, se projeví brzkým prohřátím střešní konstrukce a následně i vzduchu uvnitř místnosti. Dojde-li ke zvýšení interiérové teploty nad únosnou hranici, není již zajištěna tepelná pohoda a pro uživatele to znamená snížení tepelného komfortu nebo dodatečné výdaje za pořízení chladicí jednotky a spotřebu energie na její provoz po celou dobu životnosti stavby.

Cílem disertační práce je nalezení jednoduchého stavebního opatření, které by redukovalo letní tepelné zisky skrze střešní plášť, a které bude možné realizovat na jakékoliv „typické lehké střešní konstrukci“. Návrh by měl vycházet z obecně známých konstrukčních opatření snižujících tepelné zisky, která však zatím nejsou v České republice příliš využívána.

Hlavní cíle této práce jsou následující:

- ověření jakou měrou ovlivní aplikace doporučených konstrukčních opatření pro redukcí tepelných zisků vnitřní povrchovou teplotu v místnosti u nízkoenergetické stavby;
- vyhodnocení účinnosti větrané vzduchové vrstvy během teplých letních dnů a parametry ovlivňující kvalitu proudění;
- navržení standardu metodiky přesného výpočtu šíření tepla střešním pláštěm;
- navržení konstrukčního opatření, kterým by se minimalizovalo případné přehřívání způsobené šířením tepla skrze střešní plášť.

Odvádění tepla z prostoru střešní skladby v úrovni větrané vzduchové vrstvy se jeví jako velmi efektivní, protože mezi střešní krytinou, která se zahřívá na vysokou teplotu [23] a proudícím vzduchem je nejvyšší teplotní gradient z celé střešní skladby, tudíž potenciální způsob jak odvést největší množství tepelné energie ze střešní konstrukce. Je-li zajištěna výměna vzduchu ve větrané vrstvě, je tím udržen vysoký teplotní gradient a je odváděno



více přebytečného tepla. Rovněž se tímto způsobem sníží množství tepla procházejícího dále skladbou.

Pro další snížení tepelných zisků se nabízí možnost kombinace větrané vzduchové vrstvy s jinými konstrukčními opatřeními. V rámci disertační práce je jedním z dílčích cílů ověření ovlivňování vzduchového proudu ve větrané vrstvě záměnou běžné pojistné hydroizolace s vysokou emisivitou za reflexní materiál s nízkou hodnotou emisivity. Dílčími cíly jsou:

- posouzení vlivu zvýšení tepelně akumulární schopnosti tepelné izolace a stropního podhledu na teploty ve střeše;
- posouzení vlivu reflexních povrchů v dutině pod krytinou na teploty ve střeše;
- posouzení vlivu barvy a materiálu krytiny na teploty ve střeše;
- monitorování rychlostního a teplotního pole ve větrané vzduchové vrstvě.

Dalším z dílčích cílů je ověření, jakým způsobem se projeví kombinace jednotlivých konstrukčních opatření a materiálových řešení na šíření tepla střešním pláštěm. Pro nalezení způsobu, jak zefektivnit rychlost proudění ve větrané vzduchové vrstvě a dalších konstrukčních opatření, je nezbytné popsání dějů přenosu tepla v dvouplášťové šikmé střešní konstrukci.

## 4 Teoretický základ práce a zvolené metody zpracování

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, cílem předložené práce je zlepšení tepelné pohody vnitřního prostředí během letního období v podkrovních místnostech změnou vlastností střešního pláště. Pozornost je soustředěna primárně na samotný střešní plášť. Tzv. typická střešní skladba charakterizovaná v kapitole 2.3 je modifikována různými konstrukčními opatřeními, kterými lze redukovat letní tepelné zisky skrze střešní konstrukci. Postupně jsou aplikována na tuto typickou střešní skladbu vybraná opatření uvedená v kapitole 2.1 a sledován jejich vliv na šíření tepla ve střešním plášti různými metodami, popsanými níže. Součástí práce je rovněž dynamická simulace podkrovní místnosti. Dále je pozornost soustředěna na samotnou větranou vzduchovou vrstvu. Jednak na teplotní a rychlostní profily, ale také na součinitel přestupu tepla a efektivitu větrání v dutině v závislosti na faktorech, jako jsou tloušťka větrané vzduchové vrstvy a emisivita povrchů. Dalším řešeným tématem, který má přímý vliv na kvalitu větrání dvouplášťové střešní konstrukce, jsou parametry krycí mřížky větracích otvorů.

Mezi použité metody v této práci patří experimentální měření, analýza dat, numerické modelování včetně validování modelu, dynamická simulace, parametrická studie. K modelování větrané vzduchové vrstvy a prostupu tepla střešním pláštěm bylo využito primárně simulačního softwaru COMSOL. Pomocné výpočty byly provedeny numerickým výpočtem v softwaru Microsoft Excel. Dynamická simulace včetně tepelné bilance větraného oproti nevětranému střešnímu plášti byla provedena pomocí programu TRNSYS a TRNFLOW.

V rámci optimalizace větrané vzduchové vrstvy byly zkoumány také vřazené odpory – krycí mřížky na příváděcích otvorech. Tlakové ztráty na mřížkách byly zjišťovány experimentálním měřením na ventilátorové dráze ve VZLÚ v Praze. Podrobná analýza vlivu geometrie otvorů mřížek byla provedena v softwaru ANSYS CFX a následně byla ověřena dalším měřením na ventilátorové dráze na prototypch modelovaných mřížek.

Vliv povrchových a materiálových vlastností různých typů střešní krytiny byl ověřen teplotním měřením v reálných exteriérových podmínkách. Pomocné měření hodnot

solární odrazivosti testovaných vzorků krytin bylo provedeno v laboratoři Fakulty stavební, VUT v Brně.

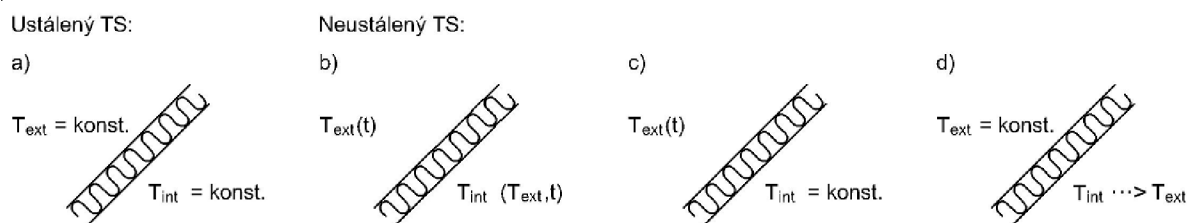
Význam reflexní fólie umístěné pod krytinou byl zkoumán počítačovou simulací v programu COMSOL a měřením na modelech střešního pláště v reálných letních klimatických podmínkách. Variantní řešení tepelné izolace a stropního podhledu za účelem zvýšení tepelné akumulace tepla ve střešním plášti bylo simulováno v programu COMSOL a ověřeno in-situ měřením.

### *Volba teplotních stavů pro počítačové simulace*

Významné zjednodušení tepelně technických výpočtů představuje jejich provádění pro ustálený teplotní stav. To však většinou není možné pro letní období. Předpokladem **stacionárního teplotního stavu** je konstantní teplota vzduchu v exteriéru i v interiéru (Obr. 2a), to si lze představit jako nevyčerpatelný zdroj tepla či chladu. Pro letní období by to znamenalo, že v objektu je instalováno chlazení. **Nestacionární teplotní stav** lze uvažovat trojího charakteru. První variantou je, když venkovní teplota je proměnná v čase a vnitřní teplota vzduchu se mění v čase v závislosti na průběhu venkovní teploty (Obr. 2b). Tento model se nejvíce podobá reálným podmínkám. Druhou variantou je zjednodušení, že vnitřní teplota vzduchu je konstantní a venkovní teplota je funkcí času (Obr. 2c). Znamenalo by to, že v interiéru je zdroj chladu, který udržuje stálou teplotu. Tento způsob nelze využít pro počítání denního vzestupu teploty a ani není vhodný pro orientační vzájemné porovnávání různých skladeb. Je dosahováno zcela odlišných výsledků než u modelů zahrnujících možnost ovlivnění teploty vnitřního vzduchu. Třetí varianta je ještě více zjednodušená, venkovní teplota je konstantní a vnitřní teplota, stejně jako teplota v celé skladbě, má počáteční teplotu různou od venkovní teploty (Obr. 2d). Tímto způsobem lze pozorovat proces ohřívání či chladnutí skladby, až následně dojde k vyrovnání teplot ve skladbě a vzduchu v interiéru na venkovní hodnotu.

Při zkoumání střešní skladby z hlediska letního období je cílem ověření schopnosti obálky budovy chránit interiér před tepelnými zisky ze slunečního záření a od vyšších venkovních teplot. Způsob jakým prověřit obvodové konstrukce je výpočet denního vzestupu teploty v místnosti. Podrobnější charakteristiku jednotlivých konstrukcí lze

získat pomocí dalších veličin, jako jsou teplotní útlum nebo fázový posun teplotního kmitu. Všechny tyto veličiny lze získat pouze výpočty vedenými v neustáleném teplotním stavu.



Obr. 2 Okrajové podmínky pro ustálený a neustálený teplotní stav

Následující kapitola pojednává o způsobech přenosu tepla, což je klíčové pro vysvětlení dalších fyzikálních fenoménů popisovaných dále v této práci. V kapitole 4.3 jsou stručně definovány vybrané fyzikální veličiny, které jsou dále diskutovány. V dalších kapitolách již následuje popis využití metodiky.

## 4.1 Způsoby přenosu tepla

Vzhledem ke skutečnosti, že se práce zabývá především šířením tepla střešními pláštěmi, je na místě přiblížit teorii třech způsobů šíření tepla – vedením, prouděním a sáláním.

### 4.1.1 Vedení tepla

Konduktce [39], [40], [41], [42] je nejběžnějším způsobem přenosu tepla ve stavebních konstrukcích. Probíhá v látkovém prostředí, zejména v pevných látkách. K přenosu dochází výměnou kinetické energie sousedících molekul. Šíření tepla nastává ve směru teplotního spádu, tj. ve směru opačném k teplotnímu gradientu.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (5)$$

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

Joseph Fourier, jako první popsal na základě experimentů šíření tepla v pevných látkách a definoval vztah (5), který je nazýván tzv. Fourierovým zákonem vedení tepla. Platí pro vedení tepla za **ustáleného (stacionárního) teplotního stavu**, tj. situace kdy rozložení

teplot v tělese je vyrovnané a nedochází k jeho změnám v čase. Původní jeho podoba byla pro jednorozměrné teplotní pole (6), odkud došlo k odvození pro trojrozměrné teplotní pole.

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Teplotní gradient  $grad T$  neboli  $\nabla T$  je vektorová veličina vyjadřující směr teplotního růstu, pro trojrozměrné teplotní pole tedy obsahuje tři směrové složky:

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (7)$$

Za ustáleného teplotního stavu lze předpokládat, v tělese tvořeném homogenním materiálem, lineární průběh teploty; teplotní gradient je ve všech místech tělesa konstantní. Hustota tepelného toku je plně závislá na velikosti teplotního gradientu a součiniteli tepelné vodivosti; rovněž jeho hodnota je konstantní v celém objemu tělesa.

V **neustáleném (nestacionárním) teplotním stavu** je teplota v daném bodě tělesa funkcí prostorových souřadnic  $x, y, z$  a času  $t$ . Na rozdíl od předchozího případu se teplotní gradient i hustota tepelného toku liší v různých místech tělesa a mění se i v čase.

$$T = f(x, y, z, t) \quad (8)$$

Při prostupu tepla  $Q$  [J] tělesem je vždy část tepla spotřebována na ohřev materiálu, o tuto část tepla je postupně snižován tepelný tok, proto i hodnoty hustoty tepelného toku  $q$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] nejsou v celém objemu tělesa konstantní, ale dochází k jejich poklesu ve směru šíření tepla.

$$Q = Q_1 - Q_2 = (q_1 - q_2) \cdot S \cdot \Delta t = -\Delta q \cdot S \cdot \Delta t \quad (9)$$

Vztah (9) uvádí rozdíl mezi množstvím tepla  $Q_1$  [J], které vstupuje do systému skrze plochu  $S$  [ $m^2$ ] za čas  $\Delta t$  [s] a množstvím tepla  $Q_2$  [J], které systém za stejný čas opouští.

$$Q = c \cdot \Delta m \cdot \Delta T = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta x \cdot \Delta T \quad (10)$$

Vztah (10) udává výpočet množství tepla, které je nutné dodat tělesu o objemu  $S \cdot \Delta x$  [ $m^3$ ] a měrné tepelné kapacitě  $c$  [ $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$ ] pro změnu jeho střední teploty o  $\Delta T$  [K].

Z rovnic (9) a (10) se pak získá diference hustoty tepelného toku

$$-\Delta q \cdot S \cdot \Delta t = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta x \cdot \Delta T \quad (11)$$

$$\Delta q = -\frac{c \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (12)$$

Derivací rovnice (6) lze dosáhnout vyjádření nerovnoměrnosti tepelného toku v neustáleném teplotním stavu v 1D teplotním poli a současně je z pravé strany rovnice (13) patrné, že i teplotní gradient je proměnný po tloušťce  $x$ .

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (13)$$

Dosazením vztahu (12) do rovnice (13) je získána rovnice vedení tepla v jednorozměrném prostoru:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (14)$$

Z původního jednorozměrného tvaru došlo posléze k zobecnění do dvourozměrného prostoru (15) a trojrozměrného prostoru (16)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

přičemž následující člen

$$\frac{\lambda}{c \cdot \rho} = \alpha \quad (17)$$

je nazýván součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Vztah (18) uvádí obecnou diferenciální rovnici vedení tepla.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

kde člen  $\dot{e}_{gen}$  vyjadřuje vnitřní energii generovanou tělesem na principu elektrického odporu, chemické reakce či nukleární reakce. U převážné většiny stavebních konstrukcí je tento člen roven nule  $\dot{e}_{gen} = 0$ .

Exaktní řešení obecné diferenciální rovnice pro trojrozměrné teplotní pole není možné, proto se přistupuje k řešení pomocí metody konečných prvků. Analytické řešení je možné použít při zjednodušení okrajových podmínek. Pro jednorozměrné vedení tepla za ustáleného teplotního stavu je hustota tepelného toku jednovrstvou konstrukcí ve směru teplotního gradientu konstantní a je vyjádřena vztahem:

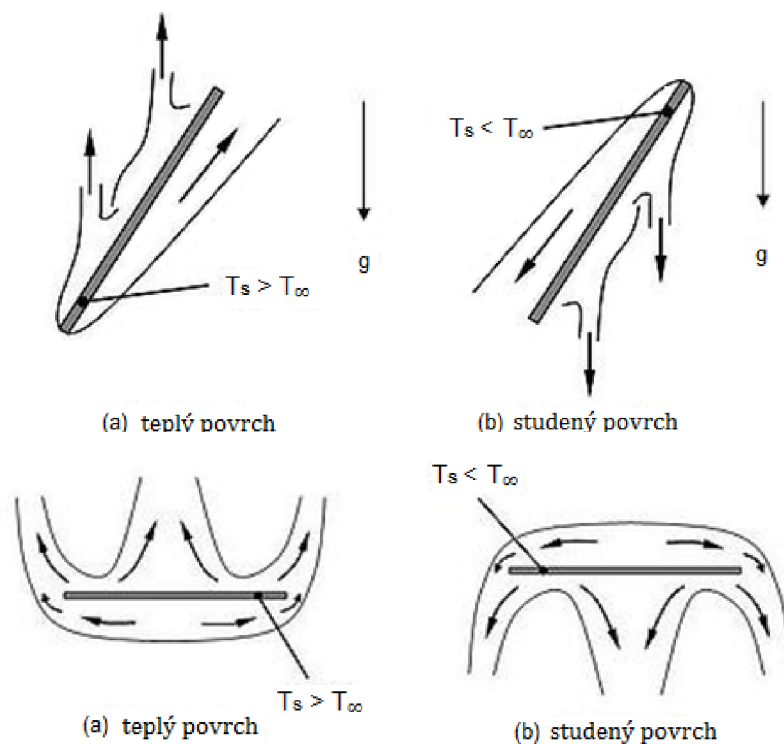
$$q = \frac{\lambda}{d}(T_1 - T_2) \quad (19)$$

kde  $T_1 - T_2$  je rozdíl povrchových teplot konstrukce [K],  $d$  je tloušťka konstrukce [m] a  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ].

#### 4.1.2 Proudění

Proudění [39], [40], [41], [42] nastává pohybem molekul látky, k čemuž může docházet pouze v kapalinách nebo plynech. Při šíření tepla v takovém prostředí, částice proudící tekutiny s sebou unášejí tepelnou energii, což je nazýváno **advekce**. Na rozhraní pevné a tekuté látky, dochází k tzv. **přestupu tepla**. Tento jev je ve skutečnosti zvláštním případem vedení tepla. Souhrnný název pro oba tyto jevy, odehrávající se při povrchu pevného tělesa, je **konvekce**.

U stavebních konstrukcí se lze nejčastěji setkat s rozhraním stěna – vzduch. Je-li vzduch ohříván kontaktem se stěnou vyšší teploty, pak při povrchu stěny vzniká vrstva teplejšího vzduchu, který se rozpíná a zároveň klesá jeho hustota. Vzduch z této vrstvy pak s využitím vztlakových sil stoupá vzhůru a nastává **přirozené proudění**. Velmi důležitý je vliv gravitace, mimo gravitační pole konvekce nenastává a teplo by se mohlo v tekutinách šířit pouze kondukcí. [43] Dále je důležitá orientace ochlazované plochy, která určuje tvar vzduchového proudu. To samé platí i v opačném případě, kdy je stěna chladnější než okolní prostředí.



Obr. 3 Tvar mezní vrstvy v tekutině proudí podél plochy: (a) teplejší, (b) chladnější než okolí [44]

Druhým případem je nucené proudění, kdy hnací síla proudění je generována vnějším zdrojem nikoliv teplotním rozdílem (např. vítr, ventilátor, samotahová hlavice, apod.) a rovněž udává rychlost a směr proudění.

Při proudění podél povrchu stěny se zde utváří tenká vrstva, nazývaná tzv. **mezní vrstva**. Její tloušťka může být různá a závisí na vlastnostech tekutiny, rychlosti proudění, teplotním rozdílu, apod. Podrobněji se problematikou mezních vrstev zabývají kapitoly 4.4 a 5.3. V mezní vrstvě se teplo šíří vedením i prouděním. Součinitel přestupu tepla  $h$  [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ] udává míru předávání tepla mezi tělesem a okolním proudem. Vyšší hodnota značí, že těleso předává více tepla tekutině. Je to proměnná veličina, která se může měnit v širokých mezích hodnot v závislosti na rychlosti a typu proudění podél stěny, teplotním rozdílu a na parametrech stěny. Kvůli složitosti přesného výpočtu, kterému je věnována kapitola 5.3, se ve zjednodušených výpočtech dává přednost tabulkovým hodnotám z norem [32], [37].



$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (20)$$

kde  $Nu$  je Nusseltovo číslo [-],  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ] a  $L$  je charakteristická délka [m]. Nusseltovo číslo udává poměr mezi mírou šíření tepla prouděním a vedením v mezní vrstvě a je stěžejní pro určení hodnoty součinitele přestupu tepla  $h$ .

$$Nu = f(Pr, Gr) = f(Ra) \quad (21)$$

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (22)$$

Prandtlovo číslo  $Pr$  je podobnostní číslo udávající poměr mezi kinematickou viskozitou tekutiny a součinitelem teplotní vodivosti. Grashofovo číslo  $Gr$  uvádí poměr mezi vztlakovou silou a viskozitou a vyjadřuje charakter přirozeného proudění (laminární či turbulentní). Reynoldsovo číslo  $Re$  vyjadřuje to samé pro nucené proudění, uvádí poměr setrvačné síly a viskozity. Pro přirozené proudění platí, že Nusseltovo číslo je funkcí Prandtlova a Grashofova čísla nebo také Rayleighova čísla. Naproti tomu u nuceného proudění je Nusseltovo číslo funkcí Reynoldsova a Prandtlova čísla. Nusseltovo číslo je výrazně ovlivňováno rychlostí proudění. Více je podobnostním číslem věnováno v kapitolách 4.4 a 5.3.

Rozeznávají se dva základní typy proudění podél povrchů – **laminární** a **turbulentní**. Při laminárním proudění se částice pohybují v rovnoběžných vrstvách. U turbulentního dochází k přenášení částic do různých vrstev tekutiny, čímž vznikají víry. Pravděpodobnost výskytu vírů se udává velikostí Reynoldsova čísla. Pro nízké hodnoty Reynoldsova čísla je proudění laminární, pro vysoké je turbulentní.

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (23)$$

kde  $Re$  je Reynoldsovo číslo [-],  $v$  je rychlost proudění vzduchu v daném průřezu [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $L$  je charakteristická délka [m] a  $\nu$  je kinematická viskozita vzduchu [ $m^2 s^{-1}$ ].

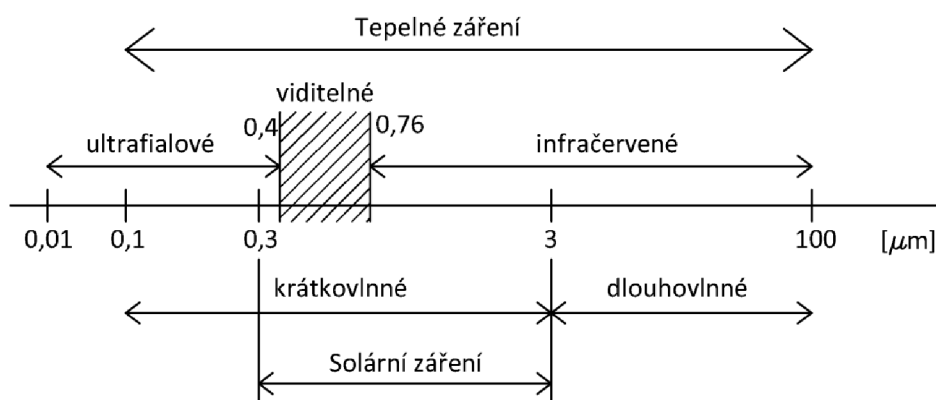
V obou případech, přirozeném i nuceném proudění, lze vyjádřit hustotu tepelného toku odebíranou tělesu proudící tekutinou pomocí Newtonova ochlazovacího zákona.

$$q = h \cdot (T_0 - T_1) \quad (24)$$

kde  $h$  je součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ],  $T_0$  je povrchová teplota tělesa a  $T_1$  teplota okolního prostředí [K].

### 4.1.3 Sálání

Záření [39], [40], [41], [42] jako jediné ze všech způsobů přenosu tepla nepotřebuje ke svému šíření látkové prostředí. Naopak nejefektivnější přenos probíhá ve vakuu. Tepelné záření je elektromagnetické vlnění o rozpětí vlnových délek 0,1 – 100  $\mu\text{m}$ . Nejúčinnější přenos tepla nastává při vlnových délkách 0,76 – 100  $\mu\text{m}$ , což odpovídá infračervenému záření. [43]



Obr. 4 Zatřídění tepelného záření dle intervalu vlnové délky [43]

Schopnost sálat teplo má jakékoliv těleso o teplotě vyšší než 0 K, to jsou všechna reálná tělesa. Byl zaveden pojem tzv. **černé těleso**, které představuje ideální těleso absorbující veškeré záření dopadající na jeho povrch. Zároveň je dokonalým zářičem, který dokáže vyzařovat záření všech vlnových délek stejně dobře. Udává limitní hodnoty, kterých reálné těleso nemůže dosáhnout. Množství energie vyzařované černým tělesem určité teploty je charakterizováno veličinou intenzity vyzařování, která je definována Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$e_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad (25)$$

kde  $e_b$  je intenzita vyzařování černého tělesa [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta  $\sigma = 5,67\cdot 10^{-8}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$ ] a  $T_s$  je teplota povrchu černého tělesa [K].

Energie vyzařovaná reálným tělesem je oproti černému tělesu stejné teploty vždy nižší, její hodnotu lze vypočítat ze vztahu (26).

$$e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (26)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{e_b} \quad (27)$$

kde  $e$  je intenzita vyzařování reálného tělesa [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] a  $\varepsilon$  je emisivita [-]. Emisivita je veličina vyjadřující míru vyzařování daného povrchu reálného tělesa v poměru k vyzařování černého tělesa. Je závislá na materiálu povrchu a dalších povrchových vlastnostech tělesa, jako jsou lesk a hrubost povrchu. Emisivita nabývá hodnot  $0 < \varepsilon < 1$ . Povrchy s nízkou emisivitou vyzařují malé množství energie oproti povrchu černého tělesa stejné teploty. Povrchy s vysokou emisivitou vyzařují podobné množství energie jako černé těleso.

Působí-li na těleso tepelný zářič, jiné těleso o vyšší teplotě, pak lze množství energie dopadající na první těleso označit za zářivou energii  $E$ , ale pouze část této energie je tímto tělesem pohlcena.

$$E_a = \alpha \cdot E \quad (28)$$

kde  $E_a$  je energie pohlcená tělesem [J],  $E$  je celková zářivá energie dopadající na těleso [J] a  $\alpha$  je pohltivost [-]. V souvislosti s touto problematikou je nutné zavést ještě další bezrozměrné veličiny odrazivost  $\rho$  a propustnost  $\tau$ . Zářivá energie dopadající na těleso se do dopadu rozloží do tří složek. První část energie se ihned odrazí, druhá část je tělesem pohlcena a třetí tělesem projde.

$$E = E_r + E_a + E_t \quad (29)$$

kde  $E_r$  je energie odražená od povrchu tělesa [J] a  $E_t$  je energie prošlá skrz tělesem [J].

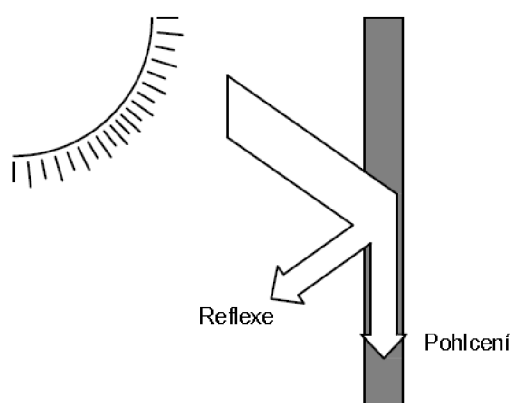
$$\frac{E_r}{E} + \frac{E_a}{E} + \frac{E_t}{E} = 1 \quad (30)$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (31)$$

Koeficienty  $\rho$ ,  $\alpha$  a  $\tau$  představují odrazivost, pohltivost a propustnost daného tělesa. Nabývají hodnot od 0 do 1. Pro dokonale *černé těleso* platí  $\alpha = 1$ , tedy veškerá dopadající energie je pohlcena. V případě, kdy je veškerá dopadající energie odražena, pak  $\rho = 1$ , to platí pro dokonale **bílá** nebo dokonale **zrcadlová tělesa**. Pokud přicházející energie projde beze zbytku  $\tau = 1$ , těleso je **diatermní**. Ve skutečnosti neexistují žádná tělesa, která by dopadající energii pouze odrazila, pohltila nebo propustila. Pro plyny, pokud jsou bez příměsí, se hodnota propustnosti blíží k jedné. Většina pevných látek nepropouští žádné tepelné záření, část se odrazí a zbytek je pohlcen (Obr. 5).

$$\tau \approx 0 \quad (32)$$

$$\rho + \alpha \approx 1 \quad (33)$$

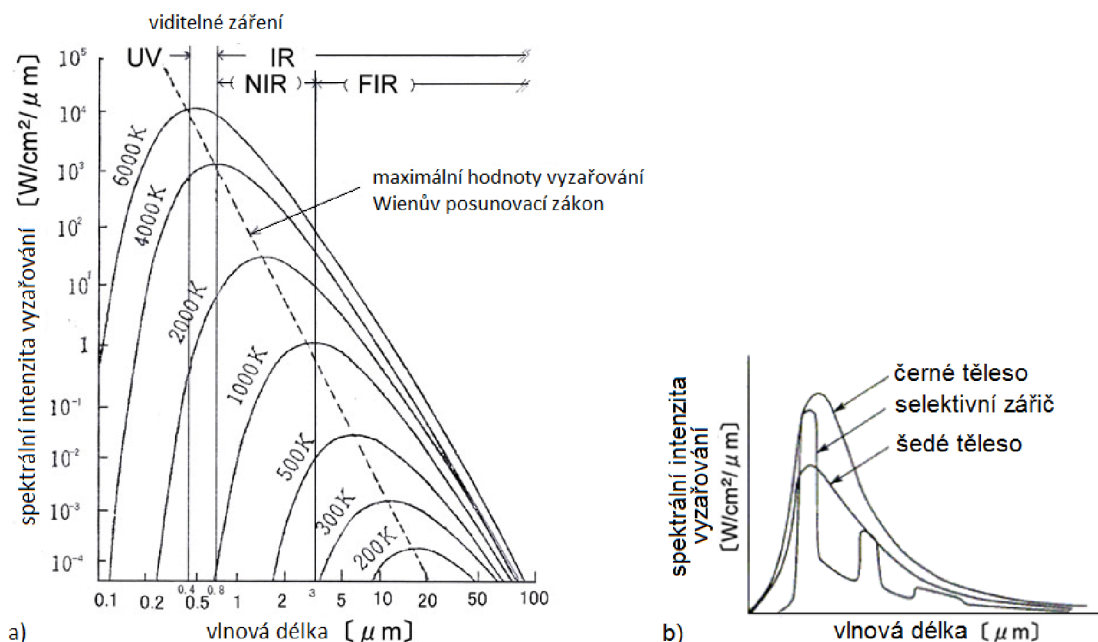


Obr. 5 Rozložení dopadající zářivé energie na pevné těleso do dvou složek

Každé těleso včetně černého vyzařuje zářivou energii v rozpětí vlnových délek  $\lambda$  a s proměnnými spektrálními intenzitami vyzařování  $i_\lambda$ . Wienův posunovací zákon konstatuje, že čím vyšší teplotu má černé těleso, tím s vyšší intenzitou září a současně více září v kratších vlnových délkách (Obr. 6a).

Spojnice vrcholů křivek v Obr. 6a, kterými jsou maximální hodnoty vyzařování pro každou teplotu, tvoří přímku, jež se dá matematicky zapsat ve tvaru (34) a nazývá se Wienova konstanta.

$$b = \lambda_{max}T = 2897,8 \text{ } [\mu\text{mK}] \quad (34)$$



Obr. 6 Distribuce spektrální intenzity vyzařování: a) černého tělesa o různých teplotách, b) černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče o stejné teplotě [45]

Tzv. **šedé těleso** vyzařuje v celém spektru stejně dobře. Ve srovnání s černým tělesem je průběh intenzity vyzařování šedého tělesa rovnoměrně menší, v závislosti na hodnotě emisivity. Svými vlastnostmi se šedé těleso více podobá reálným tělesům. Pokud jde však o těleso, které je tzv. **selektivním zářičem**, pak rozložení hodnot netvoří plynulou křivku (Obr. 6b). Selektivní zářič je těleso, které dokáže vyzařovat či pohlcovat tepelnou energii výrazně lépe v jistém pásmu vlnových délek a jinou část spektra výrazně utlumit.

Pouze dokonale černé těleso vyzařuje s maximálními spektrálními intenzitami  $i_{\lambda b}$  ve všech vlnových délkách pro danou teplotu tělesa. Podle Planckova vyzařovacího zákona:

$$i_{\lambda b} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1 \right]} \quad (35)$$

kde  $i_{\lambda b}$  je spektrální intenzita vyzařování černého tělesa  $[\text{W}\cdot\text{m}^{-3}]$ ,  $c_1$  je první konstanta Planckova zákona  $c_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ } [\text{W}\cdot\text{m}^2]$ ,  $c_2$  je druhá konstanta Planckova zákona

$c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  [m·K],  $\lambda$  je vlnová délka [m] a  $T$  je termodynamická teplota černého tělesa [K]. Hodnoty obou konstant jsou platné pro plynné prostředí či vakuum.

Integrací křivky spektrální intenzity vyzařování  $i_{\lambda b}$  lze získat integrální intenzitu vyzařování černého tělesa  $H_b$  (36). Stejného postupu lze užít i u šedého a jakéhokoliv reálného tělesa, plocha grafu pod křivkou znázorňuje kolik zářivé energie je těleso schopno vyzářit.

$$H_b = \int_0^{\infty} i_{\lambda b} d\lambda \quad (36)$$

$$H_b = e_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad (37)$$

kde  $H_b$  je integrální intenzita vyzařování černého tělesa [ $W \cdot m^{-2}$ ].

Hodnoty emisivity, pohltivosti, odrazivosti a propustnosti nejsou konstantní v celém spektrálním pásmu, u reálných těles existuje pro každou vlnovou délku lokální hodnota těchto koeficientů. Často se používají průměrné hodnoty pouze pro určitou část spektra nebo pro celou šířku spektra. Např. průměrnou hodnotu emisivity reálného tělesa lze obdržet z následujícího vztahu

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \cdot i_{\lambda, b}(\lambda, T) d\lambda}{H_b(T)} \quad (38)$$

kde  $\varepsilon(T)$  je totální hemisférická emisivita [-],  $\varepsilon_{\lambda}$  je spektrální hemisférická emisivita [-],  $i_{\lambda b}$  je spektrální intenzita vyzařování černého tělesa [ $W \cdot m^{-3}$ ] a  $H_b$  je integrální intenzita vyzařování černého tělesa v závislosti na čase [ $W \cdot m^{-2}$ ].

Kirchhoffův zákon říká, že povrch tělesa vyzařuje stejné množství energie, jako pohlcuje (39). U reálných těles, kde emisivita a pohltivost jsou proměnné s vlnovou délkou, to však znamená, že pro každou jednotlivou vlnovou délku spektra elektromagnetického záření povrch pohltí a vyzáří stejné množství energie, čímž je definována spektrální emisivita  $\varepsilon_{\lambda}$ , respektive spektrální pohltivost  $\alpha_{\lambda}$  (40).

$$\alpha_b = \varepsilon_b \quad (39)$$

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \quad (40)$$

Sluneční záření, jenž má rozpětí vlnových délek 0,3 – 3  $\mu\text{m}$ , je důležitým zdrojem záření v inženýrských úlohách. Zatímco vyzařování tepelné energie ohřátých těles se uskutečňuje v dlouhých vlnových délkách spektra, sluneční záření je krátkovlnného charakteru. Emisivita, nebo-li tepelná emisivita, je vztažena k jistému pásmu vlnových délek, ve kterém tělesa sama emitují, tj. dlouhovlnné záření. Mnoho reálných těles však reaguje jiným způsobem na krátkovlnné záření, vysílané sluncem. Proto bylo důležité zavést koeficienty solární pohltivosti  $\alpha_{sol}$ , solární odrazivosti  $\rho_{sol}$  a solární propustnosti  $\tau_{sol}$ .

$$\rho_{sol} + \alpha_{sol} + \tau_{sol} = 1 \quad (41)$$

Pro šedá tělesa platí, že jejich emisivita je konstantní v celém spektru stejně tak jako pohltivost a tyto veličiny jsou si rovny. U reálných těles, která se nechovají jako šedá tělesa však toto neplatí.

#### *Dlouhovlnné versus krátkovlnné záření*

Každé reálné těleso má schopnost vyzařovat tepelnou energii. Záření sálající z tělesa má zastoupení všech vlnových délek, ale v odlišných intenzitách, v závislosti na teplotě tělesa. Převládající vlnová délka je závislá na termodynamické teplotě zdroje záření. Hraniční teplota je stanovena na 800 K (cca 527 °C). Zdroje s teplotou nižší než 800 K produkují především **dlouhovlnné** záření, např. otopná tělesa nebo tělesa ohřátá slunečním zářením. Zdroje s teplotou vyšší než 800 K vydávají převážně **krátkovlnné** záření, např. slunce či elektrické zářiče. Za krátkovlnné záření se považuje sálání o vlnových délkách přibližně 0,1  $\mu\text{m}$  – 3  $\mu\text{m}$ . Dlouhovlnné záření nabývá vlnových délek cca 3  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$ .

Sluneční paprsky dopadající na stavební konstrukci mají charakter krátkovlnného záření. Záření o této vlnové délce má schopnost prostupovat průsvitnými stavebními konstrukcemi, např. sklem. Tepelné záření sálané stavebními konstrukcemi má charakter dlouhovlnného záření, které již nemá schopnost prostupu průsvitnými konstrukcemi, ale je jimi pohlcováno. To je důvodem přehřívání místností s velkou plochou prosklených konstrukcí.

## 4.2 Matematická formulace sálání na površích střešního pláště

Reflexní fólie zabudovaná na horním povrchu tepelně izolační vrstvy, současně plnící funkci difúzně otevřené pojistné hydroizolace, má svůj líc orientovaný vzhůru směrem ke spodnímu povrchu krytiny. Svými fyzikálními vlastnostmi z části odráží sálavou složku tepelného toku. Reflexní povrchy vynikají vysokou hodnotou směrové spektrální odrazivosti. Po nějaké době expozice reflexní fólie klimatickým podmínkám a venkovnímu prostředí, při klasickém zabudování ve střešním plášti, dojde k vytvoření nánosu prachu a nečistot na jejím povrchu, viz Obr. 37. Z tohoto důvodu se její přínos ke snižování teploty v interiéru jeví jako sporadický a v některých zemích, jako například v Nizozemí, není přípustné ji zohledňovat ve výpočtech. [46]

### *Sálání střešního pláště k obloze*

Tak jako každý předmět o teplotě vyšší než 0 K, i střešní plášť si vyměňuje energii sáláním se svým okolím. Horní povrch krytiny je orientovaný směrem k obloze, tudíž jí odevzdává část své tepelné energie. Hustotu tepelného toku směrem k obloze  $q_{lr}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] lze vyjádřit vztahem

$$q_{lr} = F_{sky} \varepsilon_e \sigma (T_e^4 - T_{sky}^4) \quad (42)$$

kde  $F_{sky}$  je faktor osálání mezi povrchem konstrukce a oblohou [-], pro nestíněnou střešní plochu je hodnota rovna jedné.  $\varepsilon_e$  je emisivita horního povrchu krytiny [-],  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$ ],  $T_e$  je teplota horního povrchu krytiny [K] a  $T_{sky}$  je zdánlivá teplota oblohy [K]. Teplota oblohy závisí na několika faktorech: na výskytu oblačnosti, obsahu vodní páry ve vzduchu a teplotě vzduchu. Problematika teploty oblohy je podrobněji popsána v kapitole 5.3. Při některých metodách výpočtu je nutné přistoupit k linearizaci rovnice (42), přičemž je obdrženo tvar

$$q_{lr} = F_{sky} 4\varepsilon_e \sigma T_m^3 (T_e - T_{sky}) \quad (43)$$

kde  $T_m$  je střední termodynamická teplota povrchu a oblohy [K].



### *Sálání mezi dvěma povrchy v dutině*

Stejně tak probíhá přenos tepla radiací ve větrané vzduchové mezeře, kde dochází ke vzájemnému sálání horního a spodního střešního pláště. Sálání mezi dvěma paralelními rovinami lze vyčíslit hustotou tepelného toku  $q_{lr,cav}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$$q_{lr,cav} = \frac{\sigma(T_{cav,1}^4 - T_{cav,2}^4)}{1/\varepsilon_{cav,1} + 1/\varepsilon_{cav,2} - 1} \quad (44)$$

kde  $T_{cav,1}$  a  $T_{cav,2}$  jsou teploty spodního povrchu krytiny a horního povrchu spodního pláště [K],  $\varepsilon_{cav,1}$  a  $\varepsilon_{cav,2}$  jsou emisivity příslušných povrchů [-].

### *Sálání stropního povrchu*

Sálání stropního povrchu do interiéru místnosti  $q_{lr,int}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] nepředstavuje ve většině případů významnou položku v bilanci tepelných toků. Pro jeho přesné vyčíslení je třeba znát teploty všech okolních povrchů v místnosti a příslušné faktory osálání, což je nejvýhodnější spočítat v rámci dynamické simulace, např. v programu TRNSYS. Rovněž je pro výpočet třeba znát souhrnný odpor při přestupu tepla  $R_{si}$ , uvedený v kapitole 5.3.

$$q_{lr,int} = \frac{1}{R_{si}} (T_i - T_{int}) \quad (45)$$

kde  $T_i$  je teplota stropního povrchu a  $T_{int}$  je teplota vzduchu v interiéru [K].

## **4.3 Vybrané fyzikální veličiny**

V této kapitole jsou definovány fyzikální veličiny, které jsou klíčové v problematice šíření tepla a přirozeného proudění nebo jsou důležité pro vysvětlení některých jevů popsaných dále v této práci.

### *Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ]*

Tuto veličinu definoval Fourier [42], jako teplo prošlé materiálem za jednotku času a plochy, při jednotkovém teplotním gradientu v ustáleném teplotním stavu. Lze ji vyjádřit také jako výkon, který projde  $1 \text{ m}^2$  desky o tloušťce  $1 \text{ m}$ , jejíž jedna strana má teplotu o  $1 \text{ K}$  vyšší než druhá. Vyjadřuje schopnost látky vést teplo, ta roste se zvyšujícími se hodnotami této veličiny. Nejmenších hodnot nabývají plyny, proto jsou dobrými

tepelnými izolanty materiály obsahující uzavřené vzduchové dutiny. Tepelná vodivost je především dána objemovou hmotností, s její klesající hodnotou klesá i součinitel tepelné vodivosti. Anizotropní materiály (např. dřevo) mají různé hodnoty součinitele tepelné vodivosti v různých směrech tepelného toku. Dále je ovlivněna vlhkostí materiálu, s rostoucím obsahem vlhkosti klesá součinitel tepelné vodivosti.

#### *Tepelný tok $\Phi$ [ $W = J \cdot s^{-1}$ ]*

Tepelný tok [42] udává množství tepla  $Q$  [J] přenesené za jednotku času  $t$  [s].

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (46)$$

#### *Hustota tepelného toku $q$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]*

Je definována [42] jako tepelný tok  $\Phi$  [W] na jednotku plochy  $S$  [m<sup>2</sup>]. Při ustáleném teplotním stavu je hustota tepelného toku po tloušťce průřezu konstantní. Při neustáleném teplotním stavu má klesající tendenci z důvodu, že se vždy část tepla spotřebuje na ohřátí materiálu.

$$q = \frac{d\phi}{dS} \quad (47)$$

#### *Tepelná propustnost $\Lambda$ [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]*

Je vyjádřena jako hustota tepelného toku  $q$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] při jednotkovém teplotním rozdílu  $\Delta T$  [K] nebo také tepelná vodivost  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ] připadající na jednotkovou vzdálenost  $\Delta x$  [m], např. tloušťku materiálu.

$$\Lambda = \frac{q}{\Delta T} = \frac{\lambda}{\Delta x} \quad (48)$$

#### *Tepelný odpor $R$ [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]*

Vyjadřuje schopnost stavební konstrukce odolávat tepelnému namáhání. Je stěžejní veličinou pro hodnocení konstrukcí z hlediska zimního období.

$$R = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (49)$$

kde  $d_j$  je tloušťka  $j$ -té vrstvy stavební konstrukce [m] a  $\lambda_j$  je součinitel tepelné vodivosti  $j$ -té vrstvy [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ].

Pro stavební konstrukce se určuje celkový tepelný odpor  $R_{tot}$ , kde je zahrnut vliv přechodové vzduchové vrstvy na straně interiéru i exteriéru. Povrchové tepelné odpory  $R_{si}$  a  $R_{se}$  lze určit z tabulek v normě [32] nebo vlastním výpočtem, přičemž tepelný odpor mezní vrstvy je převrácenou hodnotou součinitele přestupu tepla  $h$ .

$$R_{tot} = R_{si} + R + R_{se} \quad (50)$$

kde  $R_{si}$  je odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [ $\text{m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ] a  $R_{se}$  je odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [ $\text{m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ].

#### *Součinitel prostupu tepla $U$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]*

Je obrácenou hodnotou celkového tepelného odporu  $R_{tot}$ . V současnosti je hlavním kritériem tepelně technického hodnocení konstrukcí.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (51)$$

#### *Měrná tepelná kapacita $c$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]*

Udává množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg látky o 1 teplotní stupeň. Někdy je zaváděna tzv. plošná tepelná kapacita, ta se dá vyjádřit jako množství tepla, které konstrukce pohltí/vydá při ohřátí/ochlazení o 1 °C. Nebo objemová tepelná kapacita, která udává množství tepla potřebné k ohřátí objemové jednotky materiálu.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (52)$$

kde  $Q$  je teplo potřebné k ohřátí tělesa [J],  $m$  je hmotnost tělesa [kg],  $\Delta T$  je teplotní rozdíl, o který se zvýší ohřívána látka [K].

Měrné tepelné kapacity stavebních materiálů se zjišťují zkouškou. Tato veličina je mírně teplotně závislá, tudíž se hodnoty mohou pro různé teploty lišit, většinou se však ve stavební praxi považuje za konstantu. Hodnoty měrné tepelné kapacity se u stavebních materiálů pohybují v těchto mezích [42]:

$c = 840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  .....anorganické látky;

$c = 1250 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ .....organické látky umělého původu a smíšené anorganicko-organické;

$c = 1880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ .....organické látky přirozeného původu;

$c = 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ .....voda.

U plynů se rozlišuje měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku  $c_p$ , kdy se plyn během zvyšování teploty rozpíná a koná práci a měrná tepelná kapacita za konstantního objemu  $c_v$ , kdy se v objemu plynu zvyšuje tlak.  $c_p$  mívá vždy vyšší hodnotu. Poměr mezi nimi udává Poissonova konstanta  $\gamma = c_p/c_v$ , pro vzduch je  $\gamma = 1,4$ . U nestlačitelných plynů je  $c_p = c_v = c$ .

### *Tepelná kapacita $C$ [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ]*

Je definována jako podíl tepla dodaného látce a následné teplotní změny. Má význam s ní uvažovat jen u neustáleného teplotního stavu.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (53)$$

kde  $Q$  je teplo potřebné k ohřátí tělesa [ $\text{J}$ ] a  $\Delta T$  je teplotní rozdíl, o který se zvýší ohřívaná látka [ $\text{K}$ ].

Vztah mezi tepelnou kapacitou  $C$  a měrnou tepelnou kapacitou  $c$  je následující:

$$C = c \cdot m \quad (54)$$

kde  $m$  je hmotnost tělesa [ $\text{kg}$ ].

### *Součinitel teplotní vodivosti $\alpha$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]*

Tato veličina vyjadřuje poměr schopností materiálu vést teplo a uchovávat tepelnou energii ve své hmotě. Projeví se pouze při neustáleném teplotním stavu. Určuje, jak rychle se vyrovnají teplotní rozdíly v daném místě. Čím vyšší je jeho hodnota, tím rychleji dochází k vyrovnání teplot v tělese. Lze jej získat experimentálně nebo výpočetně:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (55)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  $\rho$  je objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] a  $c$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ].

#### *Tepelná jímavost $b$ [ $\text{W}^2\text{s}\cdot\text{m}^{-4}\text{K}^{-2}$ ]*

Vyjadřuje schopnost materiálu přijímat teplo, charakterizuje akumulční vlastnosti. Čím je její hodnota vyšší, tím má materiál větší schopnost akumulovat v sobě teplo. Tato veličina se používá často v souvislosti s ochlazovacím účinkem na živý organismus, tzn. schopnost odebírat teplo při dotyku osoby. Dotykem se zdá být chladnější ten materiál, který má větší tepelnou jímavost.

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho \quad (56)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  $c$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] a  $\rho$  je objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

#### *Thermal inertia / thermal effusivity $i/e$ [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1} \text{s}^{-1/2}$ ]=[TIU]*

V zahraniční literatuře bývá obdoba tepelné jímavosti nazývána „thermal inertia“  $i$  nebo také „thermal effusivity“  $e$  a je její odmocninou. Dá se přeložit jako tepelná setrvačnost. Oproti tepelné jímavosti se však často používá v souvislosti tepelnou setrvačností konstrukce a její schopností akumulace tepla. Vyjadřuje schopnost materiálu vést a akumulovat teplo, tedy množství tepla a rychlost s jakou materiál může absorbovat tepelnou energii. Čím vyšší je hodnota této veličiny u konkrétního materiálu, tím déle trvá jeho ohřátí, a také jeho ochlazení, což je dáno tím, že dokáže pojmout více tepla.

$$i = e = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \quad (57)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  $c$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] a  $\rho$  je objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

### *Fázový posun teplotního kmitu $\psi$ [h]*

Udává časový rozdíl mezi maximální teplotou vzduchu vnějšího prostředí a maximální teplotou vnitřního povrchu konstrukce (Obr. 7).

$$\psi = \tau_{Asi} - \tau_{Ae} \quad (58)$$

$\tau_{Asi}$  je doba výskytu maximální teploty na vnitřním povrchu [h] a  $\tau_{Ae}$  je doba výskytu maximální venkovní teploty [h].

Přibližně lze fázový posun stanovit:

$$\psi = 2,7 \cdot D \quad (59)$$

kde  $D$  je tepelná setrvačnost konstrukce [-].

Metodika výpočtu je uvedena v normě ČSN 73 0540-4.

### *Teplotní útlum $v$ [-]*

Vyjadřuje schopnost stavební konstrukce tlumit její teplotní namáhání (Obr. 7). Z hlediska letního období je důležitou veličinou, která má rovněž vliv na tepelnou stabilitu místnosti. Udává poměr amplitud venkovní teploty  $A_e$  [°C] a vnitřní povrchové teploty  $A_{si}$  [°C].

$$v = \frac{A_e}{A_{si}} > 1 \quad (60)$$

Přibližný výpočet se zahrnutím vlivu akumulace [41]:

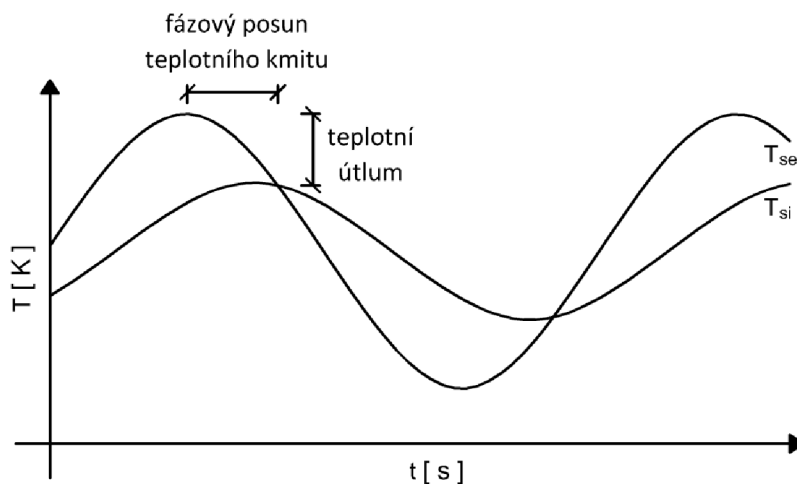
$$v = 0,7 \cdot \exp \frac{D}{\sqrt{2}} \cdot \frac{s_1 + U_0}{s_1 + U_1} \cdot \frac{s_2 + U_1}{s_2 + U_2} \cdot \dots \cdot \frac{s_n + U_{n-1}}{s_n + U_n} \cdot \frac{\frac{1}{R_e} + U_n}{\frac{1}{R_e}} \quad (61)$$

kde

$$s_j = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_j \cdot c_j \cdot \rho_j}{\tau}} = \omega \cdot b \quad (62)$$

$$D = \sum_{j=1}^n (R_j \cdot s_j) \quad (63)$$

$s_j$  je tepelná pohltivost  $j$ -té vrstvy [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $U_j$  je tepelná pohltivost povrchu  $j$ -té vrstvy [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $D$  je tepelná setrvačnost konstrukce [-] a  $\tau$  je časový interval jednoho dne  $\tau = 86400$  [s].



Obr. 7 Grafické znázornění fázového posunutí teplotního kmitu a teplotního útlumu

#### Časové zpoždění (časový posun) $\tau_0$ [h]

Jedná se o totožnou veličinu, jako je fázový posun teplotního kmitu. Pod tímto názvem byla uvedena v normě ČSN EN ISO 13792, kde byla také metodika výpočtu.

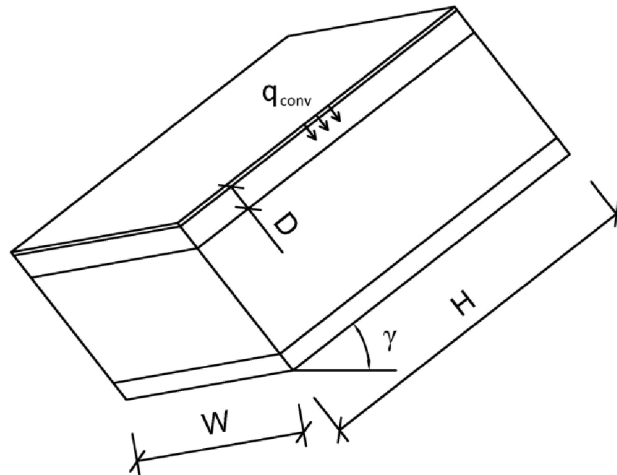
#### 4.4 Principy přirozeného proudění ve větrané dvouplášťové střeše

Ve větrané vzduchové vrstvě vymezené horním a spodním střešním pláštěm nastává za neizotermních podmínek přirozené proudění [44], [47], [72]. Je-li horní plášť ohříván slunečními paprsky, pak tepelný tok prostupující skrze střešní krytinu zahřívá vzduch v dutině. Tento vzduch zvyšuje svoji teplotu, a tím současně dochází ke změně jeho hustoty. Vzniká tlakový rozdíl mezi tlakem vzduchu v dutině a tlakem vzduchu okolního prostředí. Tento vztah je vyjádřen rovnicí (64).

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H \cdot \sin \gamma \quad (64)$$

kde  $\Delta P$  je tlakový rozdíl [Pa],  $\rho$  je referenční hustota vzduchu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $\beta$  je součinitel teplotní objemové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ],  $\Delta T$  je teplotní rozdíl

odváděného a venkovního vzduchu [K],  $H$  je vzdálenost přívaděcích a odváděcích otvorů [m] a  $\gamma$  je sklon střechy od vodorovné roviny [°].



Obr. 8 Schéma větraného střešního pláště

Na základě tlakového rozdílu opouští teplejší vzduch vzduchovou dutinu a na jeho místo se posouvá vzduch z nižší polohy dutiny. Pohyb vzduchové masy v dutině je brzděn třecími silami na vnitřních površích, vyjádřeno veličinou smykové (tečné) napětí [Pa]:

$$\tau_w = f \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \quad (65)$$

kde  $f$  je součinitel smykového tření [-],  $\rho$  je hustota vzduchu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] a  $u$  je průměrná rychlost proudění [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Vzorec pro výpočet součinitele smykového tření se liší v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla, počítaného z hydraulického průměru vzduchové dutiny. Pro větrané střešní pláště, tj hodnoty  $Re_D < 2 \cdot 10^5$  je

$$f = 0,079 Re_D^{-1/4} \quad (66)$$

kde Reynoldsovo číslo:

$$Re_D = \frac{u \cdot D_H}{\nu} \quad (67)$$

kde  $\nu$  je kinematická viskozita vzduchu [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ] a  $D_H$  je hydraulický průměr [m]:

$$D_H = \frac{4DW}{2(D+W)} \quad (68)$$



kde  $D$  je vzdálenost horního a dolního pláště [m] a  $W$  je šířka větraného průřezu [m].

Hmotnostní průtok vzduchu  $\dot{m}$  [kg·s<sup>-1</sup>] větranou dutinou je definován

$$\dot{m} = \rho \cdot u \cdot D \cdot W \quad (69)$$

Tlakovou ztrátu třením  $\Delta P_f$  lze získat ze vztahu (70), který uvádí do rovnováhy tlakovou ztrátu na konci dutiny na straně levé a smykové tření na horním a dolním plášti na straně pravé.

$$\Delta P_f \cdot D \cdot W = 2\tau_w \cdot W \cdot H \quad (70)$$

kde  $D$  je tloušťka,  $W$  je šířka a  $H$  je délka větrané vzduchové dutiny [m], viz Obr. 8.

Z rovnic (65), (69) a (70) lze obdržet tvar

$$\Delta P_f = \frac{f \dot{m}^2 H}{\rho D^3 W^2} \quad (71)$$

Rozdíl mezi tlakovou diferencí  $\Delta P$  a tlakovými ztrátami  $\Delta P_f$  rozhoduje o tom, zda bude docházet v dutině k proudění či nikoliv a na rychlosti proudícího vzduchu.

Aplikací zákona zachování energie na větraný střešní plášť lze získat rovnicí

$$\dot{m} c_p \Delta T = q_{conv} HW \quad (72)$$

kde  $q_{conv}$  je tepelný tok z horního pláště šířící se konvekcí do vzduchové vrstvy [W·m<sup>-2</sup>].

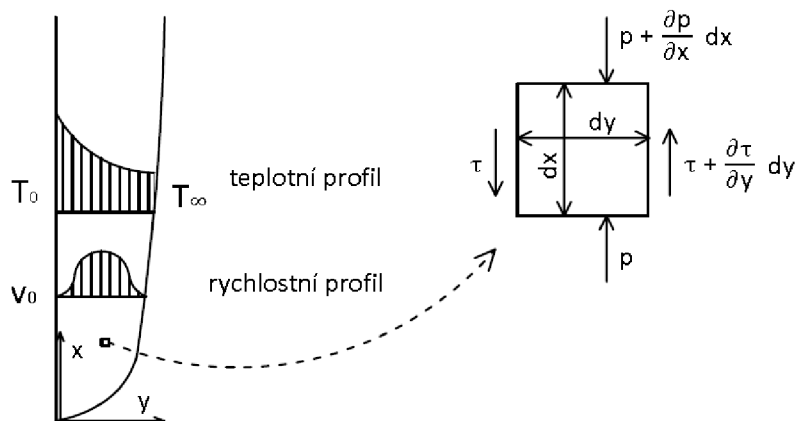
Následně uvedením rovnic (64), (71) a (72) do rovnováhy lze získat vztah pro výpočet teplotního vzestupu  $\Delta T$  ve směru proudění a také hmotnostního průtoku  $\dot{m}$  ve větrané vzduchové vrstvě.

$$\Delta T = \left[ \frac{f q_{conv}^2 H^2}{\rho^2 c_p^2 D^3 g \beta \sin \gamma} \right]^{1/3} \quad (73)$$

$$\dot{m} = DW \left[ \frac{q_{conv}^2 \rho^2 H g \beta \sin \gamma}{c_p f} \right]^{1/3} \quad (74)$$

#### 4.4.1 Přirozené proudění podél horké plochy

Při přirozeném proudění podél svislé stěny o teplotě  $T_s$ , jež je vyšší než teplota okolního vzduchu  $T_\infty$ , vzniká tepelná mezní vrstva parabolického tvaru (Obr. 9). Na nahodile vybraný element o rozměrech  $dx$ ,  $dy$  působí síla  $F_x$  ve směru proudění a na jeho plochy působící tlaky a tečná napětí. [43]



Obr. 9 Přirozené proudění podél plochy o vyšší teplotě než okolní prostředí [43]

$$F_x = \delta m \cdot a_x \quad (75)$$

$$\delta m = \rho(dx \cdot dy \cdot 1) \quad (76)$$

$$a_x = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (77)$$

kde  $F_x$  je síla působící ve směru osy  $x$  [N],  $\delta m$  je hmotnost kontrolního objemu [kg],  $a_x$  je zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] a  $u, v$  jsou směrové složky vektoru rychlosti.

Uvažováním všech sil působících na element lze obdržet bilanční rovnici (78):

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \quad (78)$$

kde  $\mu$  je dynamická viskozita [ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ]. Dalšími úpravami lze získat rovnici hybnosti ve směru osy  $x$  (80).

Teorii konvekce se zabývá úzká část fyziky prolínáním vědních disciplín termodynamiky a mechaniky tekutin. Pro správné popsání všech dějů, ke kterým dochází při přenosu tepla

prouděním, je třeba řešit více rovnic současně. A sice rovnici kontinuity (79), která je založena na zákonu zachování hmoty. Popisuje, že systém opouští stejná jednotka hmoty, která do něj vstupuje. Dále rovnice hybnosti (80), která je vyjádřením druhého Newtonova zákona (zákon síly). A rovnice energie (82), která vyjadřuje zákon zachování energie v systému. Tyto tři rovnice v základní podobě pro přirozené proudění lineárního průběhu podél svíslé stěny (Obr. 9) jsou fyzikálním popisem proudění a přenosu tepla v něm.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (79)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (80)$$

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left( \frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (81)$$

kde  $\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ],  $\beta$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ]. Levá část rovnice představuje tok ven z kontrolního objemu díky pohybu látky. První člen pravé strany rovnice popisuje tlakové síly. Poslední člen rovnice udává síly působící díky viskózním třecím silám.

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\nu}{c_p} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (82)$$

kde  $\alpha$  je součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]. Levá část rovnice vyjadřuje tok ven z kontrolního objemu advekcí. První člen pravé strany rovnice udává přítok energie a poslední člen rovnice určuje ztráty způsobené viskozitou látky.

#### 4.4.2 Tepelná mezní vrstva

Uvnitř větrané vzduchové dutiny na povrchu horního a spodního střešního pláště dochází k formování **tepelné mezní vrstvy** o tloušťce  $\delta_T$ . V této tenké vzduchové vrstvě je teplo sdíleno vedením i prouděním [39], [44], teplota zde dosahuje vyšších hodnot než vzduch v mezeře a nastává přirozené proudění v této mezní vrstvě.

Průběh tepelné mezní vrstvy po výšce stěny se obecně liší v závislosti na **charakteru vyhřívání stěny**. Má-li stěna dostatečnou tloušťku a tepelnou vodivost na to, aby její teplota zůstala po délce dutiny konstantní, přestože je jí odebíráno teplo proudícím vzduchem, pak se jedná o případ s **konstantní teplotou povrchu**. Tloušťka  $\delta_T$  je poměrná k  $y^{1/4}$ , kde  $y$  je poloha bodu po délce větrané vrstvy, viz Obr. 10a.

$$\delta_T \sim y \cdot Ra_y^{-1/4} \quad (83)$$

kde  $y$  je vzdálenost od přiváděcího otvoru [m] a  $Ra_y$  je Rayleighovo číslo počítané pro stěnu s konstantní teplotou [-].

$$Ra_y = \frac{g \cdot \cos \Phi \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot y^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (84)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $\phi$  je sklon horního pláště od svislice [°],  $\beta$  je součinitel teplotní objemové roztažnosti vzduchu [ $K^{-1}$ ],  $T_s$  je teplota povrchu [K],  $T_\infty$  je teplota okolního vzduchu [K],  $y$  je délka vzduchové vrstvy [m],  $\alpha$  je součinitel teplotní vodivosti vzduchu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] a  $\nu$  je kinematičká viskozita vzduchu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ].

Naopak u malé tloušťky stěny se odebírání tepla prouděním podél ní projeví variací teploty po výšce. V tom případě se vyhřívání stěny vyjadřuje hodnotou tepelného toku. Pokud je stěna vyhřívána **rovnoměrně konstantním tepelným tokem** po celé délce, pak je průběh  $\delta_T$  poměrný k  $y^{1/5}$ , znázorněno na Obr. 10b.

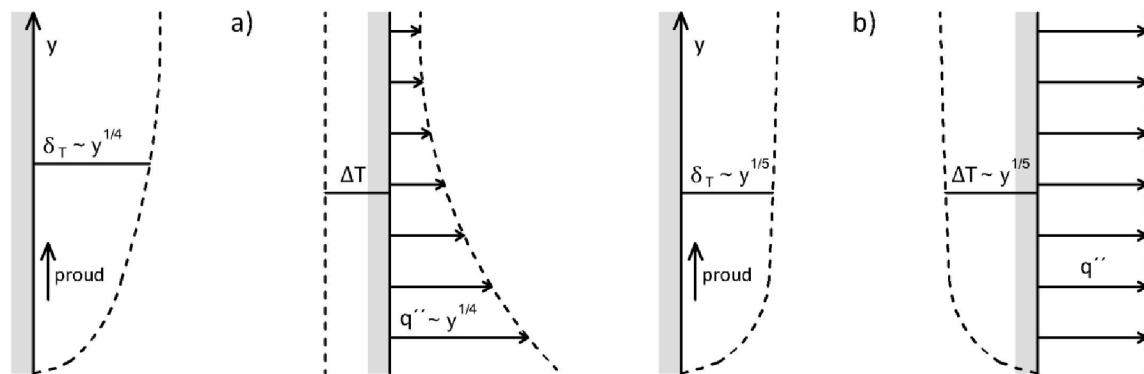
$$\delta_T \sim y \cdot Ra_{*y}^{-1/5} \quad (85)$$

Vztah pro výpočet Rayleighova čísla pro stěnu s konstantním tepelným tokem je následující:

$$Ra_{*y} = \frac{g \cdot \cos \Phi \cdot \beta \cdot q'' \cdot y^4}{\alpha \cdot \nu \cdot \lambda} \quad (86)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $\phi$  je sklon horního pláště od svislice [°],  $\beta$  je součinitel teplotní objemové roztažnosti vzduchu [ $K^{-1}$ ],  $q''$  je hustota tepelného toku horním pláštěm [ $W \cdot m^{-2}$ ],  $y$  je délka vzduchové vrstvy [m],  $\alpha$  je součinitel teplotní vodivosti vzduchu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],  $\nu$  je kinematičká viskozita vzduchu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] a  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti

[W·m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]. Nastává-li v dutině turbulentní proudění, je dosaženo lepší korelace bez uvažování sklonu ( $\cos \phi$ ).

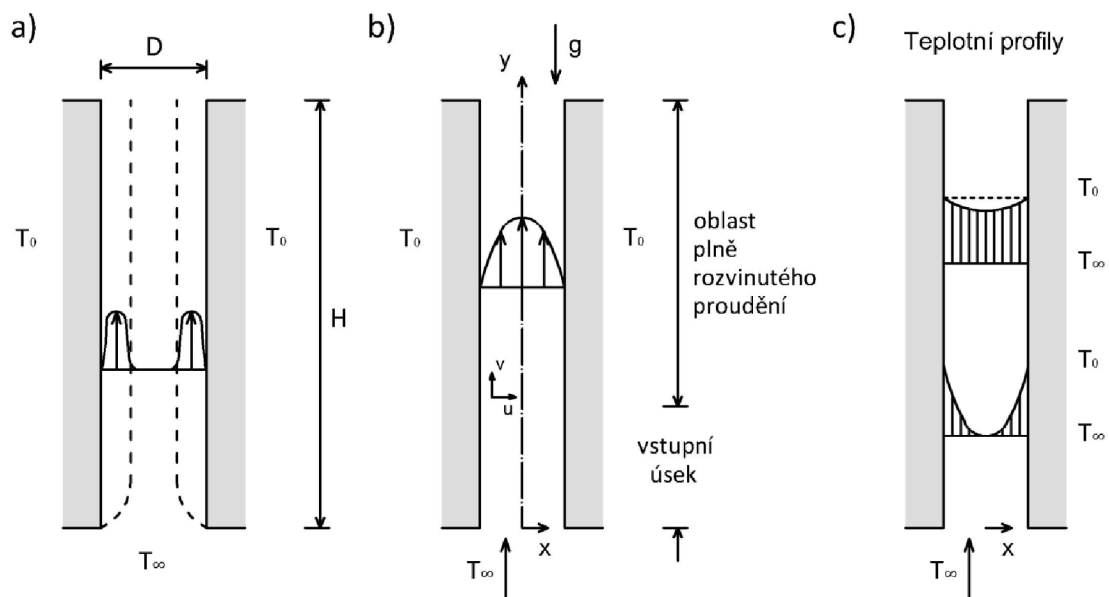


Obr. 10 Vliv charakteru vyhřívání stěny na tvar tepelné mezní vrstvy: a) izotermní konstrukce, b) konstrukce s rovnoměrným tepelným tokem [44]

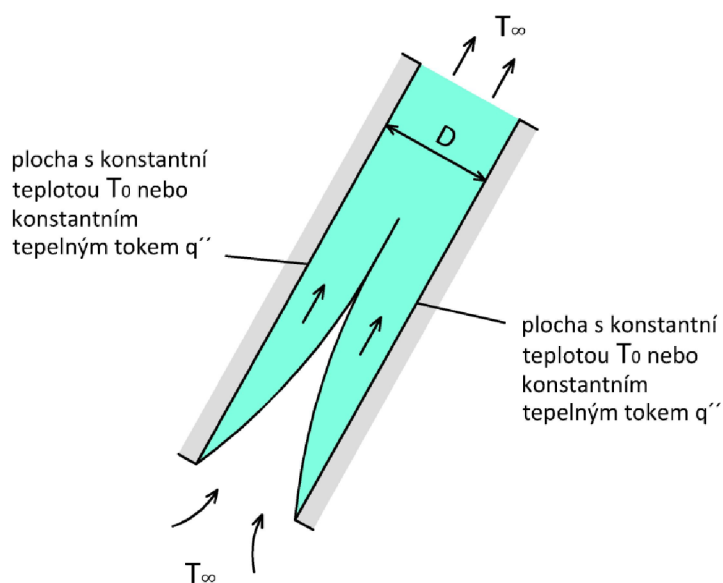
Při pohledu na Obr. 10 je patrný rozdíl ve tvaru mezní vrstvy u obou způsobů vyhřívání ploch. V problematice větraných střešních pláštů je krytina ve spodní části délky střechy více ochlazovaná. Proto je vhodné vést výpočet proudění podél spodního líce horního pláště Rayleigho čísla za předpokladu rovnoměrného tepelného toku horním pláštěm  $q''$  jenž uvádí rovnice (86).

#### 4.4.3 Optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy

Diferenciace rychlostního profilu vzduchového proudu po průřezu ve svislé přirozeně větrané dutině se odvíjí od vzdálenosti dvou ohraničujících konstrukcí [44]. Je-li vzdálenost dvou paralelních vyhříváných stěn  $D$  příliš veliká, tj.  $D > 2 \cdot \delta_T$ , probíhá proudění podél každé plochy samostatně v tloušťce  $\delta_T$  a existence druhé konstrukce na průběh proudu nemá vliv, viz Obr. 11a. Vývoj mezní vrstvy je stejný jako v poloprostoru ohraničeném jednou konstrukcí, popsáný v předchozí kapitole. Jsou-li stěny u sebe blíže, ve vzdálenosti  $D \leq 2 \cdot \delta_T$ , spojí se obě mezní vrstvy do jediného proudu (Obr. 11 b). V tomto případě dochází k využití celé tloušťky dutiny, už se zde nevyskytují dva samostatné proudy oddělené vrstvou chladnějšího vzduchu. Středová vrstva není větraná a má dva negativní vlivy na sousední proudící vzduch. Jednak dochází na hranici s teplým proudem ke tření a dále proudu odebírá teplo. Oba jevy mají za následek snížení rychlosti proudění. Proudění vzduchu v dutině je **nejefektivnější** právě při vzdálenosti ploch  $2 \cdot \delta_T$ . Dalším přibližováním stěn se již snižuje efektivita větrání.



Obr. 11 Větraná vzduchová vrstva mezi dvěma vyhříványými konstrukcemi: a) vzdálenost konstrukcí  $D > 2 \delta_T$ ; b) vzdálenost konstrukcí  $D \leq 2 \delta_T$ ; c) teplotní profil v dutině [44]



Obr. 12 Vývin mezních vrstev ve větrané dutině [39]

V případě vzdálenosti stěn  $D \approx 2 \cdot \delta_T$ , se v oblasti nazývané vstupní úsek vyvíjí podél každé plochy mezní vrstva zvlášť. Po určité vzdálenosti se rozšíří natolik, že se spojí do jediného proudu, zde se již vyskytuje plně rozvinuté proudění. Na Obr. 12 je vyobrazen vývin mezních vrstev po výšce vzduchové vrstvy. Je patrný přechod ze vstupního úseku na oblast plně rozvinutého proudění.

Pro větranou dutinu ohraničenou dvěma paralelními plochami s dostatečně malou vzdáleností, je počítáno Rayleighovo číslo na základě tloušťky vzduchové mezery, nikoliv délce dutiny. Pro povrch s konstantní teplotou:

$$Ra_D = \frac{g \cdot \cos \Phi \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (87)$$

a pro povrch s konstantním tepelným tokem:

$$Ra_{*D} = \frac{g \cdot \cos \Phi \cdot \beta \cdot q'' \cdot D^4}{\alpha \cdot \nu \cdot \lambda} \quad (88)$$

Jak bylo zmíněno již dříve v této kapitole, optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy by se měla rovnat součtu tepelných mezních vrstev horního a dolního pláště. Nutno podotknout, že tloušťka mezní vrstvy je v čase proměnná a závisí na teplotním rozdílu mezi povrchem pláště a teplotou venkovního vzduchu. Pro konkrétní okrajové podmínky lze určit vhodnou vzdálenost horního a dolního pláště. Optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy  $D_{opt}$  je taková, kdy je přenos tepla z povrchů do proudícího vzduchu maximální. Optimální tloušťku větrané vzduchové vrstvy lze stanovit výpočtem z korelačních vztahů Bar-Cohena a Rohsenowa [39], [48] uvedených v Tab. 4.

Tab. 4 Optimální tloušťka větrané dutiny v závislosti na typu vyhřívání pláště [39]

| Typ vyhřívání dutiny  | $D_{opt}$ [m]               |
|---|-----------------------------|
| konstantní teplota po délce pláště<br>(symetricky vyhřívána dutina)<br>$T_{s,1} = T_{s,2}$          | $2,71(Ra_y/D^3H)^{-1/4}$    |
| konstantní tepelný tok po délce pláště<br>(symetricky vyhřívána dutina)<br>$q_{s,1} = q_{s,2}$      | $2,12(Ra_{*y}/D^4H)^{-1/5}$ |
| konstantní teplota po délce pláště<br>(jednostranně vyhřívána dutina)<br>$T_{s,1}, T_{s,2} = 0$     | $2,15(Ra_y/D^3H)^{-1/4}$    |
| konstantní tepelný tok po délce pláště<br>(jednostranně vyhřívána dutina)<br>$q_{s,1}, q_{s,2} = 0$ | $1,69(Ra_{*y}/D^4H)^{-1/5}$ |

Nebo lze užít pro vyčíslení optimální tloušťky dutiny vztahu Morroea et al (89), kterým lze určit optimální poměr tloušťky vzduchové vrstvy a délky dutiny  $(D/H)_{opt}$  [49].

$$(D/H)_{opt} = 4,57(Gr_H)^{-0,192} \quad (89)$$

kde  $Gr_H$  je Grashofovo číslo pro délku dutiny  $H$  [-].

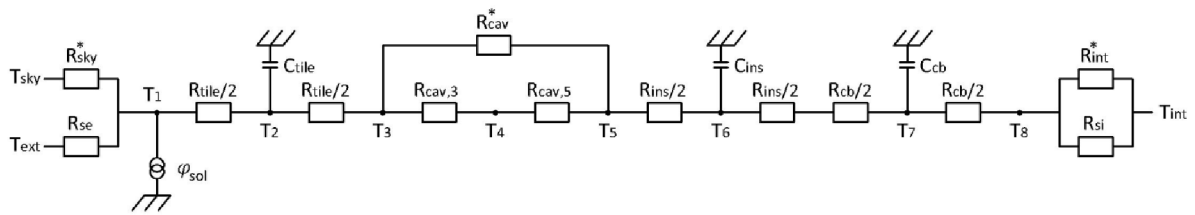
V závislosti na typu vyhřívání horního a dolního pláště se určí nejvhodnější vztah. V případě dvouplášťových střešních konstrukcí je horní plášť vyhříván konstantním tepelným tokem po délce pláště. Dolní plášť lze též definovat jako povrch s konstantním tepelným tokem, ale jeho hodnoty dosahují přibližně 50 % oproti hornímu plášti. V případě aplikace reflexních povrchů ve větrané dutině lze považovat tepelný tok na spodním plášti za nulový.

#### 4.5 Numerický model větraného střešního pláště

Numerické výpočty se běžně využívají při tepelně technickém hodnocení stavebních konstrukcí. Příkladem je výpočet součinitele prostupu tepla, povrchových teplot konstrukce, apod. Tyto výpočty prováděné pro ustálený teplotní stav není obtížné zvládnout pomocí ručního výpočtu. Touto metodou však lze spočítat konstrukci i za neustálených teplotních podmínek a bývá součástí výpočtů dynamických výpočetních programů. Střešní plášť s větranou vzduchovou vrstvou se běžně neřeší touto metodou, protože numerický výpočet nabízí pouze 1D řešení úlohy a větraná vzduchová dutina je orientována dalším směrem, čímž se z ní stává 2D úloha.

V rámci tříměsíční zahraniční stáže Erasmus+ (09/2014 – 12/2014) na Institut National des Sciences Appliquees de Rennes ve Francii vznikl ve spolupráci s profesorem Pascalem Dupontem následující výpočtový model. Numerický výpočet šíření tepla větraným střešním pláštěm byl proveden pro neustálený teplotní stav se zohledněním akumulární schopnosti konstrukce. Byl použit RC model (Resistance-Capacitance), který je odvozen z analogie s elektrickým obvodem, viz Obr. 13. Větraná vzduchová vrstva je řešena Tento přístup zvolili ve své studii také DeBlois et al. [12]





Obr. 13 RC model střešního pláště

Z RC modelu vychází bilanční rovnice pro jednotlivé uzlové body. První uzel  $T_1$  je umístěn na vnějším líci krytiny. Na něj působí tepelné zisky ze slunečního záření  $\varphi_{sol}$ , které lze vyčíslit jako část hustoty tepelného toku ze slunečního záření  $q_{sol}$ , pohlcená krytinou o pohltivosti  $\alpha_{sol}$ . Dále na uzel  $T_1$  působí tepelné ztráty, ochlazováním exteriérovým vzduchem o teplotě  $T_{ext}$  přes tepelný odpor při přestupu tepla  $R_{se}$ , radiační složkou sáláním k obloze o zdánlivé teplotě  $T_{sky}$  a prostupem přes krytinu (do poloviny objemu, kde se nachází bod  $T_2$ ) o tepelném odporu  $R_{tile}/2$ . Do uzlu  $T_2$ , který se nachází uprostřed krytiny, se šíří teplo směrem z uzlu  $T_1$  a je předáváno dále do uzlu  $T_3$ , opět přes tepelný odpor  $R_{tile}/2$ . Současně je část tepla akumulována ve hmotě krytiny, proto zde vystupuje člen tepelné kapacity  $C_{tile}$ . Uzel  $T_3$  je umístěn na spodním líci krytiny. Zde teplo přichází ze střešní tašky (uzel  $T_2$ ) přes tepelný odpor  $R_{tile}/2$  a přechází do vzduchové dutiny o teplotě  $T_4$  přes tepelný odpor při přestupu tepla  $R_{cav,3}$  a sáláním na protější povrch  $T_5$ . Uzel  $T_4$  představuje vzduchovou vrstvu. Teplo přichází z horního pláště o povrchové teplotě  $T_3$  a ze spodního pláště  $T_5$  a je unášeno vzduchovou vrstvou. Do uzlu  $T_5$  přichází teplo sáláním z horního pláště o teplotě  $T_3$  a je odebíráno větranou vzduchovou vrstvou a šíří se dále do tepelné izolace do bodu  $T_6$  přes tepelný odpor  $R_{ins}/2$ . Uzel  $T_6$ , který se nachází uprostřed tepelné izolace, přijímá teplo z uzlu  $T_5$  přes tepelný odpor  $R_{ins}/2$  a šíří se dále do uzlu  $T_7$  (v polovině tloušťky stropního podhledu) přes tepelný odpor  $R_{ins}/2$  a  $R_{cb}/2$ . Zároveň je akumulováno ve hmotě tepelné izolace s tepelnou kapacitou  $C_{ins}$ . Do uzlu  $T_7$  přichází teplo z uzlu  $T_6$  a prostupuje dále přes tepelný odpor  $R_{cb}/2$  až na interiérový líc střešní skladby, do bodu  $T_8$ . Také zde je část tepelné energie přijímána hmotou stropního podhledu o tepelné kapacitě  $C_{cb}$ . Z líce stropního podhledu  $T_8$  se teplo dále šíří do interiéru místnosti, a to přestupem tepla o odporu  $R_{si}$ , vzduch v místnosti má teplotu  $T_{int}$ , a dále radiační složkou sáláním s ostatními povrchy, jejichž teplota je vyrovnaná s teplotou vzduchu. Následují bilanční rovnice pro jednotlivé uzlové body.

Uzel 1:

$$-\varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_{sky}^4) - \frac{T_1 - T_{ext}}{R_{se}} + \alpha_{sol} \cdot q_{sol} - \frac{T_1 - T_2}{R_{tile}/2} = 0 \quad (90)$$

kde  $\varepsilon_1$  je emisivita krytiny,  $T_{sky}$  je teplota oblohy,  $\alpha_{sol}$  je solární pohltivost krytiny.

Uzel 2:

$$\frac{T_1 - T_2}{R_{tile}/2} - C_{tile} \frac{dT_2}{dt} - \frac{T_2 - T_3}{R_{tile}/2} = 0 \quad (91)$$

Uzel 3:

$$\frac{T_2 - T_3}{R_{tile}/2} - \frac{\sigma (T_3^4 - T_5^4)}{1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_5 - 1} - h_{cav,3} [T_3 - T_4(x)] = 0 \quad (92)$$

kde  $\varepsilon_3$  je emisivita spodního líce krytiny,  $\varepsilon_5$  je emisivita podstřešní fólie.

Uzel 4:

$$h_{cav,3} [T_3 - T_4(x)] + h_{cav,5} [T_5 - T_4(x)] - \rho \cdot c_p \cdot v \cdot S \frac{dT_4}{dx} = 0 \quad (93)$$

kde  $c_p$  je měrná tepelná kapacita vzduchu v dutině,  $v$  je rychlost proudícího vzduchu a  $S$  je plocha příčného průřezu větrané dutiny.

Uzel 5:

$$\frac{\sigma (T_3^4 - T_5^4)}{1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_5 - 1} - h_{cav,5} [T_5 - T_4(x)] - \frac{T_5 - T_6}{R_{ins}/2} = 0 \quad (94)$$

Uzel 6:

$$\frac{T_5 - T_6}{R_{ins}/2} - C_{ins} \frac{dT_6}{dt} - \frac{T_6 - T_7}{R_{ins}/2 + R_{cb}/2} = 0 \quad (95)$$

Uzel 7:

$$\frac{T_6 - T_7}{R_{ins}/2 + R_{cb}/2} - C_{cb} \frac{dT_7}{dt} - \frac{T_7 - T_8}{R_{cb}/2} = 0 \quad (96)$$

Uzel 8:

$$\frac{T_7 - T_8}{R_{cb}/2} - \frac{T_8 - T_{int}}{R_{si}} = 0 \quad (97)$$

kde  $\varepsilon_8$  je emisivita pohledu.

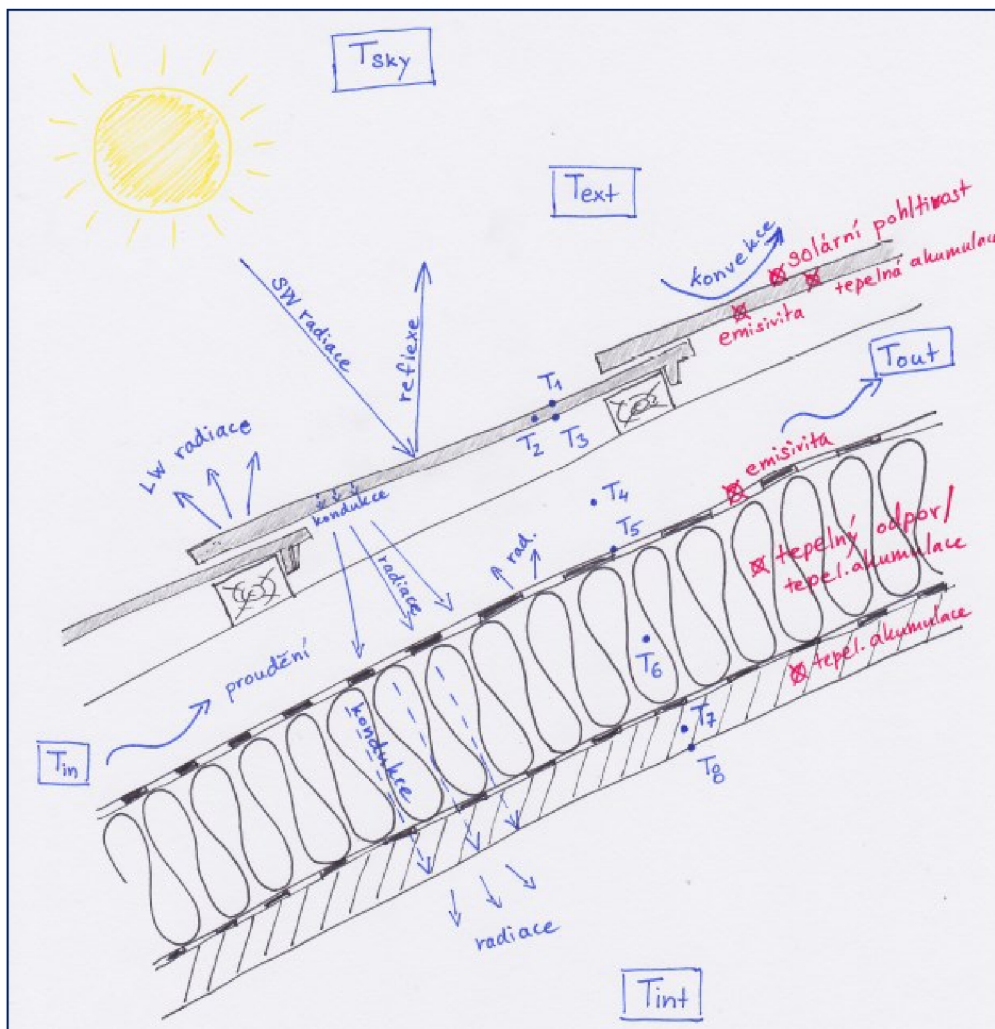
Další úpravou, která není uveřejněna v této práci lze problematiku převést na 2D úlohu. Výpočet je příliš rozsáhlý pro ruční výpočet, proto bylo přistoupeno k naprogramování výpočetního algoritmu v softwaru MATLAB.

#### 4.6 Modelování distribuce tepla ve střešní konstrukci metodou konečných prvků

Pro přesné analýzy detailů simulující průběh šíření tepla jsou vhodné programy na principu metody konečných prvků (MKP). Samotnému výpočtu předchází vytvoření geometrie simulované oblasti, která je diskretizací rozdělena na konečný počet prvků pomocí sítě, v jejichž uzlových bodech je prováděn výpočet. V problematice proudění je využíváno CFD (Computational Fluid Dynamics) simulací, které kromě MKP využívají i metody konečných objemů a metody konečných diferencí.

V této práci je řešena distribuce tepla v dvouplášťovém šikmém střešním pláště za letních okrajových podmínek, kdy se na přenosu tepla podílí všechny tři způsoby (Obr. 14) a velmi významným se stává přenos tepla sáláním. Během dne představují hlavní zdroj tepelných zisků sluneční paprsky. Při dopadu slunečního záření  $q_{sol}$  na povrch krytiny se část záření ihned odrazí, zbylá část je absorbována krytinou. Na rozhraní krytiny a venkovního vzduchu o teplotě  $T_{ext}$  probíhá přestup tepla a teplo se zde šíří konvekcí. Dále je horní povrch krytiny ochlazován sáláním směrem k obloze o teplotě  $T_{sky}$ . V krytině se teplo šíří vedením od horního líce ke spodnímu. Spodní líc krytiny je ochlazován vzduchem proudícím ve větrané mezeře, množství tepla odnášené vzduchovým proudem je označeno  $Q_{cav}$ . Vzduch vstupující do dutiny v dolní části má teplotu  $T_{in}$  a vzduch opouštějící dutinu v horní části střechy má teplotu  $T_{out}$ . Z krytiny se šíří teplo dále do střešního pláště vzájemným sáláním s horním povrchem dolního pláště. Skrze dolní plášť teplo prostupuje kondukcí až ke svému spodnímu líci, který je v kontaktu se

vzduchem interiéru o teplotě  $T_{int}$ . Zde se teplo dále šíří přestupem do vzduchu v interiéru a sáláním s okolními povrchy místnosti.



Obr. 14 Distribuce tepla ve střešním plášti

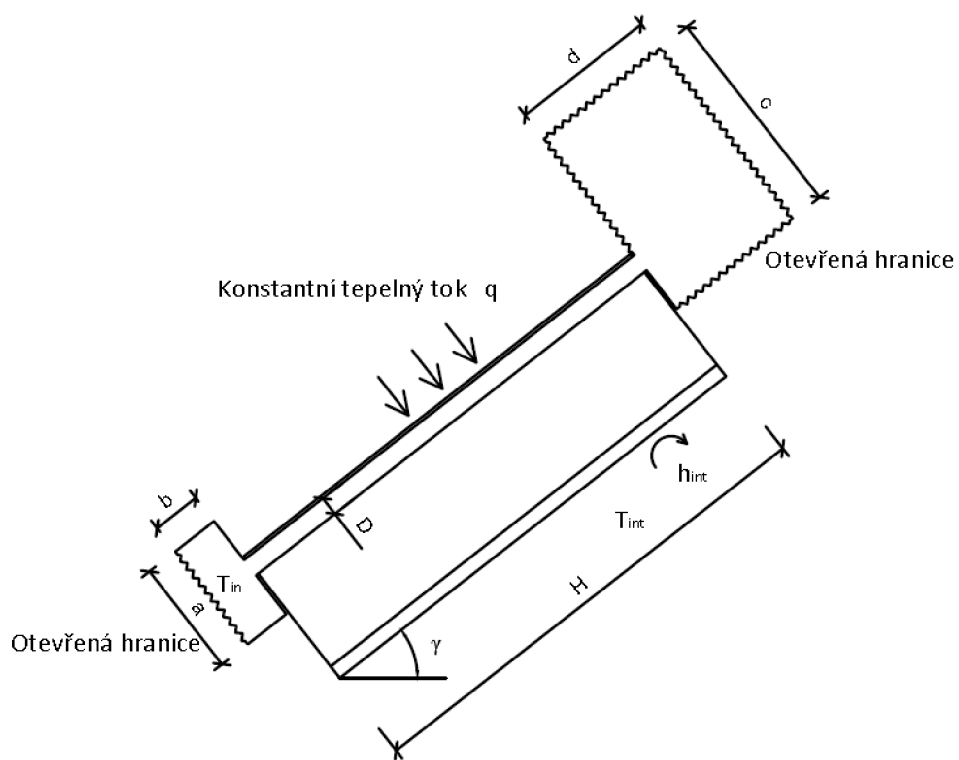
Před vytvořením geometrie bylo přistoupeno ke zjednodušení modelu, které významně zkrátilo dobu výpočtu. Skládaná střešní krytina představuje poměrně složitou geometrii nejen pro vymodelování, ale zejména pro výpočet samotný. Proto byla nahrazena celoplošnou deskou o tloušťce shodné s tloušťkou střešní tašky a stejných materiálových vlastností. Tímto je zanedbáno profilování krytiny a také spáry mezi jednotlivými taškami. Sklon střešní roviny zůstal zachován. Další zjednodušení geometrie spočívá ve vymezení vzduchové vrstvy pouze kontralatěmi a nezahrnuje vliv laťování.

#### 4.6.1 Model větraného střešního pláště v softwaru COMSOL

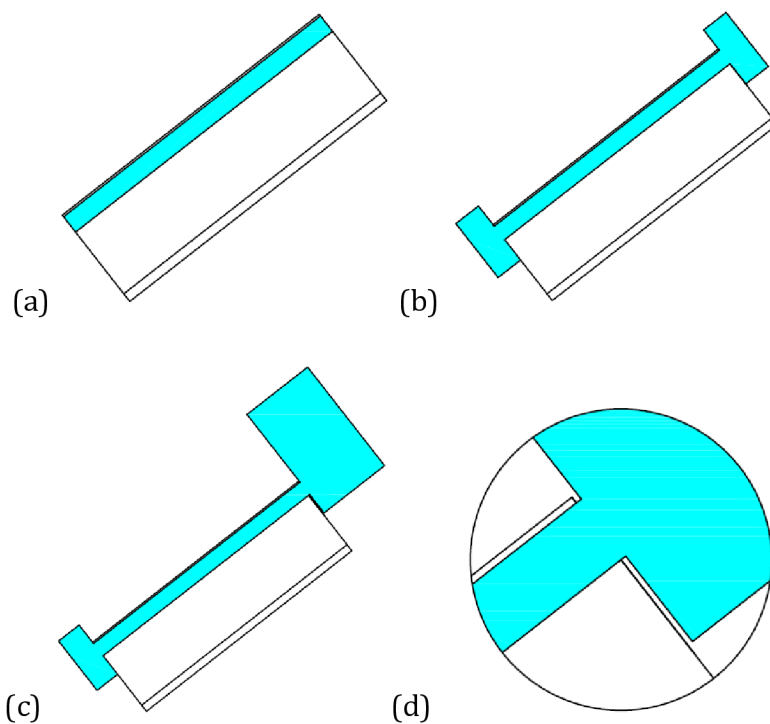
Byla zvolena metoda CFD simulace ve výpočetním programu COMSOL Multiphysics k získání podkladů pro vyhodnocení vlivu větrané vzduchové vrstvy v lehké dvouplášťové střešní konstrukci [72]. Dalšími sledovanými aspekty byl vliv reflexních povrchů ve větrané dutině a vliv tloušťky větrané vzduchové vrstvy na proudění mezi horním a dolním pláštěm. Výpočty probíhaly v ustáleném teplotním stavu, který odpovídá slunečnému letnímu dni. Tato počítačová simulace vznikla během tříměsíční zahraniční stáže (09/2015 – 12/2015) ve výpočetní laboratoři v INSA Toulouse ve spolupráci s prof. Sylvie Lorente a prof. Marcem Moissonem.

Pro simulaci šíření tepla ve větrané střeše byl vytvořen model segmentu střešního pláště (Obr. 15). Z důvodu, aby mohlo být sledováno chování střešního pláště v dostatečném detailu, ale zároveň aby výpočet proběhl v uspokojivém čase, byla zvolena délka střechy  $H$  rovna 1 m. Rozměr dutiny  $D$  byl upravován v jednotlivých variantách z 20 mm po 10 mm krocích až do 70 mm. Sklon střechy  $\gamma$  byl zvolen 38°. Větraná vzduchová dutina má obdélníkový tvar (Obr. 16a), ale již v počáteční fázi modelování bylo přistoupeno k zahrnutí vzduchové oblasti před přiváděcím otvorem a za odváděcím otvorem do výpočetní domény (Obr. 16b) z důvodu zpřesnění výpočtu. Uspokojivých výsledků bylo dosaženo až při umístění větší oblasti za odváděcím otvorem, a to asymetricky posazené vůči větrané dutině (Obr. 16c). Pro eliminaci tepelných toků ze střešního pláště směrem do předsazených vzduchových oblastí simulujících venkovní prostředí byla do tohoto místa vložena izolační kapsa (Obr. 16d).

Okrajové podmínky byly zvoleny s ohledem na počasí vyskytující se v letním období v ČR. Na krytinu působí tepelný tok  $q$ , který má konstantní hodnotu po délce střechy a činí 150 W, což odpovídá reálným podmínkám, kdy je střešní krytina ohřívána vlivem slunce. Teplota venkovního vzduchu  $T_{in}$ , který vstupuje do větrané dutiny je 20 °C. Teplota vzduchu v interiéru  $T_{int}$  je rovněž 20 °C. Součinitel přestupu tepla na straně interiéru  $h_{int}$  byl zvolen 8 W·m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>. Vliv větru nebyl uvažován, jelikož jsou sledovány veličiny související s přirozeným prouděním.



Obr. 15 Výpočetní doména s vyznačením okrajových podmínek [72]



Obr. 16 Vývoj tvaru vzduchové domény: (a) obdélníková; (b) se zahrnutím venkovního prostoru před a za větranou vzduchovou vrstvou; (c) s větší oblastí za výdechovým otvorem; (d) umístění izolační vzduchové kapsy [72]

Simulace probíhala jako kombinace ustáleného a neustáleného teplotního stavu. Zadané okrajové podmínky byly konstantní a výsledky byly sledovány až po ustálení hodnot. Z důvodu přítomnosti přirozeně větrané vzduchové vrstvy však bylo potřeba vést výpočet v neustáleném teplotním stavu.

Materiálové řešení bylo zvoleno s ohledem na to, že se jedná o lehký střešní plášť. Horní plášť je tvořen pálenou keramickou krytinou přírodní světle červené barvy. Dolní plášť je tvořen vláknitou tepelnou izolací a podhledem ze dvou vrstev sádkkartonu. Izolace střešního pláště je navržena tak, aby součinitel prostupu tepla odpovídal hodnotě doporučené pro střechy pasivních domů, což je  $U = 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Parametry všech použitých materiálů jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Materiálové charakteristiky modelu.

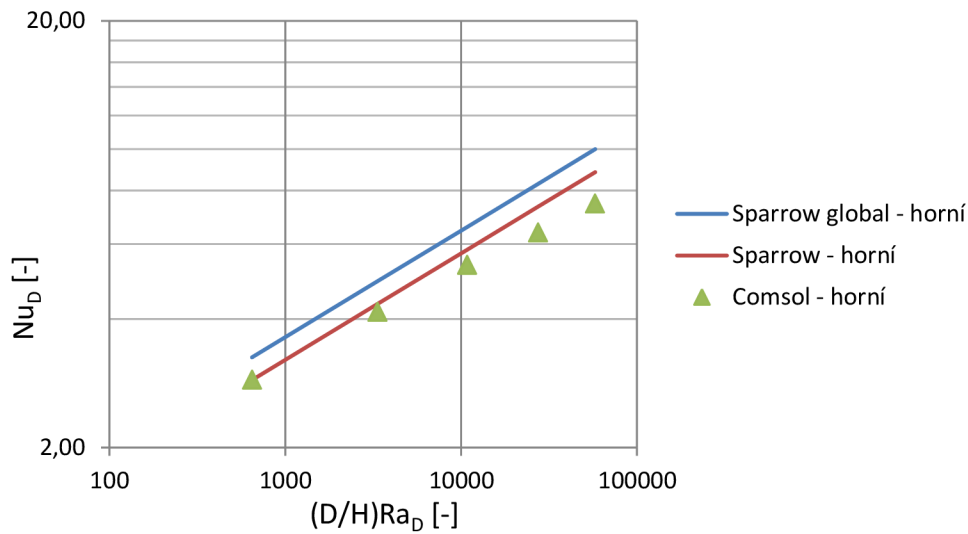
|                 | Tloušťka<br>vrstvy<br>$d$ [m] | Souč. tepelné<br>vodivosti<br>$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] | Objemová<br>hmotnost<br>$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] | Měrná tepelná<br>kapacita<br>$c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] |
|-----------------|-------------------------------|---|--|---|
| keramická taška | 0,006                         | 1,010   | 2000   | 900   |
| větraná dutina  | 0,02 – 0,07                   | *   | *  | *   |
| tepelná izolace | 0,240                         | 0,039   | 32   | 1550  |
| podhled SDK     | 0,030                         | 0,220   | 750  | 1068  |

\* Vlastnosti vzduchu, jako je součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost, měrná tepelná kapacita a dynamická viskozita jsou teplotně závislé.

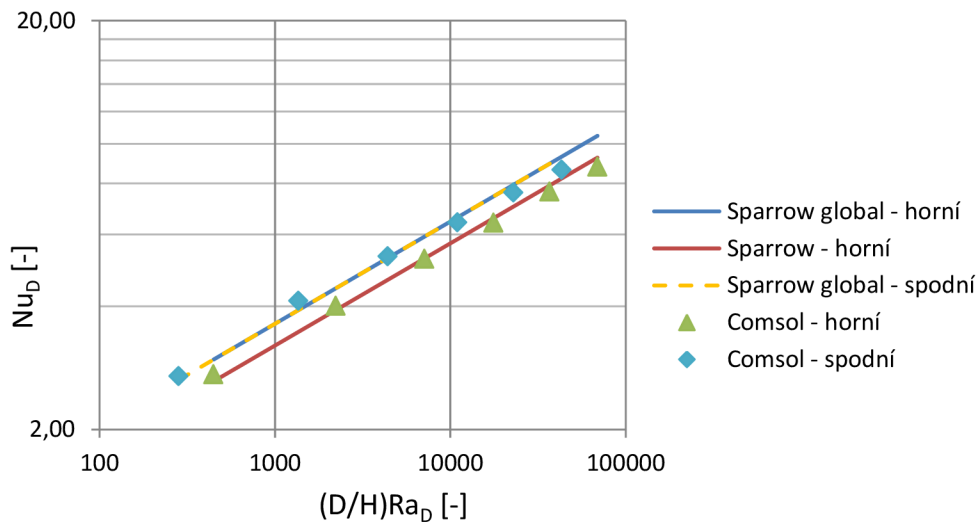
Dle předběžného výpočtu Rayleighova čísla (86) je uvažováno s laminárním prouděním v dutině. Pro tento model vychází Rayleighovo číslo  $Ra_{*y} = 2,6 \cdot 10^{11}$ , zatímco přechod na turbulentní proudění nastává okolo  $Ra_{*y} \sim 10^{13}$ .

V rámci této simulace byly řešeny dvě varianty povrchových úprav ve větrané dutině. První variantou je aplikace reflexního povrchu s velmi nízkou hodnotou emisivity na spodním povrchu horního pláště a na horním povrchu dolního pláště. V tomto případě lze přestup tepla v dutině řešit čistě konvekcí a složka radiace je eliminována. V druhé variantě jsou povrchy v dutině bez materiálových úprav, emisivita je stanovena na  $\varepsilon = 0,94$ . Teplo se v dutině šíří jak prouděním, tak i sáláním.

K validaci výpočetního modelu byla použita práce Azeveda a Sparrowa [16], která přinesla převrat v problematice přirozeného proudění v nakloněné dutině a je dodnes citována v odborné literatuře. V grafech na Obr. 17 a Obr. 18 je zachycena v logaritmickém měřítku závislost Nusseltova čísla  $Nu_D$  na Rayleighho čísele  $Ra_D$  se započítáním vlivu tloušťky dutiny  $D$  a její délky  $H$ . Je porovnáno Nusseltovo číslo získané výpočtem v programu Comsol integrací lokálních hodnot po ploše dle vztahů (123) a (124) s hodnotami vypočítanými z korelačních vztahů publikovaných v [16]. Konkrétně s globál-



Obr. 17 Nusseltovo číslo: Bez vlivu sálání mezi povrchy v dutině [72]



Obr. 18 Nusseltovo číslo: S vlivem sálání mezi povrchy v dutině



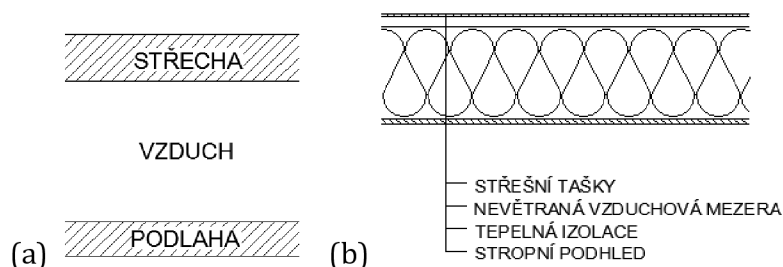
ním korelačním vztahem (119), který je aplikovatelný na všechny povrchy ve větrané dutině a korelačním vztahem pro horní povrch (120), který lze použít jen pro horní vyhřívaný povrch. V obou případech, s vlivem sálání i bez vlivu sálání mezi povrchy, byla nalezena dobrá shoda a model byl uznán za platný. Pro horní povrch se lépe hodí korelační vztah přímo vytvořený pro horní vyhřívaný povrch (120), což ukázaly i výsledky simulace.

Cílem této simulace bylo sledování teplotního a rychlostního pole ve větrané dutině a vyhodnocení účinnosti větrané vzduchové vrstvy o různých konstrukčních tloušťkách a s různou emisivitou povrchů v dutině.

#### 4.6.2 Model nevětraného střešního pláště v softwaru COMSOL

Za účelem vyhodnocení chování lehkého střešního pláště v letním období byla provedena simulace za neustáleného teplotního stavu, kdy teploty střešního pláště i vnitřního vzduchu reagovaly na harmonicky se měnící venkovní okrajové podmínky. Součástí simulace je posouzení vlivu materiálového řešení tepelné izolace a podhledu.

Z důvodu přiblížení se co nejvíce reálným podmínkám, je do geometrie modelu zahrnuta kromě samotného střešního pláště i přilehlá část podkroví včetně podlahy (Obr. 19a). Střešní plášť je tvořený vrstvou krytiny, nevětranou vzduchovou vrstvou, tepelnou izolací a podhledem (Obr. 19b). Teplota vnitřního vzduchu je ovlivněna pouze prostupem tepla skrze střešní plášť. Jelikož je vnitřní vzduch vyhříván přilehlým stropním podhledem, tedy tepelný tok je shora dolů, složka konvekce ve vzduchu v místnosti může být zanedbána [39]. Teplota vzduchu je po výšce stratifikována.



Obr. 19 Výpočetní model: (a) celkový pohled; (b) jednotlivé vrstvy střešního pláště [50]

V rámci této simulace bylo zkoušeno šest druhů tepelné izolace – minerální vata, EPS, XPS, PUR, dřevovláknitá izolace a celulózová vata. Stropní podhled byl obměněn též v šesti variantách – sádkartón, dvě vrstvy sádkartónu, OSB, dřevěné palubky, panely z lisované slámy a jílové desky. Je uvažováno s jílovými deskami ProCrea, vyráběnými německou firmou. Materiálové charakteristiky jednotlivých vrstev jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Střešní skladba a přilehlé podkroví – materiálové charakteristiky a dimenze

|                          | Tloušťka vrstvy<br>$d$ [m]                          | Souč. tepelné vodivosti<br>$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | Objemová hmotnost<br>$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] | Měrná tepelná kapacita<br>$c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] |
|--------------------------|---|---|---|---|
| keramická taška          | 0,006   | 1,01  | 2000  | 920   |
| vzduchová mezera         | 0,030   |   | teplotně závislé  |   |
| tepelná izolace          | závislé na materiálu – viz Tab. 13 (kapitola 5.1.2) |   |   |   |
| stropní podhled          | závislé na materiálu – viz Tab. 15 (kapitola 5.1.3) |   |   |   |
| vzduch v místnosti       | 1,800   |   | teplotně závislé  |   |
| laminátová podlaha       | 0,006   | 0,16  | 940   | 1500  |
| mirelon                  | 0,003   | 0,05  | 70  | 2300  |
| betonová roznášecí deska | 0,100   | 1,43  | 2300  | 1020  |

Venkovní okrajové podmínky jsou zadány rovnocennou sluneční teplotou (98), tj. teplotou horního povrchu krytiny zohledňující teplotu venkovního vzduchu, intenzitu slunečního záření, solární pohltivost a emisivitu krytiny.

$$T_{sol-air} = T_{air} + R(\alpha I_T - \varepsilon I_l) \quad (98)$$

kde  $T_{air}$  je teplota venkovního vzduchu [K],  $R$  je tepelný odpor při přestupu tepla povrchu krytiny [ $\text{m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ],  $I_T$  je intenzita přímého a difuzního slunečního záření [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $I_l$  je intenzita dlouhovlnného záření černého tělesa o teplotě  $T_{air}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]. Nicméně v tomto případě hodnota nebyla získána výpočetně, ale experimentálním měřením popsáním v kapitole 4.8.2. Byly zde dlouhodobě monitorovány průběhy teplot ve střeše, včetně v rovině střešních tašek. Rovněž bylo přihlédnuto k měření maximálních teplot střešních tašek, popsáním v kapitole 4.8.1. Na základě získaných hodnot byla sestavena harmonicky oscilující časově závislá funkce (99). Povrchová teplota s touto funkcí osciluje

mezi 63 °C přes den a 17 °C v noci. To odpovídá střešním taškám z pálené keramiky světle červené barvy a bez povrchových úprav s povrchovými charakteristikami  $\alpha = 0,67$ ,  $\varepsilon = 0,94$  vystaveným teplým letním podmínkám.

$$t_{sol-air} = 313 + 23 \sin \frac{2\pi t}{24} \quad (99)$$

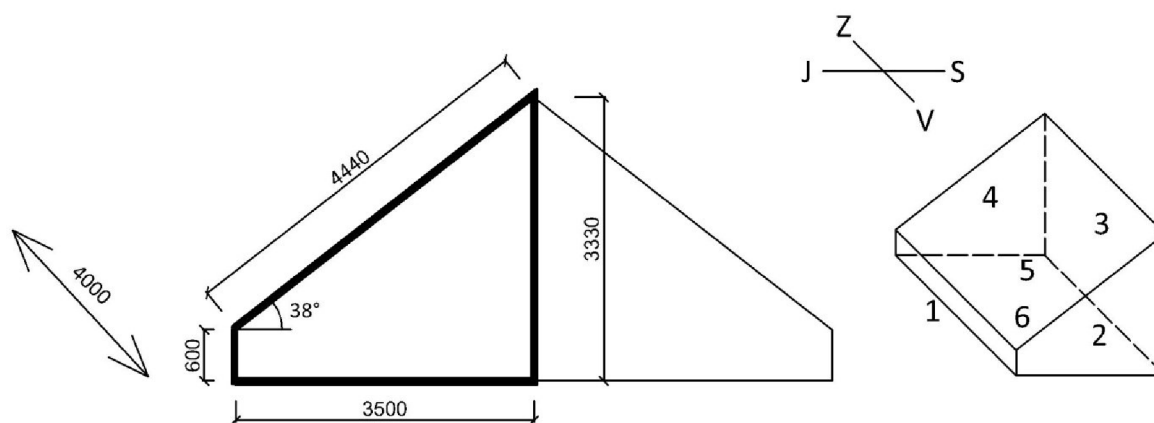
Model využívá jen základních procesů přenosu tepla vedením a sáláním. Vzduchová vrstva pod krytinou je nevětraná. Proudění v uzavřených vzduchových vrstvách je dovoleno zanedbat díky orientaci tepleného toku. Za předpokladu, že je model takto zjednodušený, není třeba jej validovat a lze jej prohlásit za platný. Tuto informaci poskytl při konzultaci odborník na numerické modelování v oblasti termodynamiky Andreas Mack, působící v expertní skupině pro dynamiku tekutin v TNO (Nizozemská organizace pro aplikovaný vědecký výzkum) v Haagu v Nizozemsku. Nicméně bylo provedeno srovnání výsledků z této simulace s výsledky dynamické simulace popsané v následující kapitole. Byly porovnány dvě materiálové varianty – s tepelnou izolací z minerální vaty a z dřevovláknů. Obě varianty přinesly obdobné výsledky, sledována byla vnitřní povrchová teplota podhledu, viz Obr. 62 a Obr. 63.

#### 4.7 Dynamická simulace podkrovní místnosti

Dynamické simulační programy jako je TRNSYS, DesignBuilder nebo EnergyPlus počítají energetickou bilanci celků – místností nebo celých budov a to v dlouhodobém časovém horizontu, většinou období celého roku nebo i více let. Výsledky jsou komplexní, nelze se zaměřit na detaily jako u metody konečných prvků. U konstrukcí je počítáno s 1D šířením tepla a výpočet proudění u vzduchových vrstev probíhá na tlakových rozdílech, není rozlišováno mezi jednotlivými typy proudění.

V rámci této práce bylo využito programu TRNSYS pro simulaci tepelných bilancí podkrovní místnosti pro ověření několika střešních skladeb. Celkově byly zvoleny čtyři varianty, lehká střešní skladba s tepelnou izolací z minerální vaty respektive z dřevovláknů, obě ve větraném a nevětraném provedení. Zadání geometrie modelu bylo provedeno v rozhraní TRNBuild, kde byly definovány skladby konstrukcí, rozměry a objem vnitřního prostoru. Výpočet proudění ve vzduchové vrstvě probíhal v modulu TRNFlow.

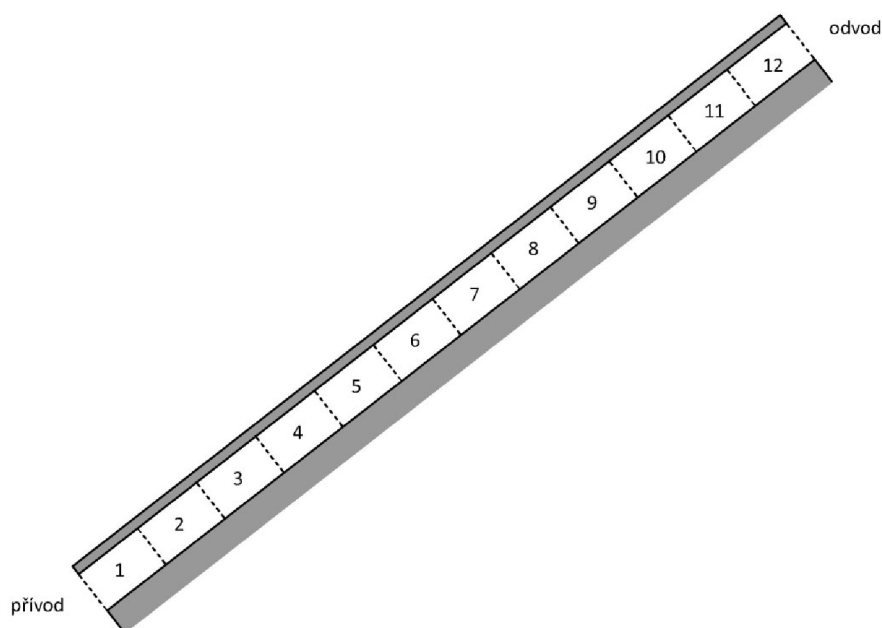
Návrh geometrie modelu (Obr. 20) vychází z běžných rozměrů malé podkrovní místnosti a splňuje veškeré požadavky pro obytnou místnost nacházející se v podkroví. Uvažovaná místnost tvoří polovinu celého podkrovního prostoru pod sedlovou střechou. Střešní rovina je orientována jižním směrem a její sklon činí  $38^\circ$ . Model podkrovní místnosti záměrně neobsahuje žádné okno, aby bylo možné uvažovat s vlivem šíření tepla pouze neprůhlednými konstrukcemi. Skladby obalových konstrukcí byly navrženy tak, aby splňovaly doporučené hodnoty pro pasivní domy [17]. Obvodové stěny a podlaha jsou ve všech variantách totožné, liší se pouze provedení střech. Materiálové řešení veškerých konstrukcí ohraničujících modelovanou podkrovní místnost je uvedeno v Tab. 7.



Obr. 20 Geometrie podkrovní místnosti pro dynamickou simulaci v TRNSYSu

U dvouplášťových variant byl zvolen dvouzónový model, kde první zónu tvoří podkrovní místnost a druhou zónu průběžná střešní dutina. Větraná střešní dutina je dále rozdělena do dvanácti segmentů (Obr. 21), aby mohla být simulována stratifikace teplot po délce dutiny pro správný výpočet proudění.

Venkovní okrajové podmínky jsou zadány tak, aby korespondovaly s okrajovými podmínkami modelu v předchozí kapitole (4.6.2). Dle toho je upravena návrhová teplota venkovního vzduchu a intenzita slunečního záření, pro něž jsou vygenerovány hodinové hodnoty. Součinitelé přestupu tepla jsou stanoveny dle hodnot uvedených v normě [34] a [36]. Uvnitř podkrovní místnosti není uvažováno s žádnými dalšími tepelnými zdroji.



Obr. 21 Rozdělení větrané dutiny do dvanácti segmentů

Tab. 7 Skladby konstrukcí podkrovní místnosti v modelu pro dynamickou simulaci

| Konstrukce  | Skladba   | Dimenze  |
|---|---|--|
| lehký střešní plášť<br>s minerální vatou<br>$U=0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ | sádrokartón<br>minerální tepelná izolace<br>vzduchová mezera (u větrané varianty)<br>keramická střešní taška                          | $d=0,015 \text{ m}$<br>$d=0,250 \text{ m}$<br>$d=0,040 \text{ m}$<br>$d=0,006 \text{ m}$   |
| lehký střešní plášť<br>s dřevovláknem<br>$U=0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$    | sádrokartón<br>dřevovláknitá izolace<br>vzduchová mezera (u větrané varianty)<br>keramická střešní taška                              | $d=0,015 \text{ m}$<br>$d=0,270 \text{ m}$<br>$d=0,040 \text{ m}$<br>$d=0,006 \text{ m}$   |
| obvodová stěna<br>$U=0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$                           | sádrokartón<br>minerální tepelná izolace<br>dřevěný obklad  | $d=2\cdot0,015 \text{ m}$<br>$d=0,240 \text{ m}$<br>$d=0,024 \text{ m}$  |
| vnitřní dělicí stěna<br>$U=0,37 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$                     | vnitřní omítka<br>zdivo z lehčených cihelných bloků<br>vnitřní omítka   | $d=0,020 \text{ m}$<br>$d=0,440 \text{ m}$<br>$d=0,020 \text{ m}$  |
| podlaha<br>$U=0,26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$                                  | dřevěné parkety<br>Mirelon<br>betonová roznášecí deska<br>akustická izolace<br>stropní konstrukce Miako se zálivkou<br>vnitřní omítka | $d=0,020 \text{ m}$<br>$d=0,003 \text{ m}$<br>$d=0,100 \text{ m}$<br>$d=0,030 \text{ m}$<br>$d=0,250 \text{ m}$<br>$d=0,010 \text{ m}$ |

Tato dynamická simulace vznikla během tříměsíční zahraniční stáže (09/2016 – 12/2016) na Ghent University v Belgii pod vedením profesora Arnolda Jannsennse. Model byl dále rozšířen a uvažoval i s vlivem oken, s vnitřními zdroji tepla (počítač, osvětlení, pobyt osob) a s různými režimy větrání. Výsledky však nejsou součástí této práce.

## 4.8 Experimentální měření

Kromě počítačových simulací bylo rovněž využito experimentálních metod. Mezi nimi měření in-situ, laboratorní měření a měření na ventilátorové dráze.

### 4.8.1 Maximální teploty vybraných druhů krytin

Bylo provedeno experimentální měření teploty na vzorcích vybraných druhů krytin. Na přelomu července a srpna 2013 byly zaznamenávány měřící sestavou Ahlborn teploty jedenácti typů střešní krytiny. Zastoupeny byly různé barevné a materiálové varianty – keramická pálená, betonová, cementovláknitá, hliníková, títanzinková, břidlice a plastová (Tab. 8). Cílem měření bylo zjistit, jakých maximálních teplot mohou dosáhnout a jak velké teplotní rozdíly jsou mezi jednotlivými taškami (Tab. 9). Ze všech měřených dnů byl pro hodnocení vybrán den 1. srpna, kdy teploty vzduchu dosahovaly vysokých hodnot, a obloha byla jasná. Teplotní čidla byla umístěna ze spodní strany krytiny, tak, aby nebyla ohřívána slunečním zářením. Okrajové podmínky jsou uvedeny v grafu v (Tab. 9). Při měření bylo dosaženo maximálních teplot tašek okolo 17 hod.

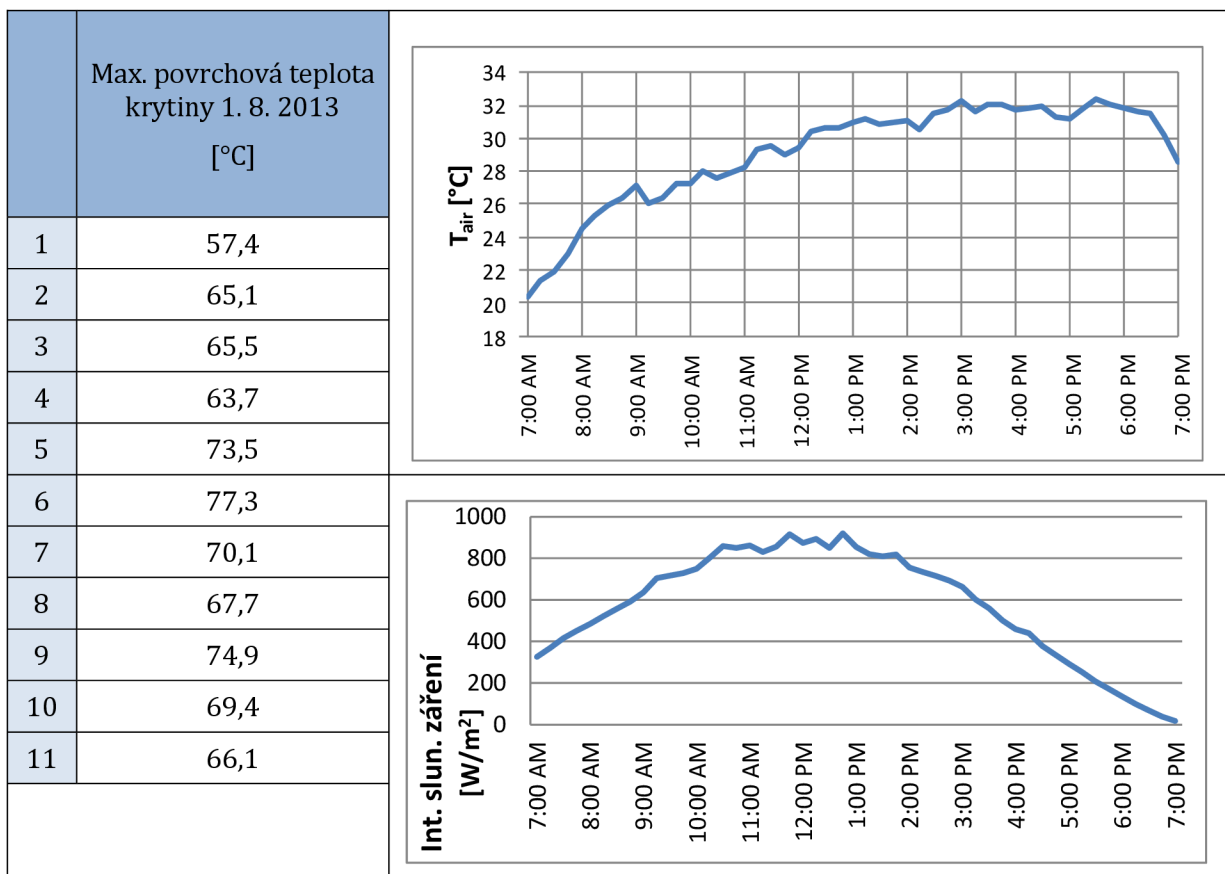
Hodnoty solární odrazivosti vzorků testovaných krytin byly získány laboratorním měřením vzorků o velikosti 5 x 5 cm vyříznutých z testovaných tašek. Byla změřena difuzní odrazivost v rozpětí vlnových délek 300 – 2500 nm, měření proběhlo v souladu s normou ASTM E 892-87 [51]. Emisivita byla odvozena z technických tabulek [42].

Tab. 8 Materiálové a povrchové vlastnosti měřených střešních tašek [23]

| Vz. | Materiál         | Povrch | Textura | Barva          | Odrazivost<br>$\rho_{sol}$ [-] | Pohltivost<br>$\alpha_{sol}$ [-] | Emisivita<br>$\epsilon_{IR}$ [-] |
|-----|------------------|--------|---------|----------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1   | pálená keramická | matný  | hladká  | světle červená | 0,326                          | 0,674                            | 0,94                             |
| 2   | pálená keramická | matný  | hladká  | černá          | 0,129                          | 0,871                            | 0,95                             |

|    |                  |                 |             |            |       |       |      |
|----|------------------|-----------------|-------------|------------|-------|-------|------|
| 3  | pálená keramická | leskly          | hladká      | černá      | 0,112 | 0,888 | 0,93 |
| 4  | vlákno-cementová | polomatný       | hladká      | sv. šedá   | 0,403 | 0,597 | 0,62 |
| 5  | titanzinková     | matný           | hladká      | sv. šedá   | 0,224 | 0,776 | 0,61 |
| 6  | hliníková        | minerální posyp | zrnitá      | hnědá      | 0,065 | 0,935 | 0,77 |
| 7  | břidlice         | matný           | profilovaná | tmavě šedá | 0,165 | 0,835 | 0,93 |
| 8  | plastová         | matný           | profilovaná | černá      | 0,061 | 0,939 | 0,90 |
| 9  | hliníková        | mírný lesk      | profilovaná | černá      | 0,069 | 0,931 | 0,76 |
| 10 | hliníková        | mírný lesk      | profilovaná | červená    | 0,287 | 0,713 | 0,76 |
| 11 | betonová         | mírný lesk      | hladká      | černá      | 0,047 | 0,953 | 0,92 |

Tab. 9 Maximální teploty střešních tašek a okrajové podmínky [23]





Vyhodnocení maximálních teplot krytin v závislosti na barvě je publikováno samostatně [23] a zde již není diskutováno. Hodnoty naměřené v rámci tohoto experimentu byly dále využity pro tvorbu okrajových podmínek simulací a výpočtů, uváděných v této práci.

#### 4.8.2 Experimentální měření teploty na modelech střešních pláštů

Pro účely experimentálního měření šíření tepla v lehkých střešních pláštích během letního období byly vyhotoveny dva reálné modely šikmé střechy, každý o dvou polích (Obr. 22). Návrh střešní skladby vycházel z nejčastěji realizovaného řešení zastřešení rodinných domů v České republice, tzv. „typické střešní skladby“ popisované v kapitole 2.3. Krytinu tvořily keramické pálené střešní tašky, pod nimi větraná vzduchová mezera, dále difúzně otevřená fólie, vláknitá tepelná izolace umístěná mezi krokviemi, parozábrana a stropní podhled. Ve snaze redukovat letní tepelné zisky skrze střešní plášť, bez zásadní změny charakteru klasické skladby, byla nahrazena minerální vata materiálem s vyšší objemovou tepelnou kapacitou – lněná vlákna, kvůli zvýšení tepelné setrvačnosti konstrukce. V rámci čtyř variant byla testována reflexní podstřešní fólie, běžná podstřešní fólie, podhled z panelů z lisované slámy a sádrokartonový podhled.

Experiment byl inspirován publikací [6], kde byly měřeny v rámci letního období teploty a rychlosti proudění v dvouplášťovém segmentu šikmé střechy. Modely byly umístěny na volném prostranství a s plochou orientovanou jižním směrem. Obdobné schéma bylo zvoleno i pro modely střešních pláštů řešené v této práci. Modely střech byly umístěny na terase v centru Brna v 8. (posledním) nadzemním podlaží (Obr. 23). Střešní roviny byly orientovány jihozápadním směrem, tak aby byly vystaveny největším intenzitám přímého slunečního záření. Nabízelo se několik variant jakým způsobem upravit prostor pod střechou. První možností bylo vytvoření uzavřeného vzduchového prostoru pomocí bednění a tepelné izolace. Největší slabinou této varianty bylo to, že by došlo k rychlému ohřátí vzduchu v tomto malém prostoru a následně by ohříval střešní plášť ze spodní strany. Také by byl nevyvážený poměr plochy ohraničujících konstrukcí a vnitřního objemu, takže by tento model nešel připodobnit k reálné konstrukci podkroví s eliminací vlivu oken. V neposlední řadě plocha svislých konstrukcí by převyšovala plochu střechy, tudíž na vývoj teplot vzduchu v uzavřeném prostoru by svislé stěny měly výrazný vliv a



podíl tepla dodávaného střešním pláštěm by šel jen těžko vyčíslit. Druhou variantou bylo vytvoření obestavěného prostoru pod střechou, tak jako v první variantě a instalace klimatizační jednotky, která by udržovala požadovanou teplotu vnitřního vzduchu. Nevýhodou této varianty byla nejen vysoká pořizovací cena, ale i nároky na provoz. Také vzhledem k tomu, že v této práci je zkoumáno chování střešního pláště v neklimatizovaných prostorech, bylo od této varianty ustoupeno. Nakonec byla zvolena třetí varianta, kdy prostor pod střešním pláštěm byl otevřený, tak jako tomu bylo u výše zmíněné publikace [6]. Snahou bylo vytvořit pod střechou takové prostředí, kde by působila jen teplota venkovního vzduchu. Proto byly zbudovány stínící stěny z přední části modelu a jedné boční strany. Z průběžných měřených hodnot však bylo pozorováno, že je povrch podhledu ovlivňován sáláním z povrchů terasy a přilehlých konstrukcí. Následně bylo provedeno dodatečné zastínění i z druhé boční strany a částečně ze zadní strany aby se tento vliv zmírnil, a to napnutím plachet s průduchy. Ani toto opatření se však neukázalo být zcela optimálním.



Obr. 22 Jeden ze dvou modelů střešního pláště [52]

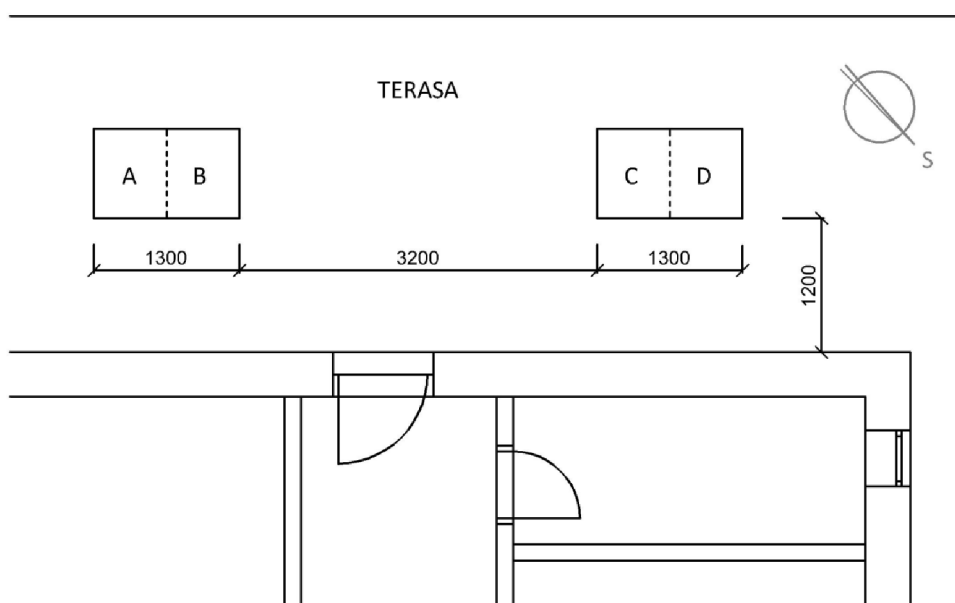
Záměrem bylo dokumentovat chování reflexní podstřešní fólie v porovnání s běžným typem fólie ve střešní skladbě a porovnat vliv podhledu s vyšší akumulací schopností oproti sádrokartonové variantě. Proto byly zhotoveny čtyři materiálové varianty střešního pláště A – D. Jednotlivé varianty se lišily použitou difúzní podstřešní fólií a materiálem podhledu. Byly vytvořeny všechny kombinace skladeb s klasickou šedou nebo reflexní střešní fólií a s podhledem ze sádrokartonu nebo desek z lisované slámy (Ekopanely). Přehledný výpis je uveden v Tab. 10. Sklon střešní roviny činí 38 °. Všechny čtyři modely měly krytinu ze světle červených keramických pálených tašek a tepelnou izolaci z lněných vláken (Naturizol). Střešní skladba byla dimenzována na hodnotu součinitele prostupu tepla doporučenou pro pasivní domy, tj.  $U = 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Pro klasickou šedou variantu podstřešní fólie byla zvolena kontaktní difúzní membrána (Jutadach 135) o plošné hmotnosti  $140 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  a propustnosti vodních par 0,02 m. Variantou této fólie byla difúzní reflexní membrána. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ , měrné tepelné kapacity  $c$ , objemové hmotnosti  $\rho$  a emisivity  $\varepsilon$  byly převzaty z technických podkladů výrobců a hodnoty, které nebyly udány tak byly převzaty z technických tabulek [42], výpis materiálových charakteristik uvádí Tab. 11. Solární odrazivost střešních tašek byla laboratorně změřena v souladu s protokolem uvedeným v normě ASTM E892-87 [51]. Test se prováděl s využitím difúzního odrazu a spektrum paprsků zahrnovalo vlnové délky 300– 2500 nm.

*Tab. 10 Materiálové řešení doplňkové hydroizolační vrstvy a podhledu*

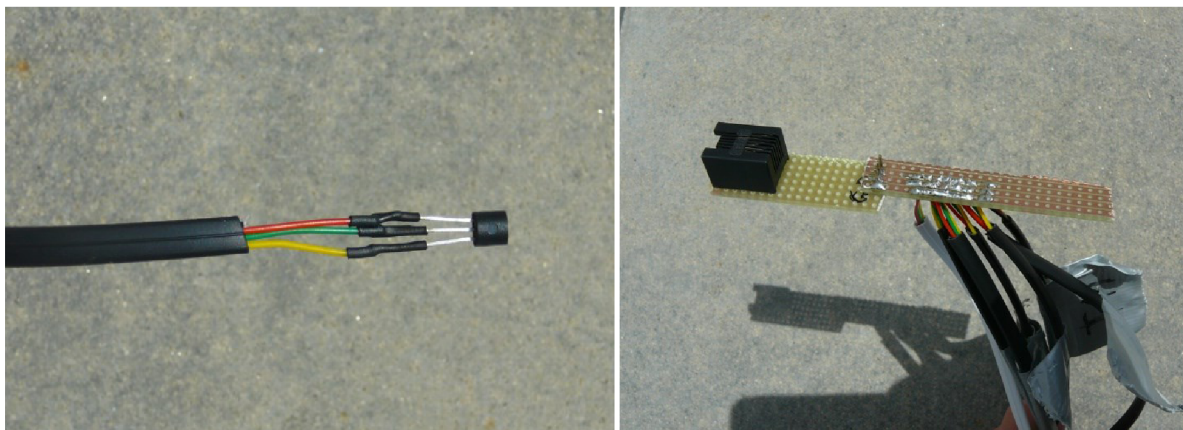
| Varianta A             | Varianta B             |
|------------------------|------------------------|
| šedá difúzní fólie     | reflexní difúzní fólie |
| sádrokartonový podhled | sádrokartonový podhled |
| Varianta C             | Varianta D             |
| šedá difúzní fólie     | reflexní difúzní fólie |
| desky z lisované slámy | desky z lisované slámy |

Tab. 11 Charakteristiky stavebních materiálů použitých na modelech střešních pláštěů

|  | Tloušťka<br>$d$ [mm] | Souč.<br>tepelné<br>vodivosti<br>$\lambda$ [W·m·<br><sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | Měrná<br>tepelná<br>kapacita<br>$c$ [J·kg·<br><sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | Objemová<br>hmotnost<br>$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ] | Emisivita<br>$\varepsilon$ [-] | Odrazivost<br>$\rho_{sol}$ [-] | Pohltivost<br>$\alpha_{sol}$ [-] |
|--|----------------------|---|---|--|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| keramická<br>taška<br>Tondach                            | 6                    | 1,010   | 920   | 2000   | 0,94                           | 0,326                          | 0,674                            |
| šedá difúzní<br>fólie                                    | ---                  | ---   | ---   | ---  | 0,94                           | ---                            | ---                              |
| reflexní<br>difúzní fólie                                | ---                  | ---   | ---   | ---  | 0,17                           | ---                            | ---                              |
| tepelná<br>izolace<br>z lněných<br>vláken<br>(Naturizol) | 240                  | 0,039   | 1550  | 32   | ---                            | ---                            | ---                              |
| sádkartón  | 2x15                 | 0,220   | 1060  | 750  | 0,94                           | ---                            | ---                              |
| panel<br>z lisované<br>slámy<br>(Ekopanel)               | 58                   | 0,102   | 2400  | 379  | 0,94                           | ---                            | ---                              |



Obr. 23 Schéma terasy s umístěním modelů



*Obr. 24 Digitální snímač teploty Dallas DS 18B20 a sběrnice*

V každém poli byla umístěna čtyři teplotní čidla – na spodním povrchu krytiny, na spodním povrchu difúzní fólie, na horním povrchu podhledu a na spodním povrchu podhledu. Zařízení pro měření a záznam teploty bylo zhotoveno ve spolupráci s Ing. Danielem Zuthem, Ph.D. a Ing. Pavlem Matyášem z Ústavu aplikované informatiky na Fakultě strojního inženýrství, VUT v Brně. Pro snímání teploty byly využity digitální teplotní snímače Dallas DS18B20 (Obr. 24). Snímače byly propojeny přes sběrnici s mikropočítačem Raspberry Pi, který pomocí speciálně naprogramovaného softwaru pro tento účel zpracovával a ukládal teplotní data. Tato měřicí sestava byla připojena k internetu a bylo možné odkudkoliv sledovat aktuální data a průběhy teplot v čase ve vygenerovaném grafu a stahovat data. Podrobnější informace jsou uvedeny v publikaci [52]. Hlavní měření probíhalo v období 2. 7. – 15. 9. 2014. Automatický záznam teploty probíhal každých 10 minut po celé měřené období. Meteorologická data byla převzata z meteostanice umístěné v areálu univerzity v blízkosti modelů, spravované Ústavem vodního hospodářství krajiny.

Důvodem měření bylo zjištění skutečných teplot ve střešních pláštích vystavených reálným klimatickým podmínkám a následné možné porovnání s počítačovou simulací počítanou pro neustálený teplotní stav za stejných okrajových podmínek. Důraz byl kladen na zachycení denního cyklu – proces zahřívání a chladnutí konstrukce a také na teplotní chování během série teplých dnů, kterým předcházelo chladné období – sledování tepelně akumuláční schopnosti konstrukce.



Tento projekt využíval podpory dvouletého standardního specifického výzkumu s názvem Konstrukční detaily pasivních domů - tepelná izolace z druhotných surovin LCA-TICM, větrané a vegetační opláštění budov, s číslem FAST-S-14-2418, období řešení 1. 1. 2014 – 31. 12. 2015.

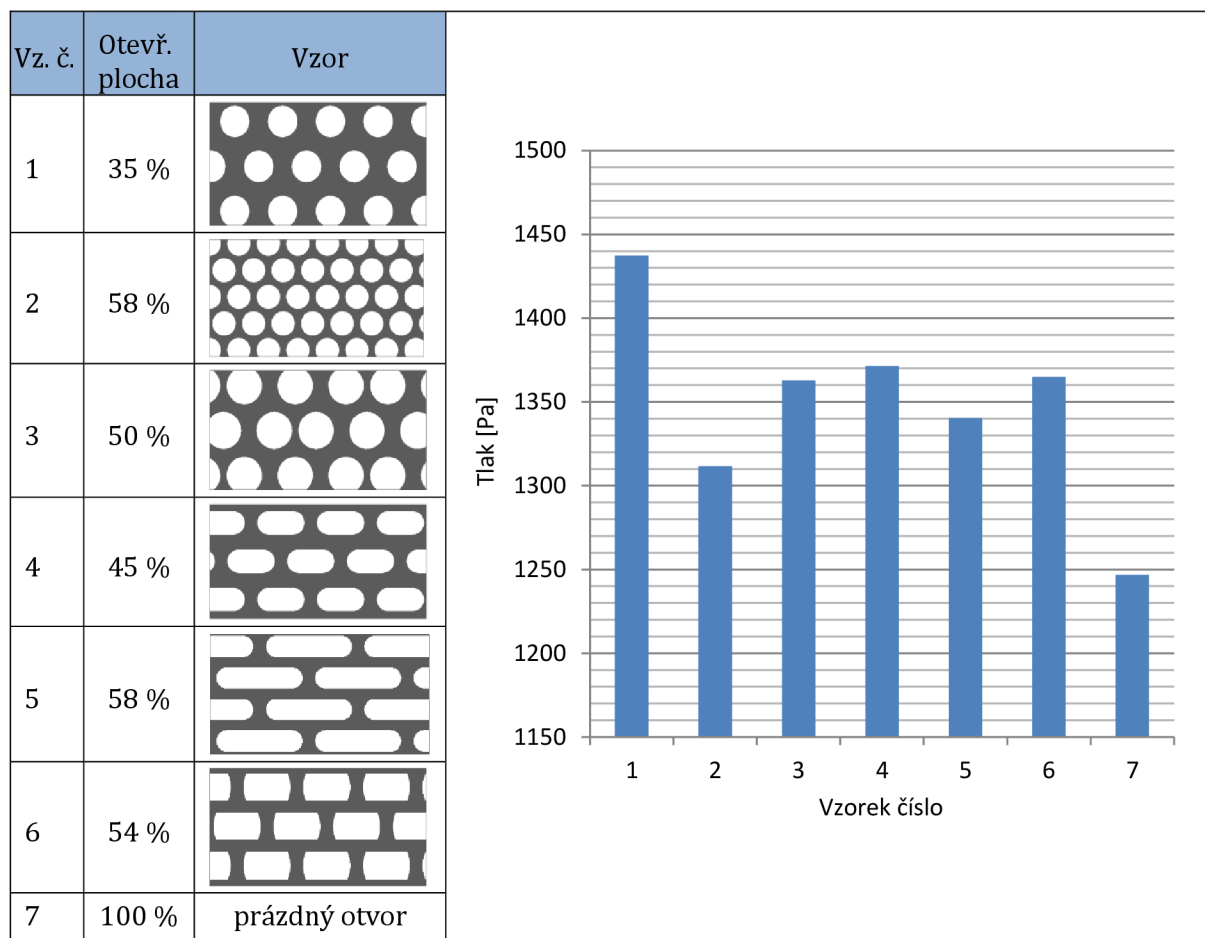
#### 4.8.3 Testování krycích mřížek na ventilátorové dráze

V rámci porovnávání různých typů krycích mřížek větracích otvorů bylo provedeno experimentální měření na ventilátorové dráze (Obr. 25) ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu (VZLÚ) v Praze [53]. Ventilátorová dráha byla sestavena k tomuto účelu a byla tvořena 7m tunelem o průměru 0,6 m s hladkým povrchem stěn. Na jednom konci byl umístěn ventilátor ovládaný frekvenčním měničem a na druhém konci panel s výřezem pro osazení testovaných mřížek (Obr. 25). Velikost výřezu pro umístění mřížek byla 55 x 500 mm. Počáteční rychlost proudění vzduchu činila  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tato rychlost proudění byla zvolena z důvodu, že při nízkých rychlostech je příliš vysoký poměr tlakových ztrát třením k ztrátám na mřížce a měření by tak bylo zatíženo větší chybou. Na šesti vybraných mřížkách (Tab. 12) s otvory různých tvarů i velikostí a s různou otevřenou plochou byly měřeny tlaky vzduchu proudícího skrze ně. Vzorky byly vybrány z dostupného sortimentu běžně prodávaných větracích okapních pásů, tak aby byly zastoupeny různé tvary otvorů – kruhové, podélné i čtvercové a různé procento otevřené plochy.



Obr. 25 Ventilátorová dráha ve VZLÚ v Praze, detail osazení mřížky v záklopu [53],[73]

Tab. 12 Vzorky testovaných mřížek a jejich tlakový spád [53]



V rámci experimentu byl měřen a zaznamenáván tlak vzduchu uvnitř tunelu 0,5 m před záklopem s mřížkou pěti tlakovými skenery umístěnými v plášti tunelu. Další sonda – pojízdná drátková sonda přímá (Dantec Dynamics) byla umístěna v těsné blízkosti mřížky z venkovní strany, ve vzdálenosti 20 mm od mřížky. Hodnoty z tlakových senzorů byly zprůměrovány pro každý vzorek a jsou uvedeny v Tab. 12. Výstupem pojízdné sondy za mřížkou byly rychlosti proudění vzduchu. Hodnoty rychlosti však byly významně ovlivněny polohou sondy vůči jednotlivým otvorům v mřížkách, proto bylo toto měření prohlášeno za irelevantní a data nejsou publikována v rámci této práce.

V následující kapitole jsou prezentovány výsledky jednotlivých experimentů a simulací. Je zde prezentován standard metodiky přesného výpočtu šíření tepla větraným střešním pláštěm. Nakonec je představen vlastní návrh konstrukčního řešení detailu hřebene pro podporu proudění ve větrané vrstvě střešního pláště.

## 5 Výsledky práce

Výsledky této práce jsou členěny do čtyř částí. **První část** se zabývá **šířením tepla v lehkém střešním plášti** během teplého letního období. V posledních letech se v České republice mění charakter počasí. Letní období jsou nyní mnohem sušší než dříve, převládají vysoké teploty a nízká oblačnost. Tato období trvají i několik týdnů, než nastává dílčí ochlazení. Proto se toto téma stává velmi aktuálním. Na začátku kapitoly 5.1 je prezentován proces prohřívání typické střešní skladby pro vybrané sekvence a dále povrchové teploty v týdenním a měsíčním horizontu. Následně jsou v této skladbě aplikovány různé materiály a sledován jejich vliv.

**Druhá část** výsledků je zaměřena na větranou vzduchovou vrstvu v rámci dvouplášťové střešní skladby. Je sledován vývoj **proudění ve větrané vzduchové vrstvě**, je hodnocen vliv sálání mezi krytinou a spodním pláštěm a je provedena celková bilance tepla pro větranou a nevětranou variantu střešního pláště. Je zde také diskutován vliv krycích mřížek větracích otvorů.

**Třetí oblast** výsledků je **souhrnem výpočetních postupů** a může sloužit jako manuál při volbě přesného výpočtu šíření tepla větraným střešním pláštěm. Současně dává podrobněji nahlédnout do principů reálných fyzikálních dějů ve větraném střešním plášti.

Ve **čtvrté části** je představen **návrh inovativního řešení detailu hřebene**, který podporuje větrání ve vzduchové dutině, tedy pomáhá odvádět přebytečné tepelné zisky.

### 5.1 Analýza hlavních faktorů ovlivňujících šíření tepla ve střešním plášti v letním období

Z důvodů ověření schopnosti lehkého střešního pláště odolávat letním podmínkám byla provedena počítačová simulace. Byl vytvořen výpočtový model nevětrané střešní konstrukce zahrnující i část podkroví a podroben podmínkám neustáleného teplotního stavu. Venkovní podmínky jsou zadány souhrnnou veličinou  $T_{sol-air}$ , tedy teplotou povrchu krytiny. Teplota vzduchu v interiéru reaguje na měnící se teploty krytiny. Počáteční podmínkou je konstantní teplota celého modelu 20 °C (293,15 K). Byla sledována teplotní odezva na cyklické zahřívání krytiny a prostup tepla skladbou směrem do interiéru. Tento

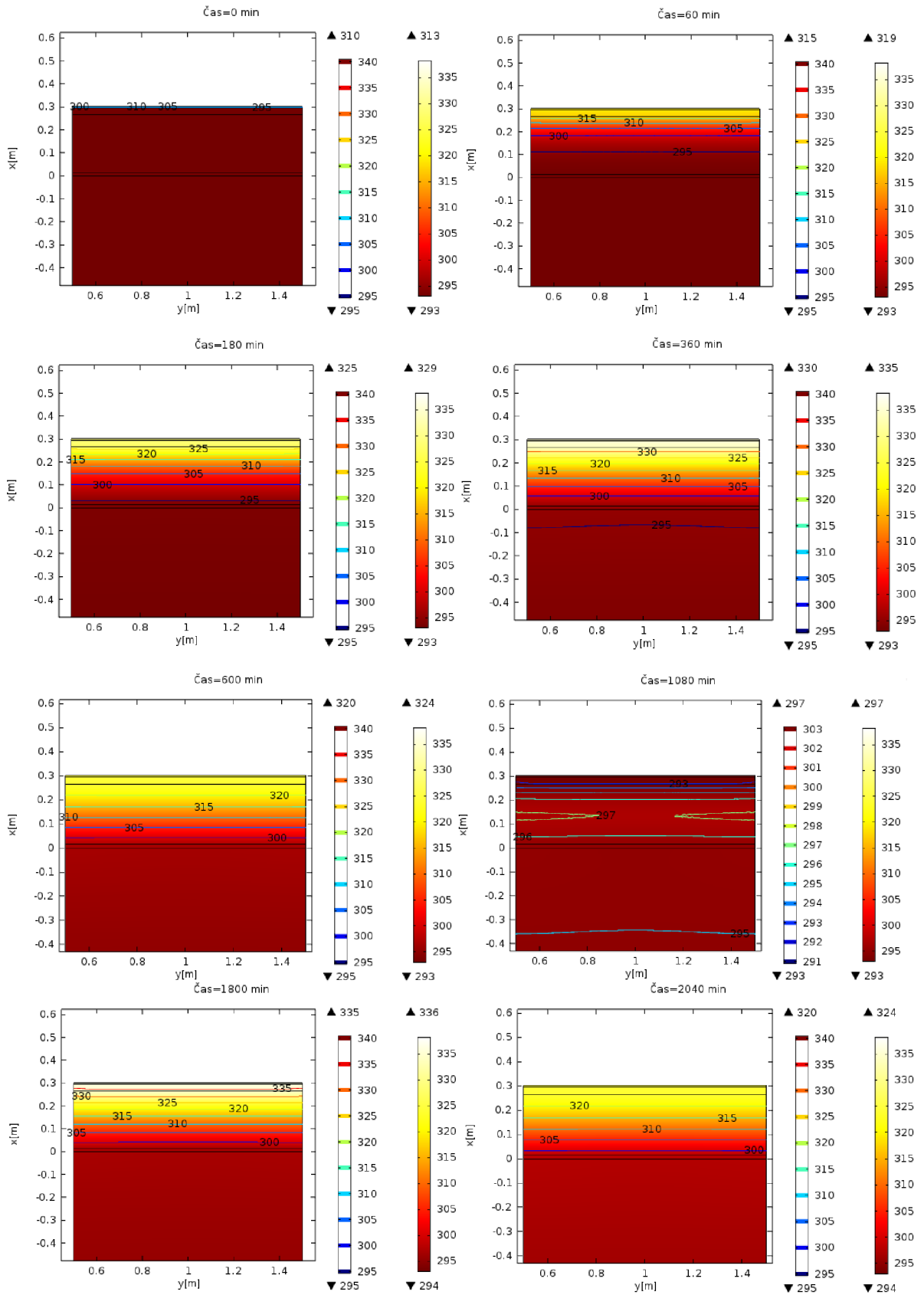
model byl zvolen s ohledem na možnost přiblížit se co nejvíce reálnému průběhu ve skutečných podmínkách, kdy po chladném období následuje období teplotních maxim. Situace byla modelována na případu pláště s velkým tepelným odporem, tedy konstrukcí se součinitelem prostupu tepla odpovídajícímu doporučené hodnotě pro nízkoenergetické a pasivní domy. Střešní krytina je uvažována z pálené keramiky, tepelná izolace z minerální vaty a podhled ze sádkkartonu. Geometrie modelu, okrajové podmínky a podrobnosti výpočtu jsou uvedeny v kapitole 4.6.2.

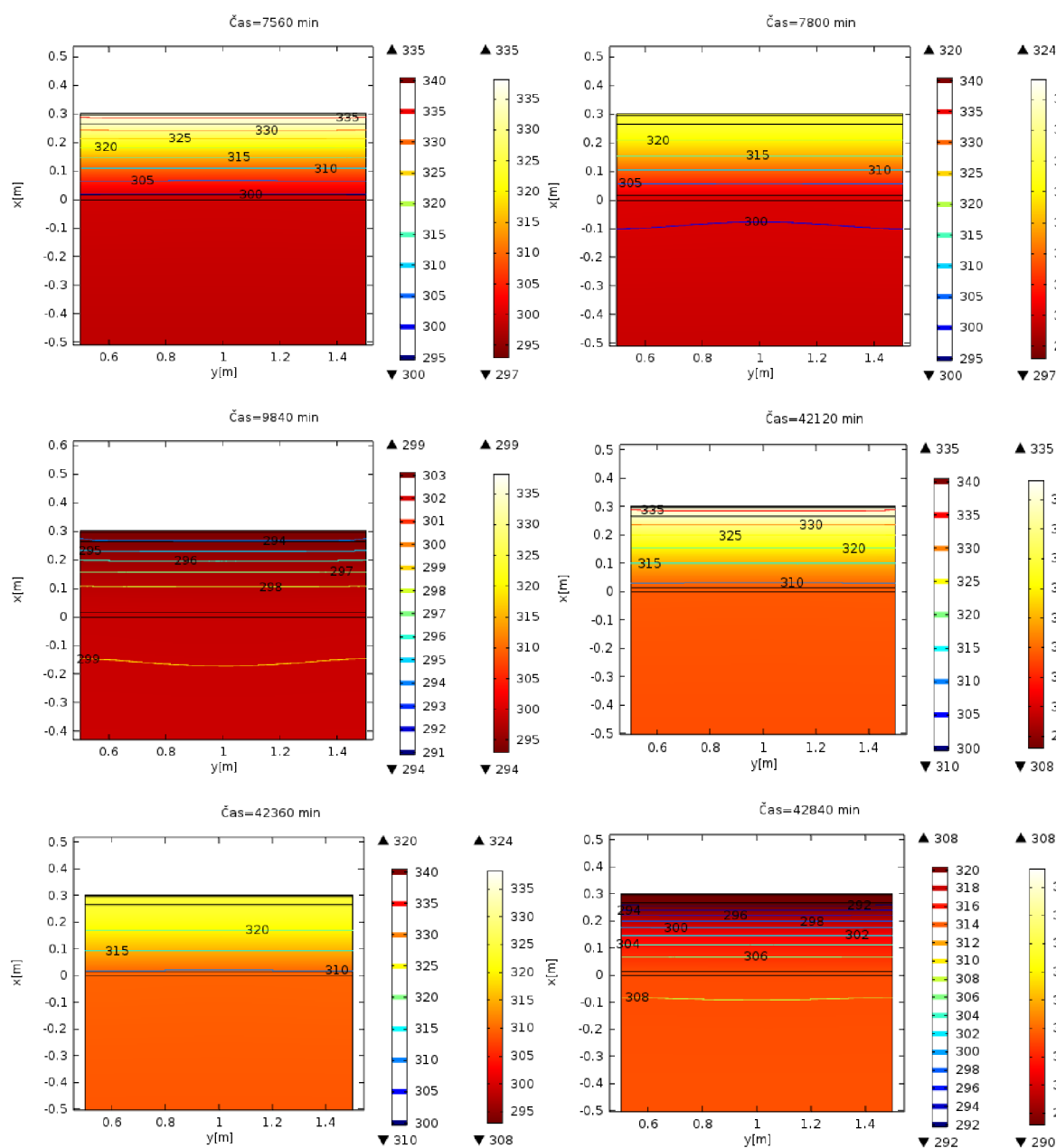
### 5.1.1 Posouzení „typické střešní skladby“

Výchozí variantou celé simulace je „typická střešní skladba“. Tato skladba byla pečlivě sledována při sinusoidálním teplotním namáháním s periodou 24 hodin představující denní cyklus. Byl sledován proces zahřívání skladby během dne a její chladnutí během noci. Zároveň bylo viditelné, že každým dnem se teploty ve střešní skladbě zvyšují a i v noci jsou teploty ve skladbě každým dalším dnem teplého období vyšší. Grafy v Obr. 26 jsou pokusem o zdokumentování tohoto procesu. Jsou zde zachyceny klíčové okamžiky – počáteční stav (0 min), 1 h (60 min), 3 h (180 min), 6 h (360 min), maximální teploty dosažené první den (600 min), nejchladnější stav první noc (1080 min), nejvyšší teplota krytiny druhý den (1800 min), nejvyšší teplota podhledu druhý den (2040 min), nejvyšší teplota krytiny šestý den (7560 min), nejvyšší teplota podhledu šestý den (7800 min), nejnižší noční teploty sedmý den (9860 min), nejvyšší teplota krytiny po měsíci teplého období (42120 min), nejvyšší teplota podhledu šestý den (42360 min) a nejnižší noční teploty sedmý den (42840 min).

Z výsledků počítačové simulace lze pozorovat teplotní profily v jednotlivých časových sekvencích. Teplota krytiny dosahuje během dne až 63 °C (336,15 K) a během noci klesá k 17 °C (290,15 K). Je zde patrný rychlý postup šíření tepla pláštěm. Řešení s použitím stavebních materiálů s malou objemovou hmotností a s malou tepelnou kapacitou způsobuje rychlé ohřátí konstrukce. Již během prvních dvou hodin od počátku expozice je polovina tloušťky tepelné izolace ohřátá na teplotu nad 27 °C (300,15 K), nicméně pro zvolený stupeň zateplení střešního pláště se stropní podhled zahřeje na 27 °C až šestý den teplého období. Po měsíci teplého období dosahuje stropní podhled až k 37 °C (310,15 K).

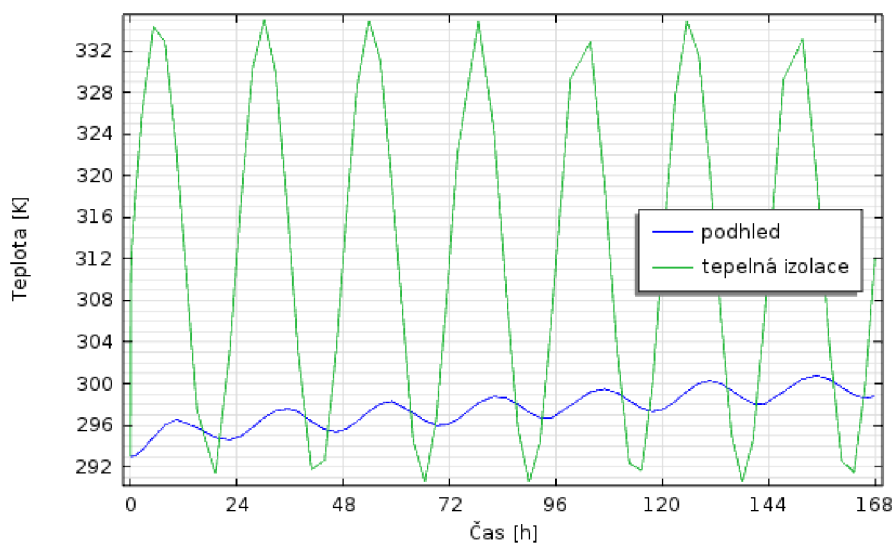




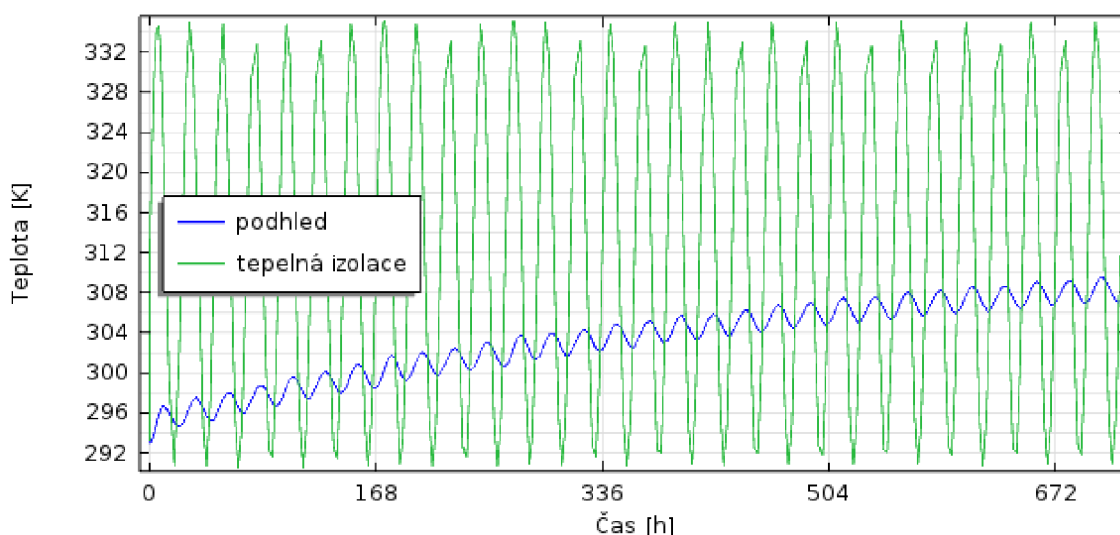


Obr. 26 Teplotní profil střešního pláště a části přilehlého interiéru v časech od počátku simulace 0h, 1h, 3h, 6h, 10h, 18h, 30h, 34h, 126h, 130h 164h (cca 1 týden), 702h (29 dní a 6h), 706h (29 dní a 10h) a 714h (29dní a 18h), stupnice jsou uvedeny v Kelvinech

Pro snadnější vyhodnocení chování střešního pláště v čase byla vynesena do grafu teplota horního povrchu krytiny a spodního líce podhledu v týdenním horizontu (Obr. 27) a v měsíčním horizontu (Obr. 28). Je patrný fázový posun teplotního kmitu přibližně 5 hodin a teplotní útlum přibližně 38 °C během prvního dne teplého období a po měsíčním teplém období je teplotní útlum konstrukce již jen 25 °C.



Obr. 27 Průběh povrchových teplot ve střešním plášti pasivní budovy, materiálové řešení s minerální vatou a sádkartonem v týdenním horizontu



Obr. 28 Průběh povrchových teplot ve střešním plášti pasivní budovy, materiálové řešení s minerální vatou a sádkartonem v měsíčním horizontu

V následujících kapitolách je pozornost soustředěna na zkoumání vlivu jednotlivých konstrukčních opatření používaných ke snížení prostupu tepla střechou – materiál tepelné izolace, materiál podhledu, jejich kombinace, reflexní povrchy v dutině, barva krytiny. Opatření jsou aplikována na stejný výpočetní model. Hodnocení je prováděno již jen pro týdenní horizont teplého období. Možnosti existujících konstrukčních opatření snižujících tepelné zisky blíže popisuje kapitola 2.1.

### 5.1.2 Materiál tepelné izolace

Tepelná izolace v „typické střešní skladbě“ (bližší popsána v kapitole 2.3) bývá tvořena minerální vatou, což nemá příznivý vliv na letní tepelnou stabilitu místností v podkroví. S využitím stejného výpočtového modelu jako v předchozí kapitole byly prověřeny jiné druhy tepelných izolací (Tab. 13), včetně přírodní z dřevních vláken, která byla vytipována jako vhodná pro své dobré tepelně akumulční vlastnosti. K porovnání byla zvolena minerální vata, EPS, XPS, PUR, dřevovláknitá izolace a foukaná celulóza. Bližší informace k tepelné akumulaci jsou uvedeny v kapitole 2.1.1.

Tab. 13 Tepelná izolace – materiálové charakteristiky a dimenze<sup>1</sup>

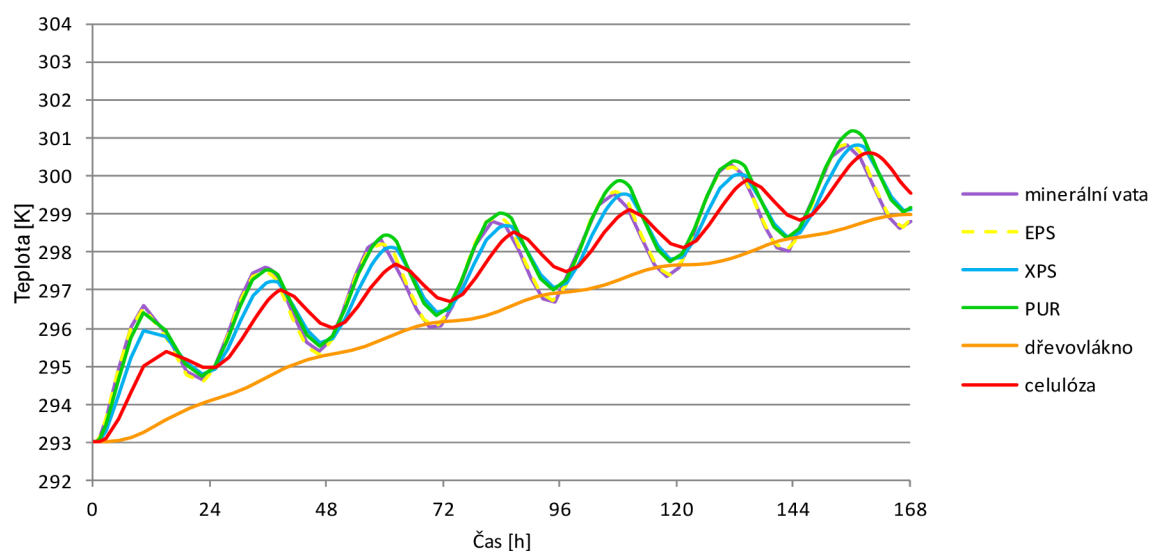
|                  | $d$ [m] | $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ] | $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] |
|------------------|---------|--|------------------------------|---|
| minerální vata   | 0,25    | 0,040  | 40                           | 840   |
| EPS              | 0,24    | 0,037  | 25                           | 1270  |
| XPS              | 0,22    | 0,034  | 30                           | 2060  |
| PUR              | 0,20    | 0,032  | 35                           | 1500  |
| dřevovláknitá    | 0,27    | 0,043  | 150                          | 2100  |
| foukaná celulóza | 0,25    | 0,040  | 50                           | 2000  |

<sup>1</sup> Převzato z technických listů výrobců, nebyly-li údaje jednoznačné, pak byla použita hodnota z technických tabulek.

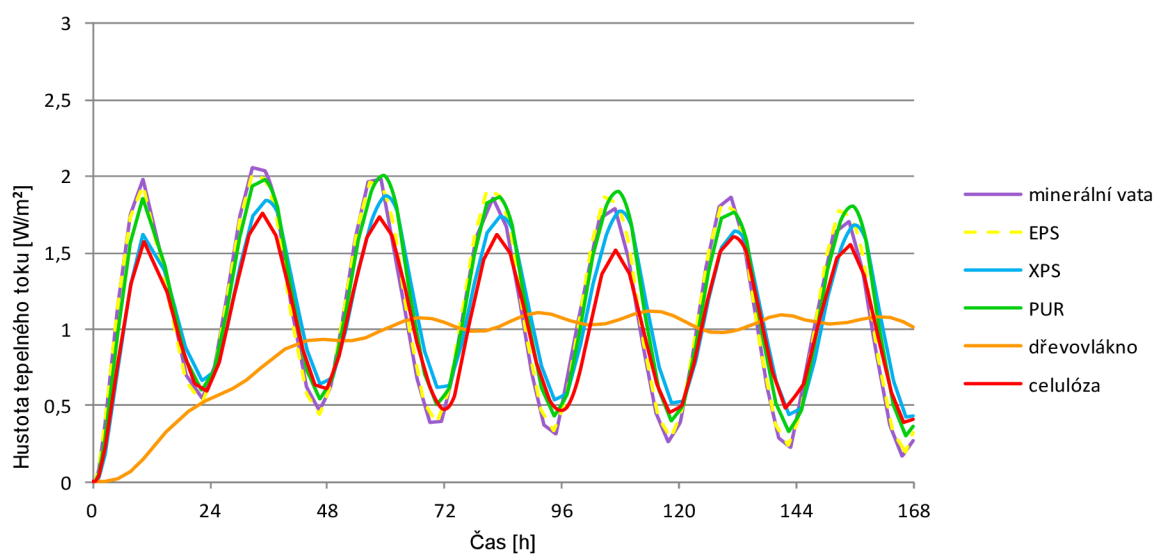
Výsledky simulace (Obr. 29) ukazují, že varianty s minerální vatou, EPS a PUR dosahují téměř shodných teplot na spodním líci střešního pláště. Nepatrně nižších hodnot během dne dosahuje varianta s XPS. Stejný teplotní průběh lze považovat za důsledek podobných hodnot plošné tepelné kapacity těchto čtyř materiálů (Tab. 14). S využitím celulózové foukané izolace jsou redukovány tepelné zisky skrze střešní plášť oproti zmíněným izolacím zejména během prvního dne teplého období. Od druhého dne dále již není její přínos tak významný. Jednoznačně nejlepších výsledků dosáhla střešní skladba s dřevovláknitou tepelnou izolací. Teplotní útlum oproti ostatním izolacím je poměrně výrazný (až o 3 °C), a to po celou dobu sedmidenního teplého období. U varianty s dřevovláknitou izolací nedochází k teplotním výkyvům mezi dnem a nocí, ale skladba se kontinuálně ohřívá každým dnem. Tepelné toky v místě stropního líce jsou na Obr. 30.

Tab. 14 Tepelná izolace – vlastnosti materiálů

|  | minerální vata       | EPS                  | XPS                 | PUR                 | dřevovláknno        | foukaná celulóza    |
|--|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]         | $11.9 \cdot 10^{-7}$ | $11.6 \cdot 10^{-7}$ | $5.5 \cdot 10^{-7}$ | $6.1 \cdot 10^{-7}$ | $4.0 \cdot 10^{-7}$ | $1.4 \cdot 10^{-7}$ |
| objemová tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ] | $3.36 \cdot 10^4$    | $3.18 \cdot 10^4$    | $6.18 \cdot 10^4$   | $5.25 \cdot 10^4$   | $31.50 \cdot 10^4$  | $10.00 \cdot 10^4$  |
| plošná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]   | 840                  | 763                  | 1360                | 1050                | 8505                | 2500                |



Obr. 29 Vliv materiálu tepelné izolace: Teploty na lici stropního podhledu v periodě 7 dní



Obr. 30 Vliv materiálu tepelné izolace: Tepelné toky na lici stropního podhledu v periodě 7 dní

Výsledky studie ukazují, že obměnou materiálu tepelné izolace a použitím takové, která má vysokou objemovou tepelnou kapacitu, v tomto případě dřevovláknitá izolace, lze snížit teplotu na vnitřním líci střešního pláště poměrně znatelně.

### 5.1.3 Materiál stropního podhledu

K vytvoření stropního podhledu na šikmé střešní konstrukci se nejčastěji využívá sádrokartonu. Toto řešení je aplikováno i v posouzení „typické střešní skladby“ (kapitola 5.1.1). Pro vytvoření podhledu lze využít i jiné materiály, z nichž některé mají mnohem vyšší tepelně akumulaci schopnost. Střešní skladba s vybranými druhy stropních podhledů (Tab. 15) byly podrobeny počítačové simulaci v periodě 7 dní, stejně jako v předchozí kapitole tomu bylo u různých druhů tepelné izolace. Tepelná izolace je tvořena u všech variant minerální vatou. Zvolené varianty podhledu jsou: sádrokartón, dvojitá vrstva sádrokartónu (toto řešení je v praxi často užíváno), OSB desky, dřevěné palubky, panely z lisované slámy a jílové panely.

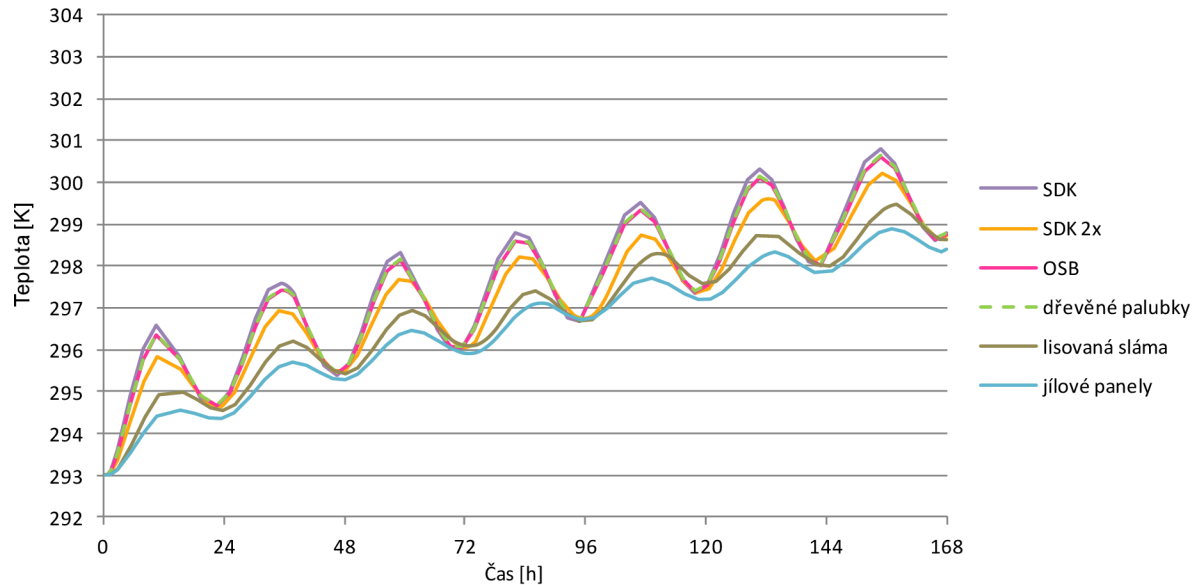
Tab. 15 Stropní podhled – materiálové charakteristiky a dimenze<sup>1</sup>

|                        | $d$ [m] | $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ] | $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] |
|------------------------|---------|--|------------------------------|---|
| sádrokartón            | 0,015   | 0,220  | 750                          | 1060  |
| OSB                    | 0,015   | 0,130  | 600                          | 1630  |
| dřevěné palubky        | 0,015   | 0,180  | 400                          | 2510  |
| panel z lisované slámy | 0,058   | 0,099  | 379                          | 1630  |
| jílový panel           | 0,025   | 0,330  | 1520                         | 2100  |

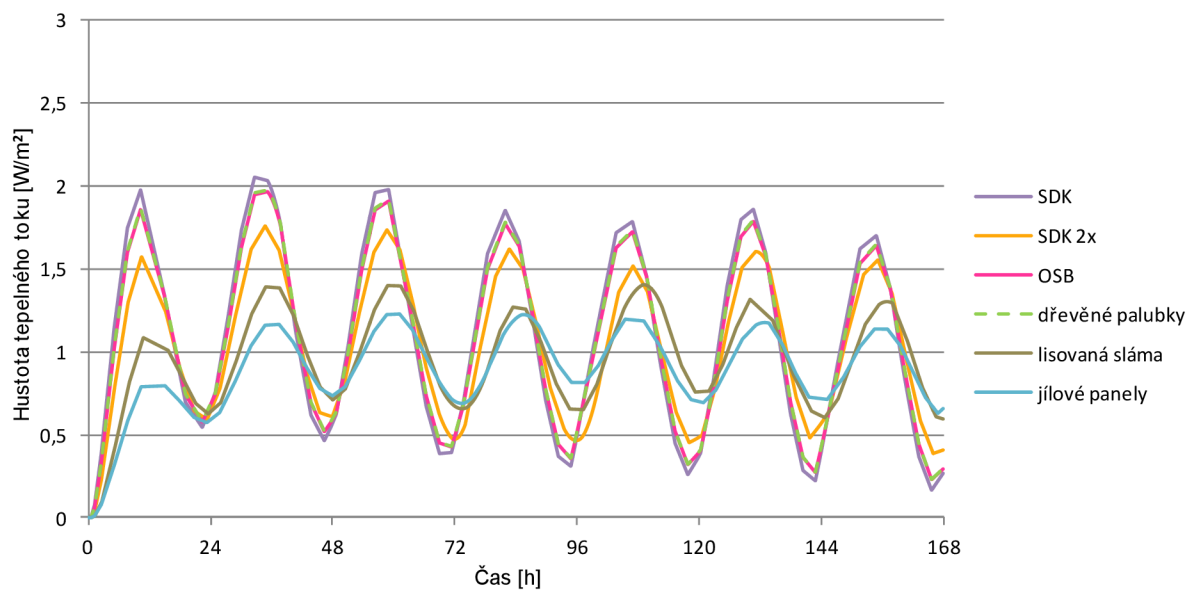
<sup>1</sup> Převzato z technických listů výrobců, nebyly-li údaje jednoznačné, pak byla použita hodnota z technických tabulek, v případě měrné tepelné kapacity slámy se dostupné informace značně lišily, proto byla zvolena hodnota z měření pro zemědělské účely [54], která přibližně odpovídá i ostatním přírodním stavebním materiálům.

Nejvyšší teploty byly zaznamenány u třech variant současně – s podhledem tvořeným jednou vrstvou sádrokartónu, s OSB deskou a s dřevěnými palubkami. Průběhy teplot na stropním líci jsou u těchto tří variant naprosto shodné. Při aplikaci dvou vrstev sádrokartónu se teplotní namáhání interiéru redukuje o necelý 1 °C na stropním povrchu.

Významnější teplotní redukce bylo dosaženo ve variantě s panely z lisované slámy, kdy teplota podhledu během dnů klesá o 1,5 °C oproti variantě s jednou vrstvou sádrokartónu. Nejlepších výsledků dosáhlo řešení s podhledem z jílových panelů, oproti variantě se sádrokartonem byly teploty stropu sníženy až o 2 °C. Během nocí je teplota obdobná u všech variant. Tepelné toky v místě spodního líce střešního pláště zobrazuje Obr. 32.



Obr. 31 Vliv materiálu podhledu: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní



Obr. 32 Vliv materiálu podhledu: Tepelné toky na líci stropního podhledu v periodě 7 dní

Při porovnání plošné tepelné kapacity použitých podhledů (Tab. 16) je zřejmé, že sádrokartón, OSB desky a dřevěné palubky budou mít podobné výsledky, což se potvrdila i simulace. Též u ostatních typů podhledů odpovídá jejich přínos k redukcí tepelných zisků hodnotám plošné tepelné kapacity. Jílové panely, které dosáhly s přehledem největšího teplotního útlumu konstrukce, mají téměř 7x větší plošnou tepelnou kapacitu oproti běžně používanému sádrokartónu.

Tab. 16 Stropní podhled – vlastnosti materiálů

|  | sádrokartón         | sádrokartón 2x      | OSB                 | dřevěné palubky     | panel z lisované slámy | jílový panel        |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| součinitel teplotní vodivosti [ $m^2s^{-1}$ ]        | $2,8 \cdot 10^{-7}$ | $2,8 \cdot 10^{-7}$ | $1,3 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-7}$ | $1,6 \cdot 10^{-7}$    | $1,0 \cdot 10^{-7}$ |
| objemová tepelná kapacita [ $J \cdot m^{-3}K^{-1}$ ] | $79,5 \cdot 10^4$   | $79,5 \cdot 10^4$   | $97,8 \cdot 10^4$   | $100,4 \cdot 10^4$  | $61,8 \cdot 10^4$      | $319,2 \cdot 10^4$  |
| plošná tepelná kapacita [ $J \cdot m^{-2}K^{-1}$ ]   | 11925               | 23850               | 14670               | 15060               | 35830                  | 79800               |

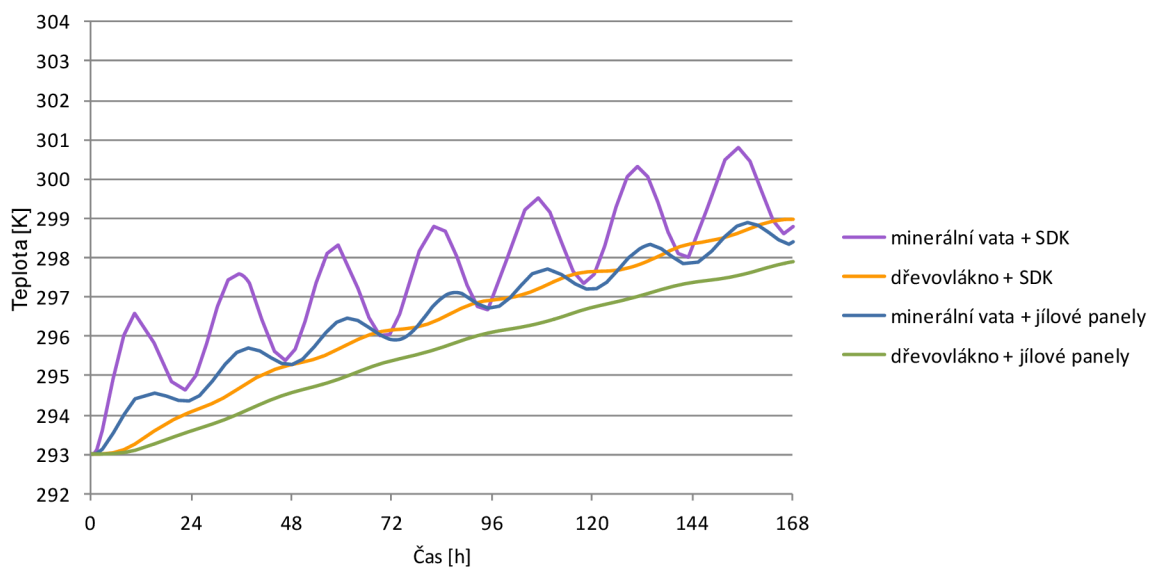
Z této studie vyplývá poznatek, že návrh stropního podhledu s vyšší plošnou tepelnou kapacitou dokáže poměrně významně ovlivnit teplotu podhledu, a tím i teplotu vzduchu v interiéru. V tomto případě jsou to zejména jílové panely, ale také panely z lisované slámy zajišťují významnou redukci.

#### 5.1.4 Kombinace materiálového řešení tepelné izolace a podhledu

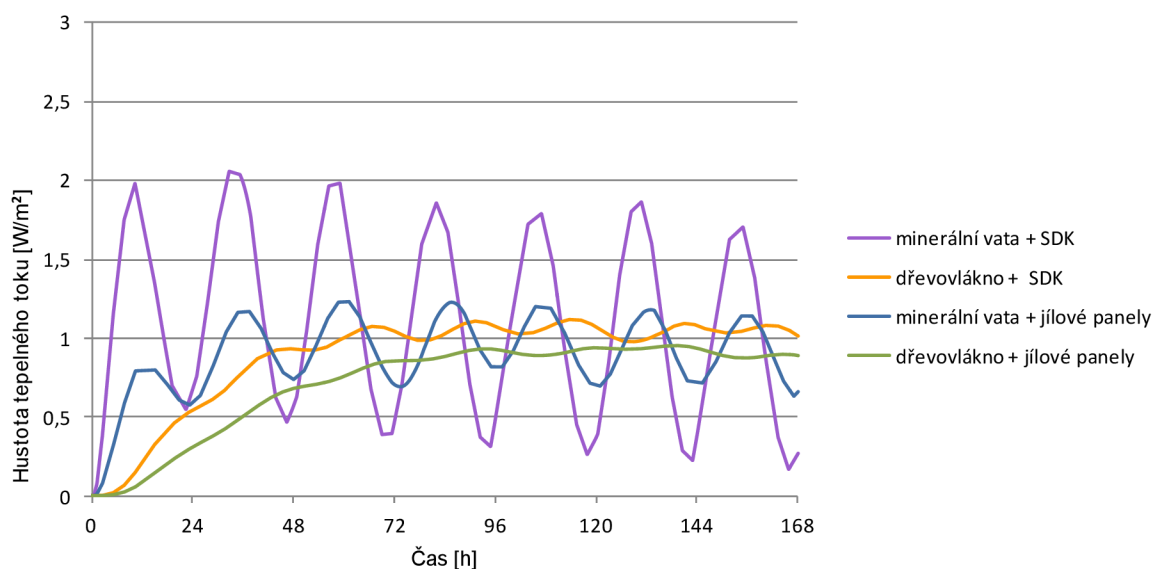
V předchozích kapitolách byl zkoumán vliv zvýšení tepelně akumuláční schopnosti tepelné izolace a stropního podhledu na tepelné zisky skrze střešní plášť. Ze všech materiálových variant tepelně izolační vrstvy vykazovala největší teplotní útlum dřevovláknitá izolace. Byla pozorována teplotní redukce až 3 °C oproti minerální vatě. Při porovnání stropních podhledů dosáhly největšího teplotního útlumu jílové desky, oproti variantě se sádrokartónem činila teplotní redukce až 2 °C. Je nutné zde znovu zmínit, že tyto hodnoty se vztahují k šíření tepla střešním pláštěm v neustáleném teplotním stavu a bez vlivu oken a dalších tepelných zdrojů. V následující simulaci bylo ověřeno tepelně technické chování skladby při kombinaci dřevovláknité tepelné izolace a podhledu z jílových desek. Byly porovnávány čtyři varanty: „typická střešní skladba“ (minerální



vata se sádrokartónem), dřevovláknitá tepelná izolace se sádrokartónem, minerální vata s jílovými panely a dřevovláknitá izolace s jílovými panely.



Obr. 33 Vliv kombinace materiálů tepelné izolace a podhledu: Teploty na lici stropního podhledu v periodě 7 dní



Obr. 34 Vliv kombinace materiálů tepelné izolace a podhledu: Tepelné toky na lici stropního podhledu v periodě 7 dní

V grafu na Obr. 33 a Obr. 34 je uvedeno srovnání všech kombinací izolace (minerální vata a dřevovláknitá) a podhledu (sádrokartón a jílové panely). Křivky teplotního průběhu na

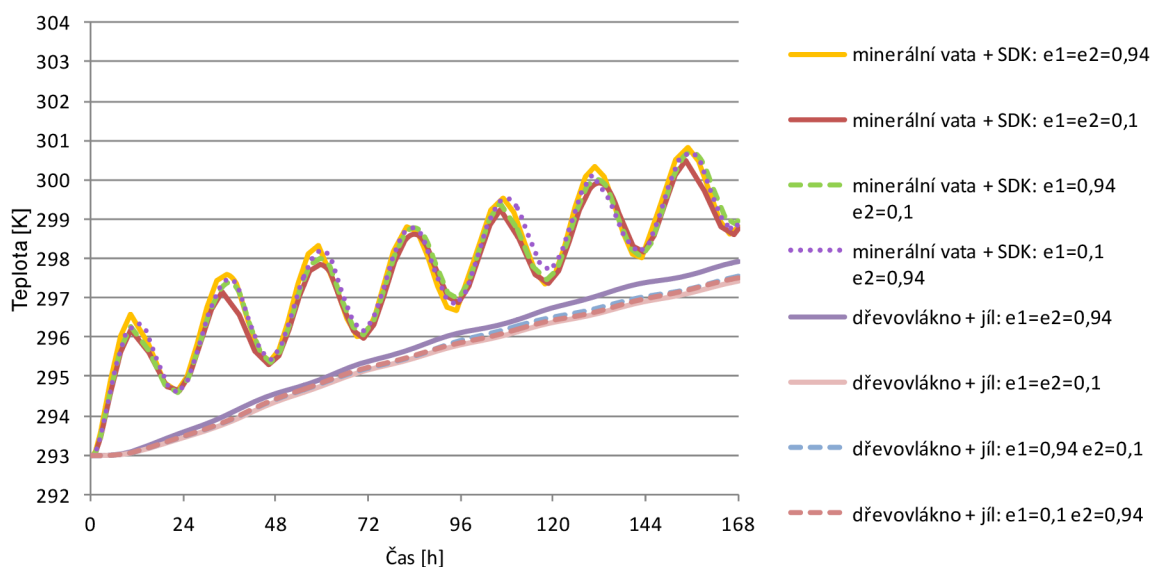
stropním povrchu mají u obou variant s dřevovláknitou izolací plynule rostoucí průběh. Na rozdíl od variant s minerální vatou, kde je patrné kolísání hodnot během dne a noci. Vliv jílových panelů ve skladbě s minerální vatou se projevil redukcí teploty, ale výkyvy mezi dnem a nocí jsou zde stále patrné. U varianty s dřevovláknitou izolací a sádrokartonovým podhledem je výraznější teplotní útlum a zejména během prvních dní teplého období více redukuje teploty na stropním líci. Při porovnání těchto dvou opatření samostatně, je výhodnější raději zvolit variantu s dřevovláknitou izolací. Nejlepšího výsledku je každopádně dosaženo kombinací dřevovláknité tepelné izolace a podhledu z jílových panelů. Při tomto řešení je dosažen maximální teplotní útlum oproti variantě bez konstrukčních opatření, redukce činí 3,5 °C. Dokonce i během sedmého dne teplého období je teplotní útlum výrazný.

#### 5.1.5 Reflexní povrchy

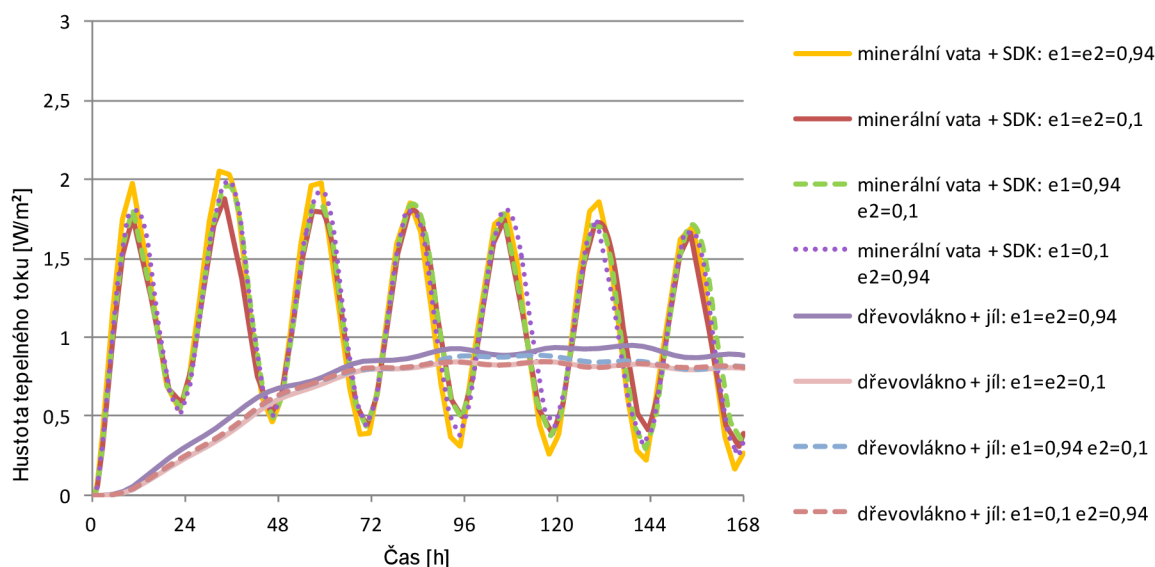
Několik výzkumů potvrdilo redukcí tepelných zisků přes obvodový plášť vlivem umístění reflexní fólie do skladby. V této kapitole je hodnocen vliv reflexních povrchů v nevětrané vzduchové dutině pod krytinou u lehkého střešního pláště pasivní budovy. Bylo vytvořeno několik variant umístění reflexního povrchu – na spodním líci krytiny ( $\varepsilon_1 = 0,1$ ;  $\varepsilon_2 = 0,94$ ), na horním povrchu tepelné izolace ( $\varepsilon_1 = 0,94$ ;  $\varepsilon_2 = 0,1$ ) a na obou pozicích ( $\varepsilon_1 = 0,1$ ;  $\varepsilon_2 = 0,1$ ). Kromě klasického provedení skladby z minerální vaty a sádrokartónu byla ta stejná opatření aplikována i na skladbu s dřevovláknitou izolací a podhledem z jílových panelů. Teploty na povrchu stropního podhledu jsou uvedeny v Obr. 35 a tepelné toky v Obr. 36.

Navzdory původním předpokladům, se umístění reflexní fólie ve skladbě téměř nepromítlo na teplotu podhledu. Z výsledků lze pozorovat alespoň náznak redukce tepelných zisků u reflexních variant při aplikaci ve skladbě s dřevovláknitou izolací a jílovými podhledy. Teplotní rozdíl na stropním líci se začíná projevovat až s větším počtem teplých dnů, po týdnu činí rozdíl přibližně 0,5 °C. Tendence vývoje teplot na stropním povrchu naznačuje, že aplikace reflexních povrchů by mělo význam při teplém období delším než 1 týden, přičemž nejlepších výsledků by dosáhla varianta s oběma reflexními povrchy. U skladby s klasickými materiály umístění reflexního povrchu nehraje

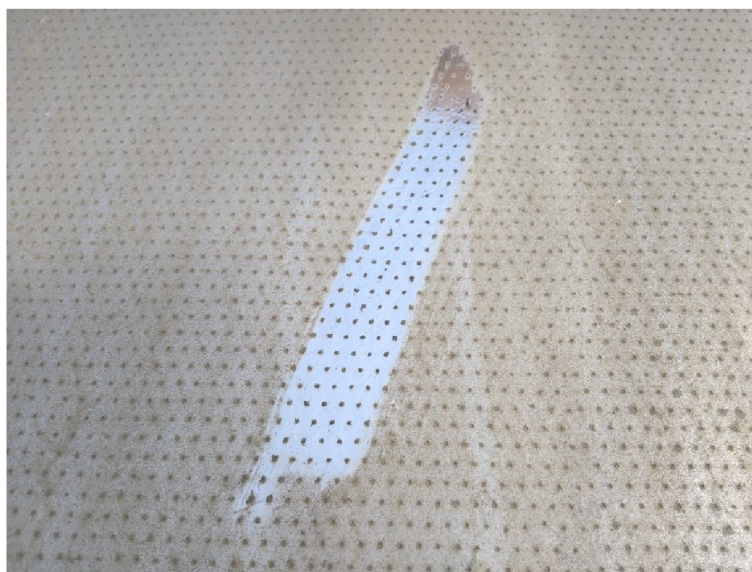
významnou roli a teploty podhledu dosahují obdobných hodnot ve všech reflexních variantách. Nicméně je třeba připomenout, že výsledky se týkají nevětraného střešního pláště a chování reflexních povrchů u větrané varianty je hodnoceno v kapitole 5.2.2.



Obr. 35 Vliv reflexních povrchů: Teploty na lici stropního podhledu v periodě 7 dní



Obr. 36 Vliv reflexních povrchů: Tepelné toky na lici stropního podhledu v periodě 7 dní



*Obr. 37 Ukázka zanesení reflexní fólie nečistotami*

Je třeba počítat i s tím, že se časem na površích usadí nečistoty a jejich reflexní vlastnosti se výrazně zredukuje. Na Obr. 37 je zachycena reflexní podstřešní fólie po 4 letech od zabudování do střešního pláště.

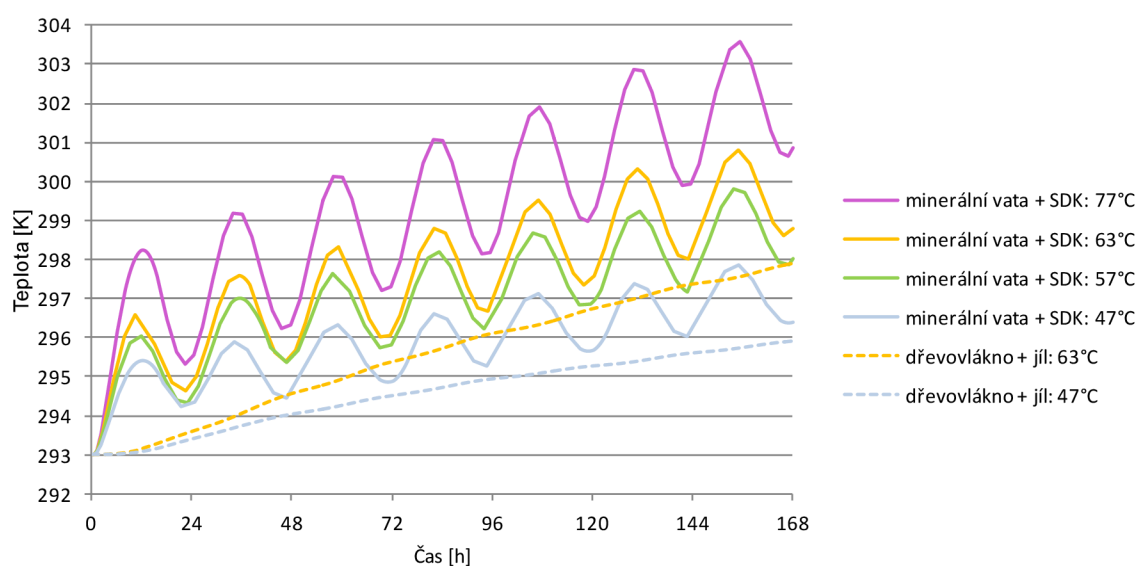
### **5.1.6 Barva krytiny**

Z experimentálního měření teplot střešních tašek popsaného v kapitole 4.8.1 byly zjištěny reálné hodnoty teplot dosažených na různých typech krytiny. Jedná se o tzv. rovnocennou sluneční teplotu, kterou lze využít jako okrajovou podmínku pro zadání výpočtu. Na měřených vzorcích bylo dosaženo maximálních teplot v hodnotách od 57 °C do 77 °C pro venkovní teplotu 32 °C a intenzitu slunečního záření okolo 900 W·m<sup>-2</sup>. Zastoupení zde měly různé materiály a barvy tašek kromě velmi světlých odstínů. Obr. 38 ukazuje, jakou měrou ovlivňuje volba druhu a barvy krytiny teplotu stropního povrchu.

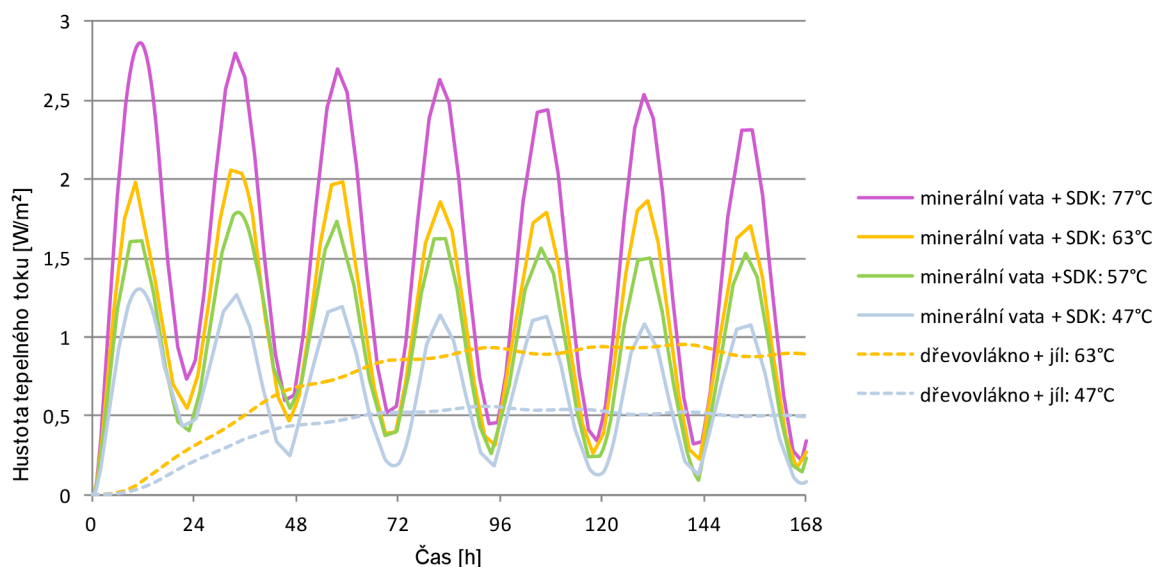
Výsledky simulace ukazují jaký vliv má teplota krytiny na šíření tepla střešním pláštěm. Tento vliv se ukázal být dosti významný. Při volbě hliníkové krytiny s minerálním posypem v tmavě hnědé barvě dosahují teploty střešního povrchu hodnot okolo 77 °C. Tímto je již první den teplého období dosaženo teploty stropního líce 25 °C (298,15 K), třetího dne je dosaženo hranice 27 °C (300,15 K) a po další dny stále stoupá. Všechny studie uvedeny v předchozích kapitolách byly zpracovány pro rovnocennou sluneční

teplotu s maximy dosahujícími 63 °C, což odpovídá páleným taškám střední barvy za letních okrajových podmínek. Oproti plechové krytině s minerálním posypem dosahuje stropní líc až o 2,5 °C nižších teplot. Při volbě krytiny s nejnižší dosaženou teplotou během experimentálního měření na vzorcích, tj. 57 °C, lze teplotu redukovat o další 1 °C. Dalšími teplotními redukcí lze docílit použitím střešní krytiny s vysokou odrazivostí, např. v bílé barvě. Tento typ krytiny nebyl zahrnut v experimentálním měření, ale její maximální teploty dosahují jen o 10 – 15 °C vyšších hodnot než je teplota vzduchu [55]. Dosáhne-li maximální hodnota krytiny pouze 47 °C, pak teplotní redukce oproti nejméně vhodné krytině je 5,5 °C. Dále je patrná rozbíhavá tendence jednotlivých křivek (Obr. 38), tedy, že rozdíly teplot se s délkou teplého období umocňují. Tzn., že tmavá krytina, pohlcující velkou část slunečního záření, přispívá k větším tepelným ziskům, které postupně narůstají. Tepelné toky v místě stropního podhledu jsou znázorněny v Obr. 39.

Dvě varianty střešní krytiny byly simulovány také ve skladbě s dřevovláknitou tepelnou izolací a jílovými podhledovými deskami (max. teplota krytiny 63 °C a 47 °C). V časovém horizontu 1 týden lze výběrem vhodné krytiny u tohoto střešního souvrství snížit teplotu stropního povrchu až o 2 °C. Celková redukce skladby s dřevovláknitou tepelnou izolací, jílovými podhledovými deskami a světlou krytinou s vysokou odrazivostí oproti „typické střešní skladbě“ představuje 5,5 °C.



Obr. 38 Vliv barvy krytiny: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní



Obr. 39 Vliv barvy krytiny: Tepelné toky na líci stropního podhledu v periodě 7 dní

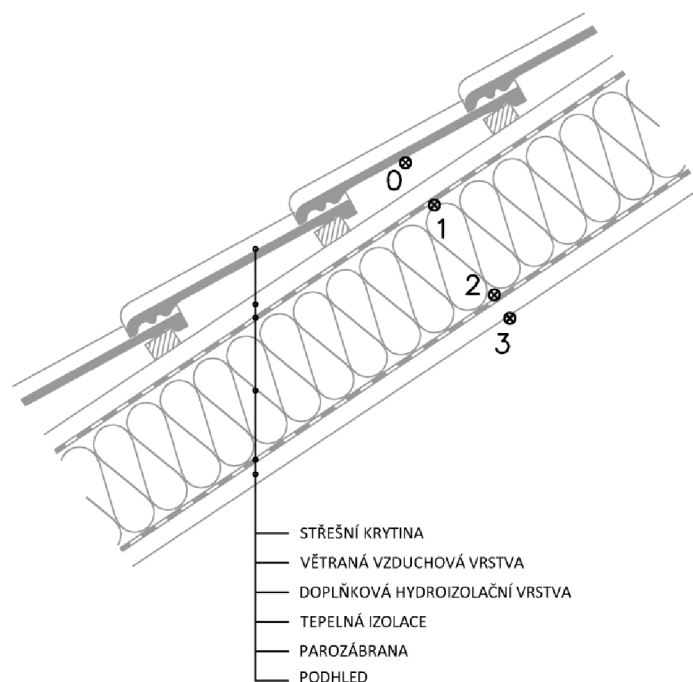
Studie dokazuje jak významný vliv má teplota horního líce krytiny na teplotu podhledu. Teplota krytiny je jednoznačně dána zejména barvou a také materiálem krytiny. Maximální teploty vybraných druhů krytiny během letního dne uvádí kapitola 4.8.1.

### 5.1.7 Experimentální ověření účinnosti vybraných variant

Na modelech střešních pláštů blíže popsanych v kapitole 4.8.2 byly měřeny teploty ve skladbě po celé letní období roku 2014. Pro vyhodnocení výsledků bylo vybráno měřené období 14. 7. – 20. 7. 2014, kdy klimatické podmínky nejlépe odpovídaly charakteru teplých letních dnů, tj. vysoká teplota vzduchu a slunečné počasí. Denní maxima teploty vzduchu se pohybovala mezi 30 – 32,7 °C, během nocí teploty poklesly k 16 – 18,5 °C. Intenzita přímého slunečního záření dosahovala při denních maximech 835 – 1120 W·m<sup>-2</sup>. Poloha teplotních snímačů je označena 1 – 3, viz Obr. 40 a tomu odpovídá značení v grafech. Čidla v poloze 1 jsou umístěna na rubové straně podstřešní fólie, v poloze 2 jsou na rozhraní tepelné izolace a parozábrany a v poloze 3 jsou osazena na spodním povrchu stropního podhledu. Střešní skladba v poli A odpovídá variantě se sádrokartonovým podhledem a šedou podstřešní fólií, průběhy teplot jsou na Obr. 41. V poli B je ve skladbě umístěna reflexní fólie a sádrokartonový podhled, viz Obr. 42. Pole C má ve skladbě šedou podstřešní fólii a podhled z panelů z lisované slámy, Obr. 43. V poli D je použita

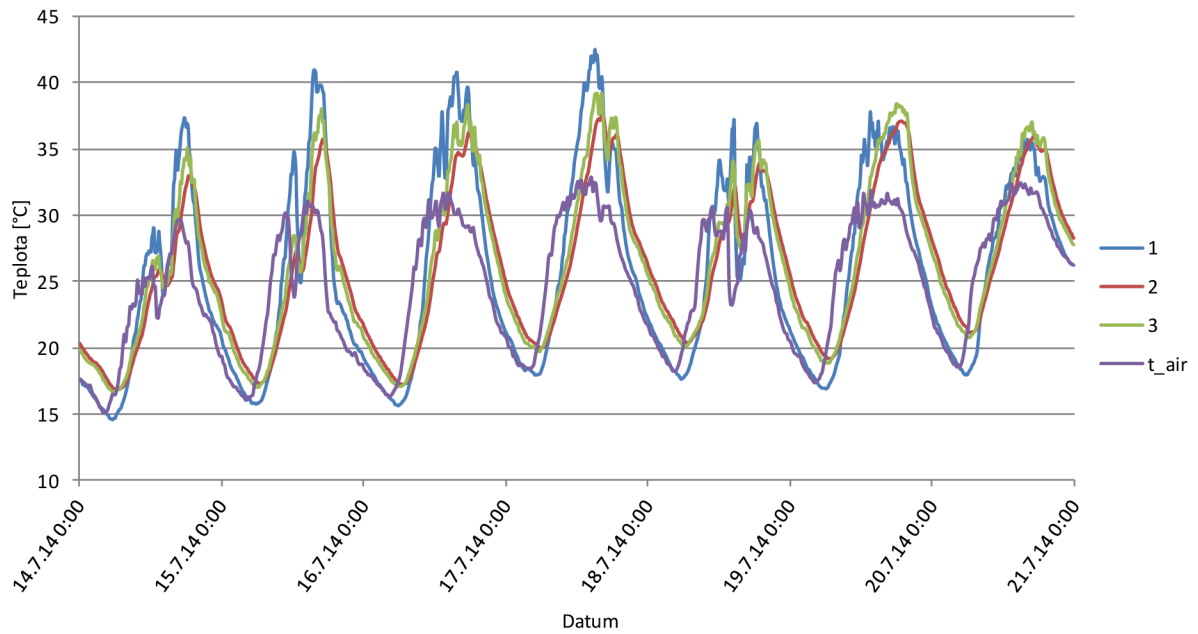


kombinace reflexní fólie a panelů z lisované slámy, Obr. 44. Teplota venkovního vzduchu je uvedena u každého grafu, intenzita přímého slunečního záření pro zvolené období je vyobrazena na Obr. 45.

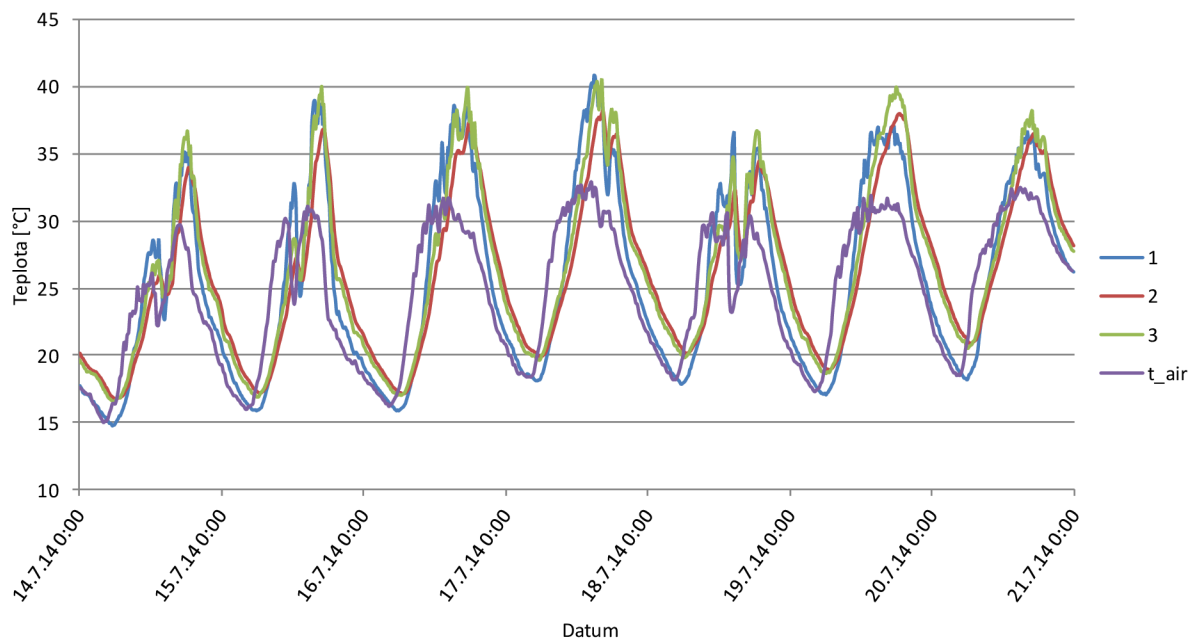


Obr. 40 Poloha teplotních snímačů ve střešní skladbě

Při podrobnějším porovnání průběhů teplot v poloze 1, tj. na rubu podstřešní fólie, ve všech čtyřech skladbách je zřejmé, že teploty jsou zde ovlivňovány pouze typem podstřešní fólie nikoliv materiálem podhledu. Během denních maxim dosahují teploty u šedé fólie přibližně o 2 °C vyšších hodnot než u reflexní fólie. U šedé fólie byla naměřena denní teplotní maxima 37 - 42 °C, kdežto u reflexní fólie 35 – 40,5 °C. Oproti původnímu předpokladu, inspirovaném experimentem Biwole et al. [6], jsou teploty spodního líce podhledu (poloha 3) značně ovlivněny tepelným zářením odraženým od přilehlých povrchů terasy a teplem emitovaným těmito povrchy. Proto dosahuje teplota podhledu podobných hodnot jako podstřešní fólie, případně ji převyšuje. Následně bylo učiněno konstrukční opatření popsané blíže v kapitole 4.8.2, které mělo tento vliv redukovat. Data z tohoto měření jsou prezentována na vybraném dni 4. 9. 2014, viz dále v této kapitole. I přes tento nedostatek lze vyvodit vliv materiálového řešení na průběh teplot v poloze 2, tedy mezi tepelnou izolací a podhledem. Z grafu na Obr. 46 je patrné, že typ podstřešní

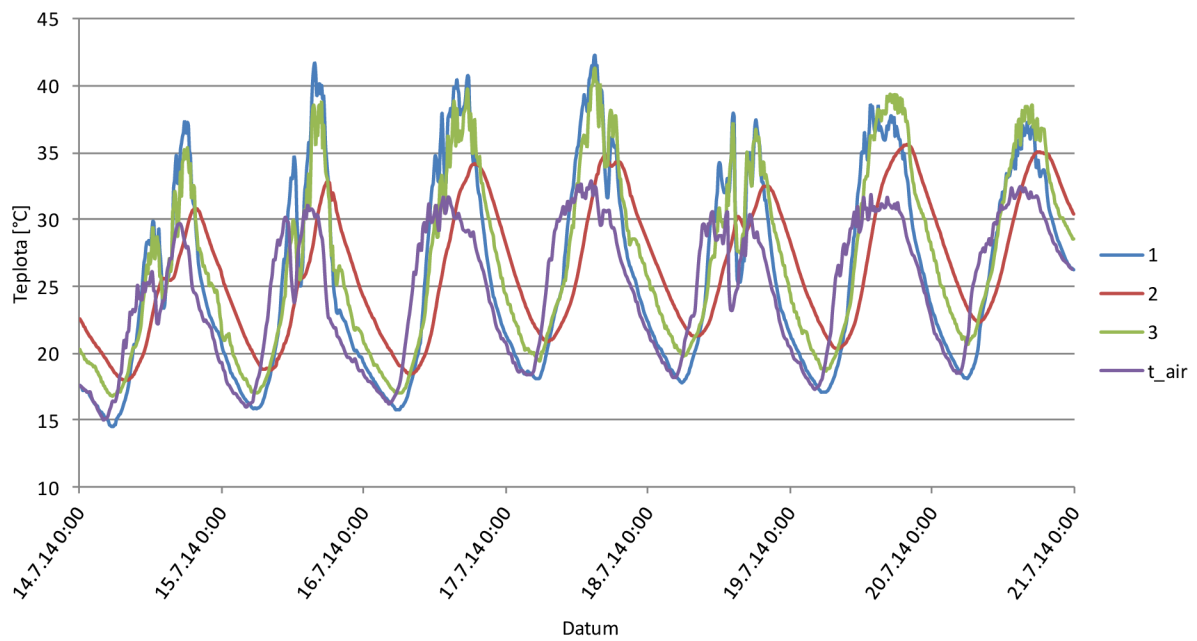


Obr. 41 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole A (SDK + šedá fólie)

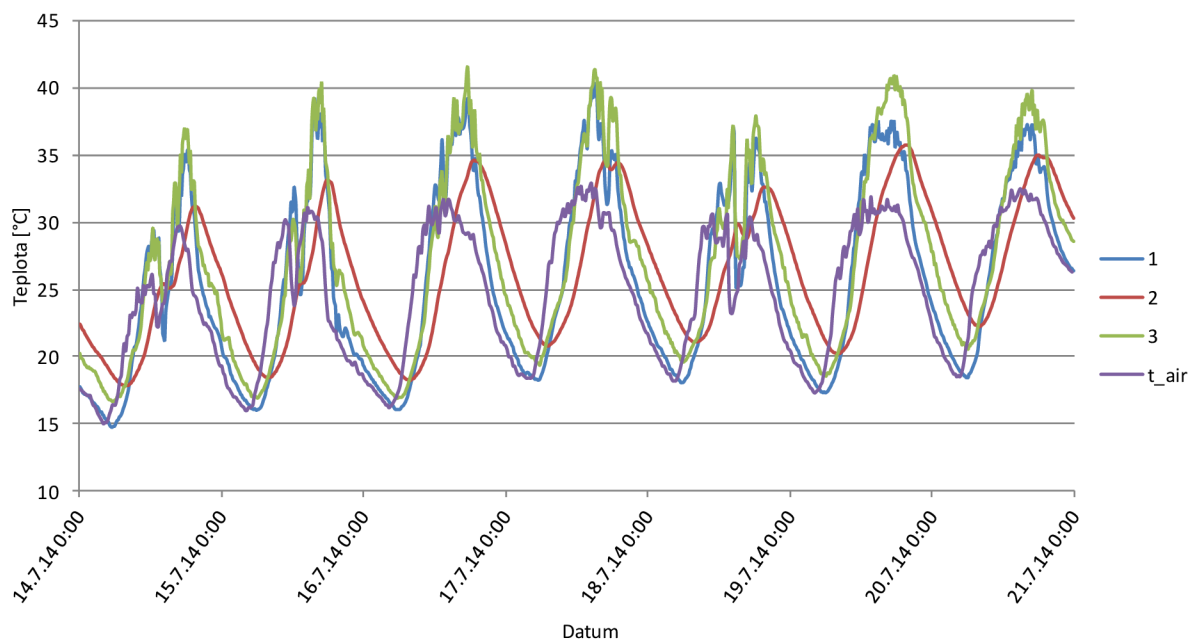


Obr. 42 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole B (SDK + reflexní fólie)

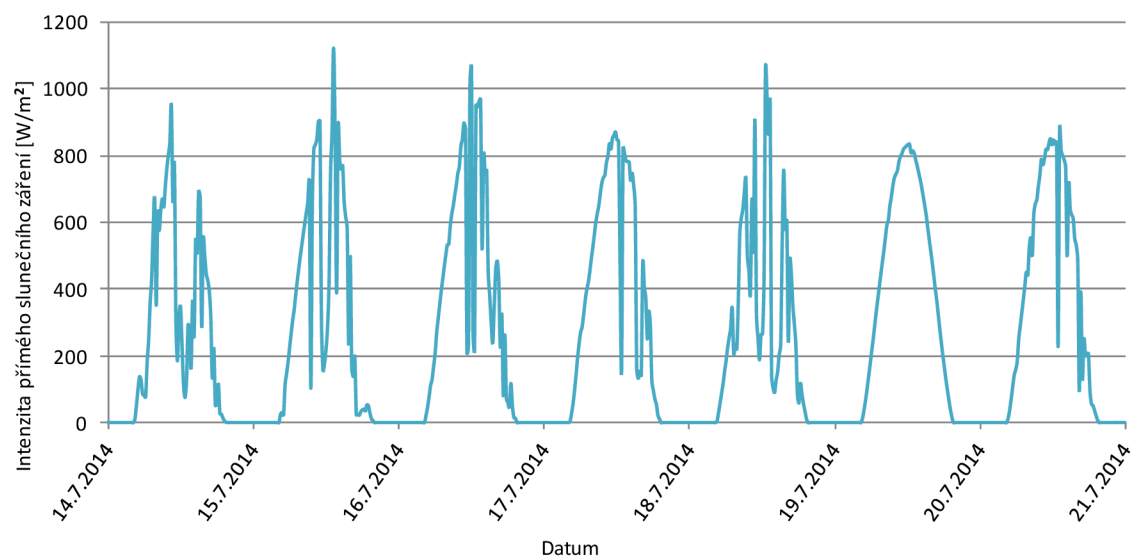




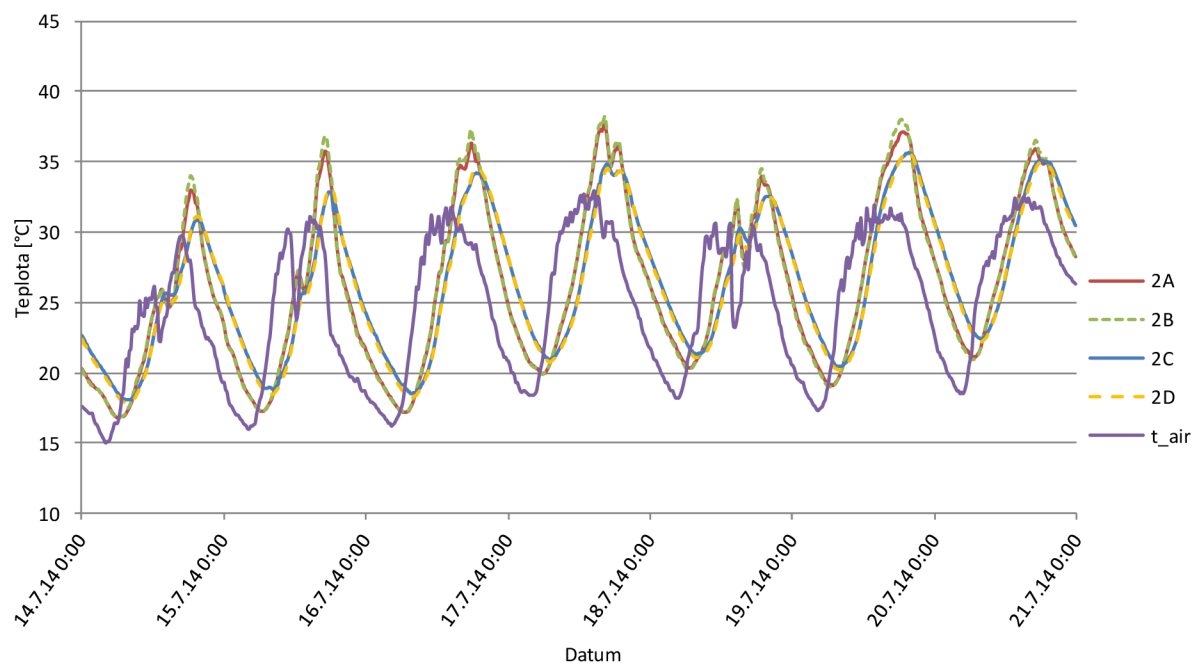
Obr. 43 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole C (lisovaná sláma + šedá fólie)



Obr. 44 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole D (lisovaná sláma + reflexní fólie)



Obr. 45 Intenzita přímého slunečního záření v období 14. 7. -21. 7. 2014<sup>1</sup>

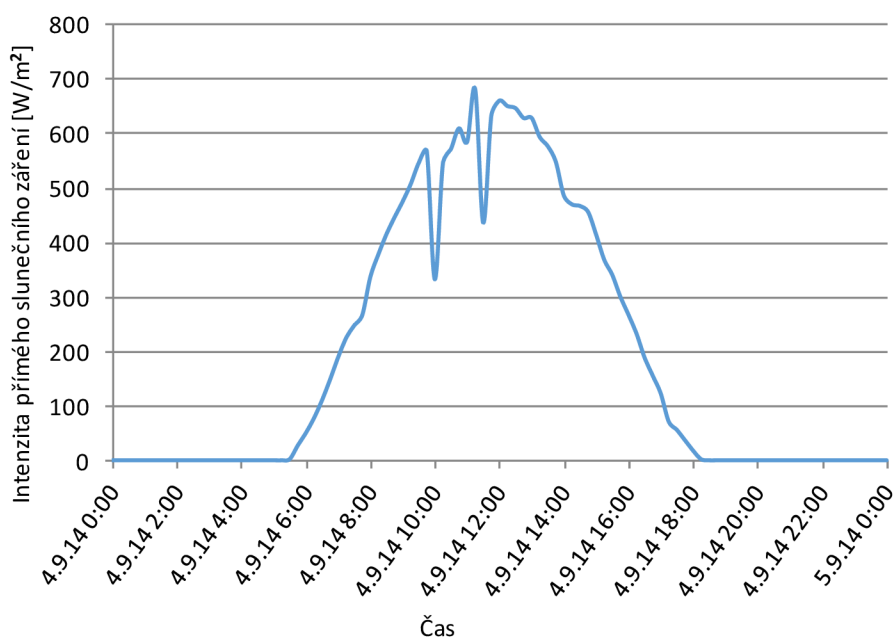


Obr. 46 Průběhy teplot v modelech střešního pláště v poloze 2

<sup>1</sup> Klimatická data poskytl Ústav vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

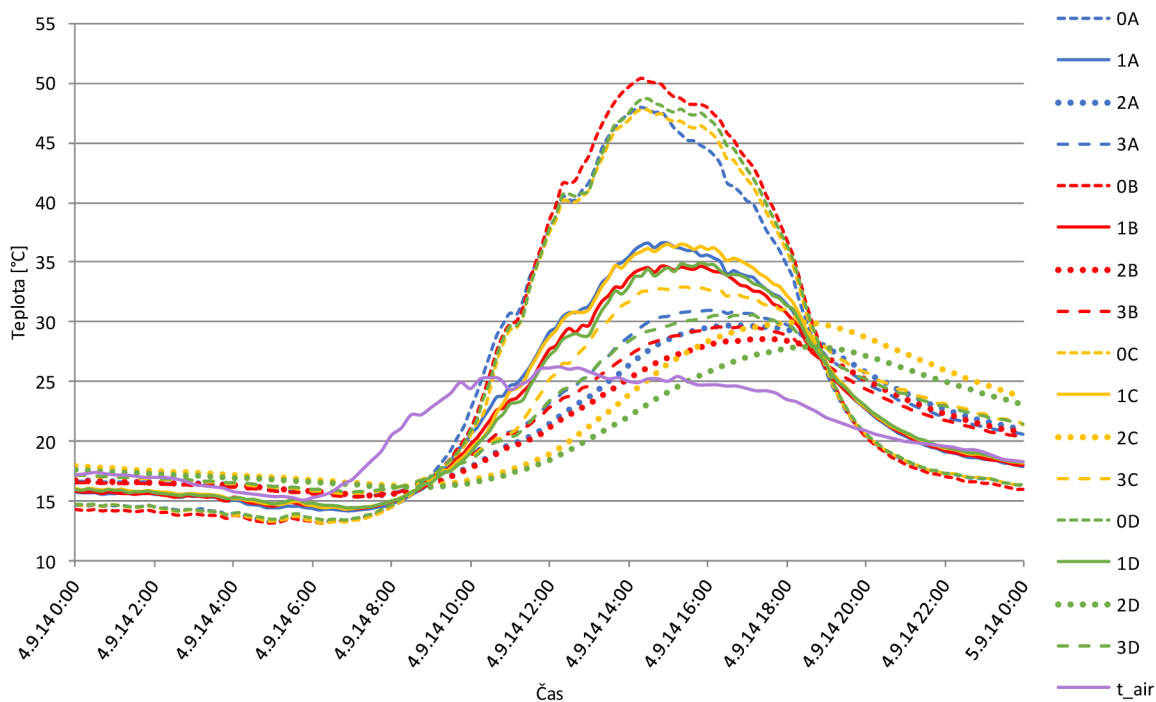
fólie neovlivňuje teplotní průběh v tomto místě. Naopak vliv materiálu podhledu se projevil teplotním útlumem i fázovým posunem teplotního kmitu. Ve variantách panelu z lisované slámy lze pozorovat až o téměř 3 °C větší teplotní útlum než u variant se sádrokartonovým podhledem. Během noci však skladby s lisovanou slámou zůstávají teplejší cca o 1 °C. Rovněž fázový posun je u lisované slámy zpožděn přibližně o jednu hodinu oproti sádrokartónu.

Dalším dnem pro vyhodnocení letního měření – rozložení teplot ve střešním plášti, byl zvolen den 4. 9. 2014, kdy klimatické podmínky odpovídaly charakteru letního počasí a kdy intenzita slunečního záření během dne měla nejplynulejší průběh (Obr. 47). Všechny skladby byly doplněny o jeden teplotní snímač na spodním líci krytiny, poloha 0 (Obr. 40). Oproti předchozímu vyhodnocení týdenního období je tentokrát zaměřena pozornost na vývoj teplot ve skladbách během denního cyklu.



Obr. 47 Intenzita přímého slunečního záření pro den 4. 9. 2014<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Klimatická data poskytl Ústav vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.



Obr. 48 Teplotní průběhy ve všech polích modelů střešních skladeb pro den 4. 9. 2014

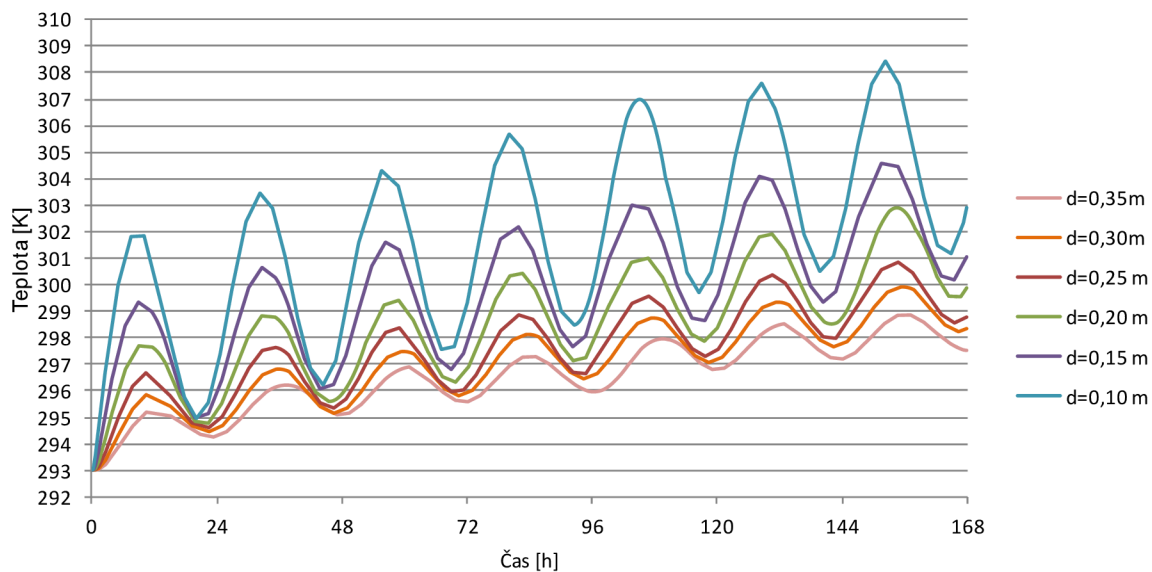
V Obr. 48 jsou graficky znázorněny teplotní průběhy ve všech měřených polích A – D v polohách 0 – 3. Tento graf nabízí možnost komplexního srovnání rozložení teplot ve zkoumaných modelech střešních pláštů. Teplota krytiny během noci byla o 2,5 °C nižší než teplota vzduchu, což je projevem sálání k obloze. Její teplota začala výrazně růst po osmé hodině ránní a vystoupala až k 50 °C okolo 14. hod. Teplotní rozdíly krytiny mezi jednotlivými poli se projevily do 2,5 °C, přičemž vyšší teploty dosáhla v obou případech skladba s reflexní podstřešní fólií. Naopak teplota z rubové strany podstřešní fólie byla vyšší u šedé fólie, teplotní rozdíl oproti reflexní variantě byl 2 °C. Obdobný trend byl pozorován i u výsledků počítačové simulace provedené v programu COMSOL. Průměrně se teplota podstřešních fólií pohybovala okolo 35 °C v době mezi 14:00 a 16:30. Spodní líc podhledu byl opět i přes provedené opatření ovlivněn tepelným zářením odraženým a emitovaným okolními povrchy. Proto dosahuje vyšších hodnot než je teplota uvnitř skladby, kde čidlo je umístěné mezi tepelnou izolací a podhledem.

### 5.1.8 Parametrická studie materiálových vlastností

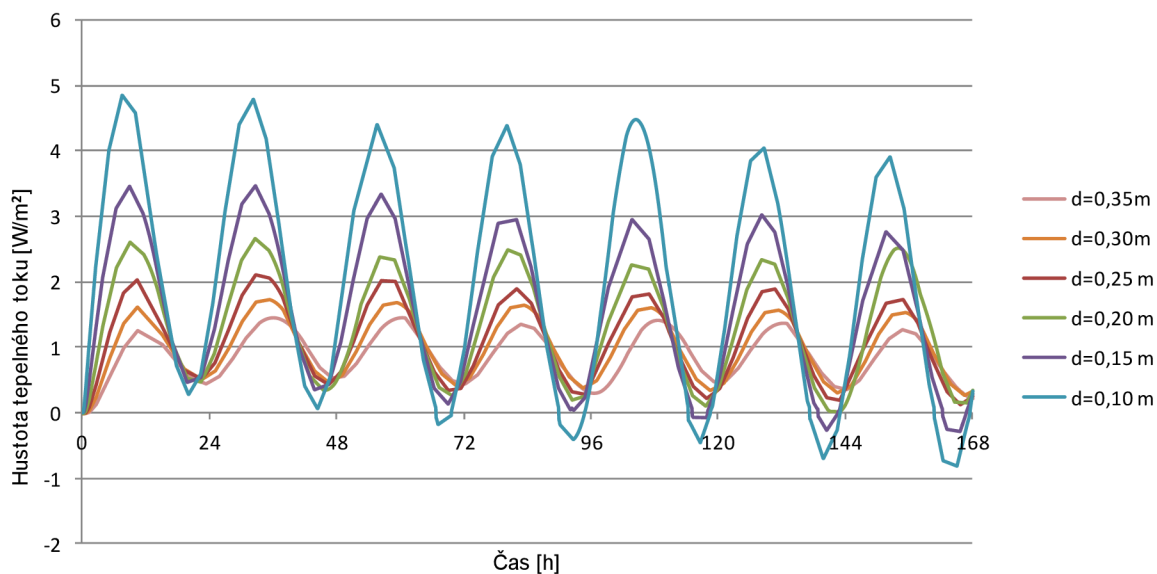
Pro zhodnocení míry vlivu jednotlivých materiálových charakteristik stavebních materiálů na teplotní útlum střešní konstrukce byla provedena následující parametrická studie. Byly vybrány tři materiálové vlastnosti, které vystupují v rovnici vedení tepla v neustáleném teplotním stavu (14) a mají tedy potenciál ovlivnit šíření tepla konstrukcí. Jsou to tloušťka tepelné izolace, součinitel tepelné vodivosti a objemová tepelná kapacita, která je součinem měrné tepelné kapacity a objemové hmotnosti materiálu.

Tato parametrická studie je aplikována na výpočetní model nevětraného střešního pláště s přilehlou částí podkroví, který je popsán blíže v kapitole 4.6.2. Změny vlastností jsou demonstrovány pouze na vrstvě tepelné izolace. Výchozími parametry tepelné izolace jsou:  $\lambda = 0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $d = 0,25 \text{ m}$ ,  $\rho \cdot c_p = 3 \cdot 10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ . Součinitel prostupu tepla navržené střešní skladby odpovídá doporučené hodnotě pro pasivní domy. Okrajovou podmínkou je harmonicky oscilující rovníčná sluneční teplota (99) a znázorňuje týdenní období teplého slunečného letního počasí následující po období chladném, kdy je teplota všech částí konstrukce ochlazena na  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cílem studie je ověřit jakou měrou se podílí ta která materiálová charakteristika na útlumu tepla při šíření střešním pláštěm a pro vyhodnocení byl opět zvolen interiérový povrch stropního podhledu.

**V první části studie bylo zvoleno šest různých tlouštěk tepelné izolace:** 0,1 m, 0,15 m, 0,20 m, 0,25 m, 0,30 m a 0,35 m. Průběh teploty a hustoty tepelného toku na vnitřním líci podhledu jsou znázorněny v Obr. 49 a Obr. 50. Postupným navyšováním tloušťky tepelné izolace přirozeně klesá i teplota vnitřního líce střešního pláště. U malých tlouštěk tepelné izolace lze pozorovat výrazné rozdíly mezi denními a nočními teplotami až  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při tloušťce tepelné izolace 0,25 m, kdy daná střešní skladba vyhovuje požadavkům pro pasivní budovy, se denní rozdíly pohybují kolem  $2 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Šestý den teplého období dosáhne tato skladba  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Další navyšování tloušťky tepelné izolace se projeví snižováním povrchové teploty podhledu. Na každých 5 cm tloušťky izolantu se teplotní namáhání během denních maxim projevilo snížením teploty o  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Z celkového pohledu (Obr. 49) je vidět, jak výrazný vliv má navyšování tepelné izolace u menších tlouštěk, ale u vyšších tlouštěk vliv není až tak významný.



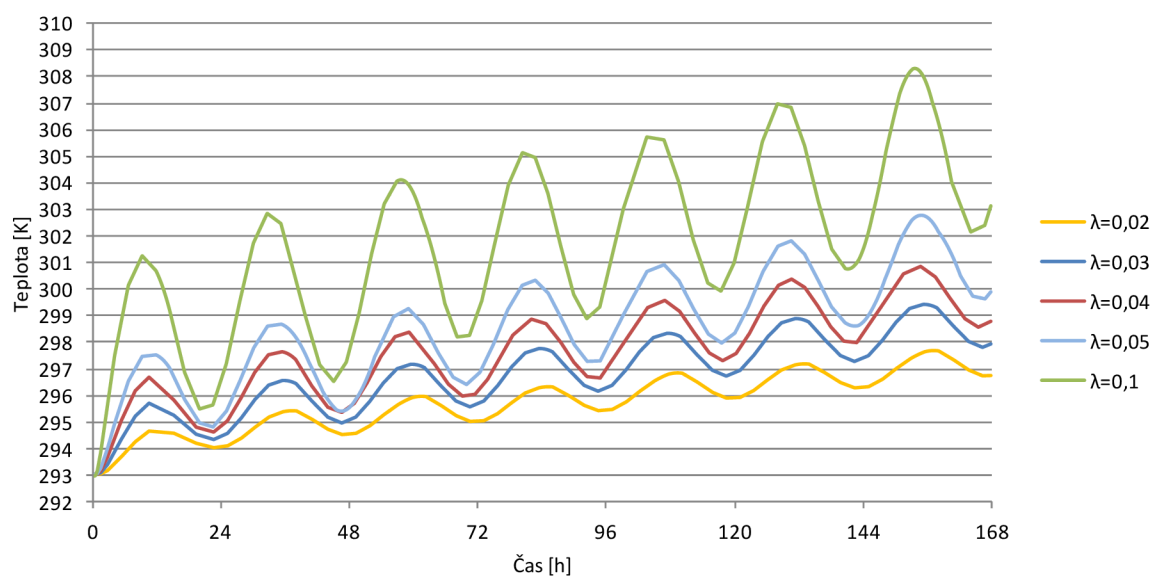
Obr. 49 Vliv variace tloušťky tepelné izolace na teplotu líce stropního podhledu – teploty



Obr. 50 Vliv variace tloušťky tepelné izolace na teplotu líce stropního podhledu – tepelné toky

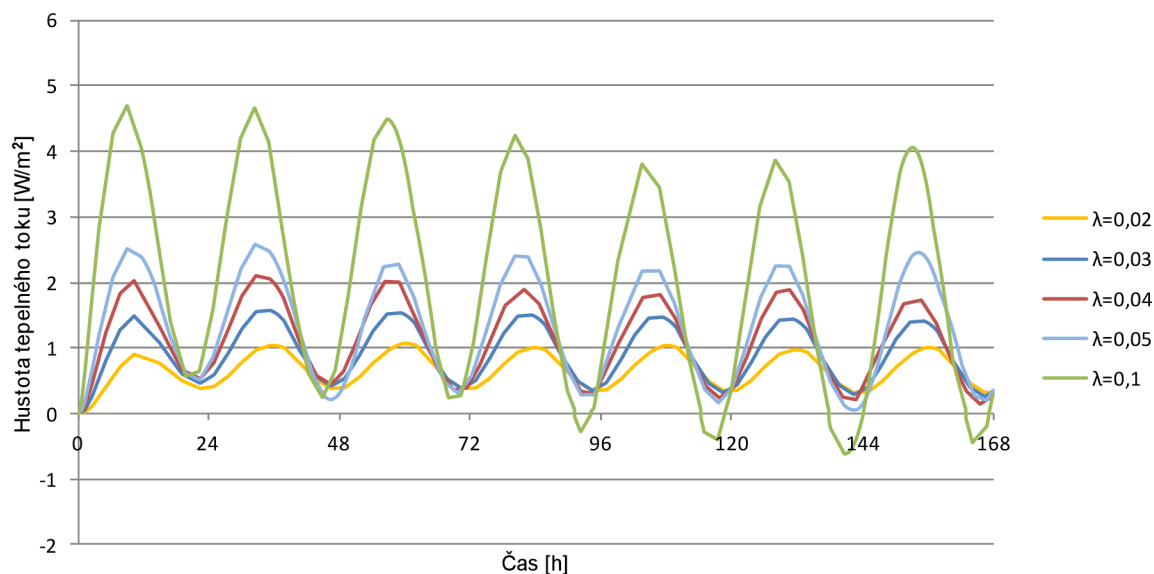
**V druhé části studie byl sledován vliv změny hodnoty součinitele tepelné vodivosti na vývoj teplot z interiérové strany střešního pláště (Obr. 51).** Byly zvoleny hodnoty součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , jenž odpovídá některým druhům pěnoplastických materiálů,  $\lambda = 0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  odpovídající tepelné izolaci s vysokou

izolační schopností,  $\lambda = 0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , jež je charakteristická pro většinu tepelných izolací,  $\lambda = 0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  patříčná pro některé druhy tužších přírodních izolací jako je korek, rákos, dřevní vlákno a kokosové vlákno, dále pak  $\lambda = 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  příznačné pro deskové materiály jako například dřevotříska nebo třeba panely z lisované slámy. Nutno podotknout, že se jedná o parametrickou studii, tedy vždy je měněn pouze jeden parametr, ostatní zůstávají na výchozích hodnotách. Tyto výsledky nelze připisovat chování zmíněných materiálů, protože se liší i v ostatních parametrech, které zde měněny nejsou. Srovnání jednotlivých druhů tepelné izolace nabízí kapitola 5.1.2. Z grafů (Obr. 51 a Obr. 52) je patrné, jak výraznému teplotnímu útlumu dochází snížením hodnoty součinitele tepelné vodivosti. V intervalu  $0,02 - 0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , kde byl parametr  $\lambda$  sledován v kroku  $0,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , je vidět poměrně významný vliv na povrchové teploty stropního líce. Každý krok představuje přibližně  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  redukci. Pro praktické využití to znamená, že i malé zlepšení součinitele tepelné vodivosti materiálu může ovlivnit letní tepelnou stabilitu místnosti.



Obr. 51 Vliv součinitele tepelné vodivosti na teplotu líce stropního podhledu – teploty





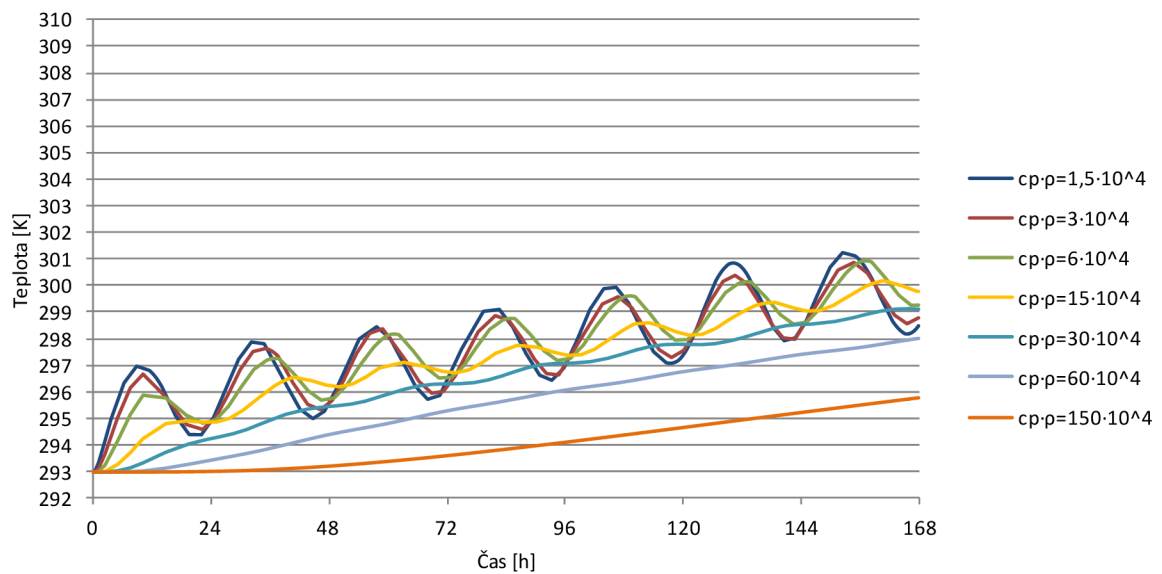
Obr. 52 Vliv součinitele tepelné vodivosti na teplotu líce stropního podhledu – tepelné toky

**V třetí části studie byla pozornost zaměřena na objemovou tepelnou kapacitu.**

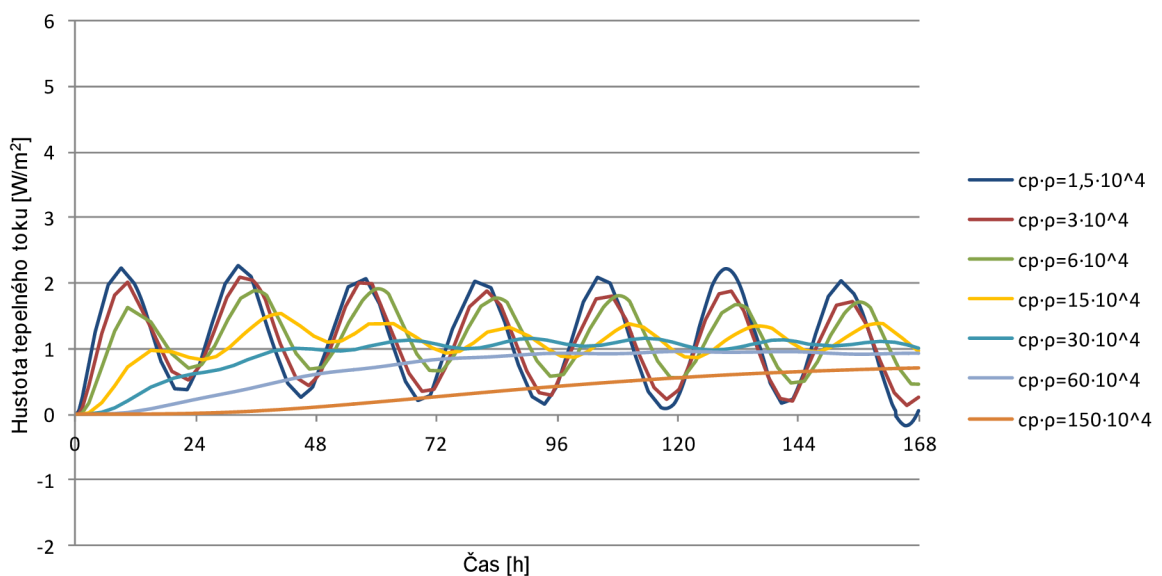
V rámci tepelně technického výpočtu záleží pouze na hodnotě součinu měrné tepelné kapacity a objemové hmotnosti, vzájemná proporce těchto dvou veličin nemá na výsledek žádný vliv. Pro porovnání bylo zvoleno sedm variant:  $c_V=1,5 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ;  $3 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ;  $6 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ;  $15 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ;  $30 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ;  $60 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ;  $150 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ . Hodnota objemové tepelné kapacity  $3 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$  odpovídá minerální vatě nebo EPS, hodnota  $6 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$  přibližně odpovídá XPS nebo PUR, hodnota  $15 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$  odpovídá foukané celulóze, hodnota  $30 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$  odpovídá dřevovláknité izolaci, hodnota  $60 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$  odpovídá například panelům z lisované slámy a hodnota  $150 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$  odpovídá některým druhům lehčeného betonu. Opět je třeba zdůraznit, že grafy v Obr. 53 a Obr. 54 nejsou průběhy daných hodnot pro zmíněné materiály, ale jedná se o parametrickou studii, kdy je hodnocen vliv daných parametrů.

První tři hodnocené objemové tepelné kapacity ( $1,5 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ) mezi sebou nevykazují velké teplotní rozdíly, u hodnoty  $15 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$  je již patrný teplotní útlum i fázový posun teplotního kmitu oproti předchozím variantám. Také si lze povšimnout nočních minimálních hodnot, které jsou naopak oproti předchozím variantám vyšší, to lze





Obr. 53 Vliv objemové tepelné kapacity na teplotu líce stropního pohledu – teploty



Obr. 54 Vliv objemové tepelné kapacity na teplotu líce stropního pohledu – tepelné toky

přičíst tomu, že zvýšením objemové tepelné kapacity materiálu se zvýšila jeho schopnost pohlcovat teplo. Toto naakumulované teplo se během noci nestihlo uvolnit do venkovního prostoru, proto zůstal stropní líc teplejší oproti předchozím variantám. U hodnot objemové tepelné kapacity  $30 \cdot 10^4 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$  a vyšší již není patrná oscilace povrchových

teplot mezi dnem a nocí a dochází pouze k plynulému růstu teploty. Dalším zvyšováním hodnoty objemové tepelné kapacity se snižuje teplota stropního líce. Obecně lze konstatovat, že při zvýšení objemové tepelné kapacity o jeden řád oproti běžným tepelným izolacím lze dosáhnout výrazného teplotního útlumu.

**První zkoumaný parametr**, tedy tloušťka materiálu, samozřejmě významným způsobem ovlivňuje prostup tepla střešním pláštěm. Základní dimenzí pro srovnání budiž dimenze 0,25 m, pro niž byly provedeny další dvě studie v této kapitole, a současně v základní variantě střešní skladba svými parametry odpovídá doporučením pro pasivní domy. Snižováním tloušťky tepelné izolace o 5 cm na 0,20 m vzroste teplota v denních maximech o 1,5 – 2 °C. Naopak dalším navyšováním tloušťky tepelného izolantu se teplotní namáhání interiéru snižuje, nicméně z ekonomického hlediska se příliš velké dimenze již nevyplácí.

**Druhý parametr**, součinitel tepelné vodivosti, má znatelný vliv na snížení teploty na vnitřním povrchu střešního pláště. Byly zkoušeny varianty do  $\lambda=0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , ale další snižování teplotního namáhání tímto způsobem již naráží na technické limity stavebních materiálů. Kde však je prostor pro další redukci teploty v interiéru, je třetí parametr, tj. zvyšování objemové tepelné kapacity skladby.

**Třetí z parametrů**, objemová tepelná kapacita, se projevil jako nejvíce ovlivňující. Většina druhů tepelných izolací jak vláknitých tak pěnoplastických se pohybuje v oboru hodnot  $3\cdot 10^4 - 6\cdot 10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ . Mají příliš nízkou hodnotu objemové tepelné kapacity, než aby účinně odstínila teplotní namáhání z exteriéru. Zvýšením objemové tepelné kapacity o jeden řád, tj. na  $30\cdot 10^4 - 60\cdot 10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ , již přináší uspokojivé výsledky snížením teploty stropního líce o 3 – 4 °C. Další velmi významná redukce teploty byla dosažena navýšením objemové tepelné kapacity odpovídající hodnotě pro lehčené betony. Oproti základní variantě byla snížena teplota stropního líce až o 5,5 °C. Zvyšování hodnoty objemové tepelné kapacity se jeví jako účinné řešení redukce teplotního namáhání interiéru. V rámci této studie byly sice řešeny parametry tepelné izolace, u které nelze navýšit objemovou tepelnou kapacitu, aniž by došlo k výraznému poklesu součinitele tepelné vodivosti, nicméně se nemusí jednat pouze o vrstvu tepelné izolace, ale poznatek lze aplikovat na celý střešní plášť. Do skladby lze umístit navíc vrstvu tepelně akumulacní.

Podobná analýza pouze prezentovaná na jiném modelu byla uveřejněna v rámci konference EnviBuild 2016 a publikována v periodiku [50].

V celé této kapitole byly postupně hodnoceny vlivy materiálového řešení na teploty a tepelné toky na vnitřním líci stropní konstrukce u nevětraného střešního pláště. Je samozřejmé, že zvýšení tepelně akumulacních vlastností pláště zvýší jeho teplotní útlum. Zde však nebylo hodnoceno umístění hmotné tepelně akumulacní vrstvy, nýbrž pozornost byla soustředěna na porovnání jednotlivých druhů tepelných izolací a stropních podhledů, tak aby byl zachován lehký charakter střešního pláště a mohlo být využito konstrukčního řešení dřevěného krovu. Tepelná izolace z dřevních vláken napomohla k poměrně výraznému snížení teplot díky vysoké objemové tepelné kapacitě. Ze škály stropních podhledů dosáhly, ze stejných důvodů, nejlepších výsledků jílové panely. Kombinací těchto dvou stavebních materiálů bylo dosaženo další teplotní redukce. Reflexní fólie neměly téměř žádný vliv na snížení tepelných zisků. Naproti tomu velmi zajímavé výsledky přinesla studie porovnávací vliv barvy krytiny na teplotu podhledu. Volbou světlého tónu střešních tašek bylo dosaženo výrazného snížení teplot. Těmito samostatnými studiemi byl přiznán poměrně velký vliv materiálového řešení na průběhy teplot ve střešním plášti.

## **5.2 Vlivy konstrukčního řešení na proudění ve větrané vzduchové vrstvě**

Předchozí kapitola pojednávala o materiálovém řešení lehkých střešních pláštů a hodnotila jejich vlivy na tlumení tepelného namáhání podkrovních místností. Tato kapitola zkoumá další možné řešení redukce tepelných zisků, jímž je dvouplášťová střešní konstrukce. Větraná vzduchová dutina má sloužit primárně pro odvod vlhkosti ze střešní konstrukce, ale může sloužit též k odvodu přebytečného tepla. Během horkých letních dní za slunečného počasí dochází k rozehrátí krytiny až k 70 °C. Je-li prostor bezprostředně pod krytinou odvětrán, je značná část tepla odvedena pryč ze skladby, aniž by musela být akumulována ve skladbě. Tato kapitola popisuje rozložení teplot a rychlostí vzduchu ve větrané dutině, hodnotí vliv reflexní vrstvy na proudění, uvádí tepelnou bilanci větraného pláště oproti nevětranému a dále se zabývá vlivem krycích mřížek větracích otvorů.

### 5.2.1 Teplotní a rychlostní pole ve větrané vzduchové dutině

Vzduchová dutina propojená s venkovním prostředím přívodními a odváděcími otvory umožňuje proudění vzduchu v tomto prostoru. Proudění nastává rozdílem tlaků způsobeným buď rozdílnými teplotami, nebo vlivem větru. Součástí této práce není hodnocení vlivu větru, proto v následujících studiích není uvažován. Vzduch v dutině je udáván do pohybu jeho ohřevem o horní, případně i spodní střešní plášť. Podrobnému popisu proudění podél teplé plochy je věnována kapitola 4.4. Optimální tloušťku větrané vzduchové vrstvy lze definovat jako součet tlouštěk mezní vrstvy horního a dolního pláště. Jak vypovídá kapitola 4.4.2, tloušťka mezní vrstvy je v čase proměnná a závisí na teplotním rozdílu povrchu konstrukce a vzduchu, který ji obklopuje. Proto lze stanovit optimální tloušťku větrané vzduchové vrstvy vždy jen pro konkrétní teplotní rozdíl či hustotu tepelného toku. Obecně platí, že pro malý teplotní rozdíl je mezní vrstva podél povrchu úzká, se zvyšujícím se teplotním rozdílem narůstá. Aby bylo možné určit nějaké optimum pro tloušťku konkrétní vzduchové vrstvy, je nutné nejprve definovat okrajové podmínky, za kterých toto doporučení platí. V případě letních okrajových podmínek je vhodné uvažovat s maximálními teplotami, kterých lze u dané krytiny dosáhnout. Optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy dále závisí na sklonu střešní konstrukce a na její délce.

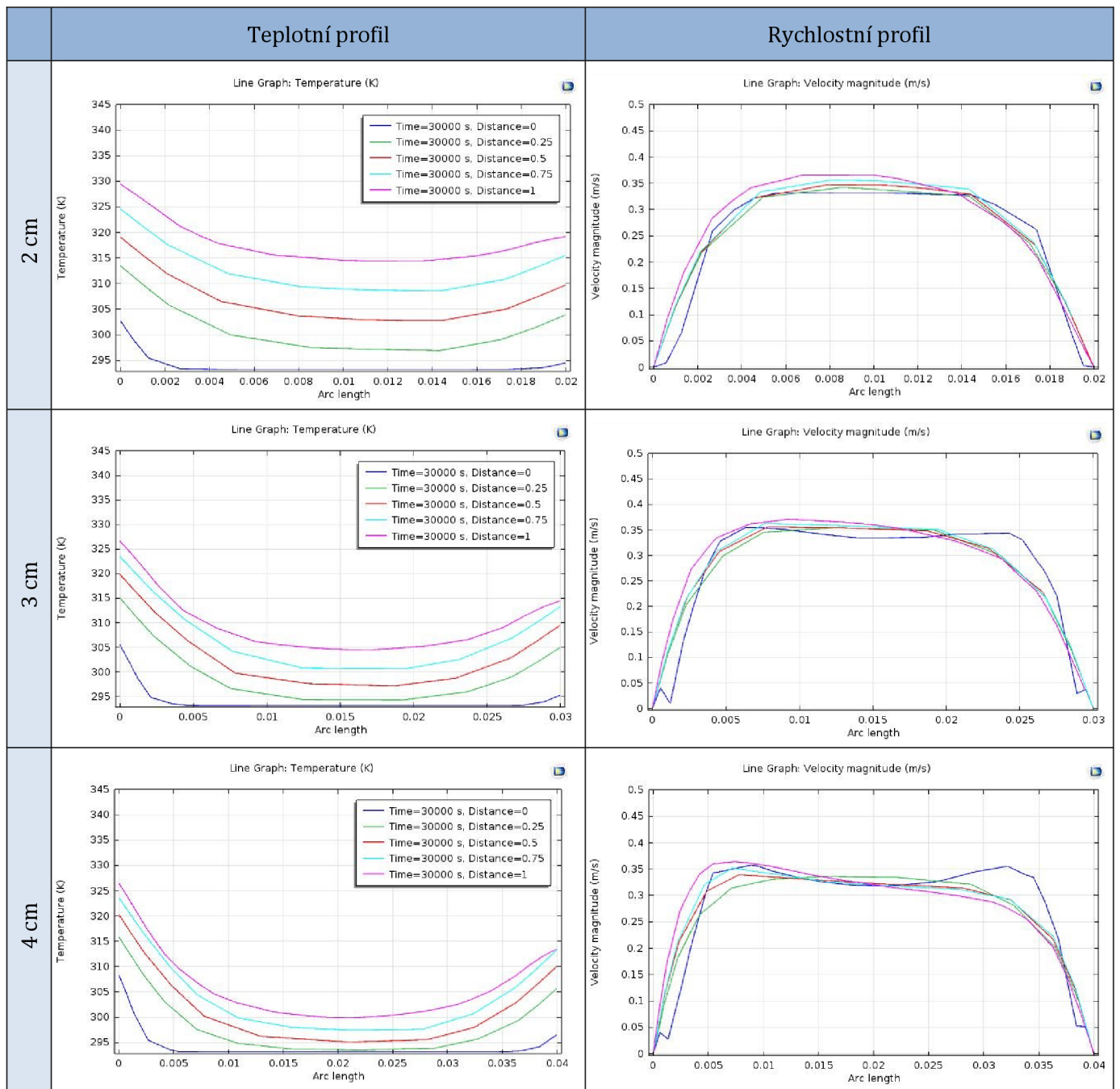
Projekt byl realizován v rámci stáže autorky na INSA Toulouse ve Francii a zabývá se hledáním optimální tloušťky větrané vzduchové vrstvy pro střešní konstrukce pasivních budov [72]. Bylo sledováno ustálené proudění vzduchu v mezistřešním prostoru za ustáleného teplotního stavu. Geometrii modelu, okrajové podmínky a výpočetní postupy uvádí kapitola 4.6.1. Výpočet byl proveden pro několik zvolených vzdáleností horního a dolního pláště od 2 cm po 7 cm v centimetrových krocích. Pro účely srovnání jsou v Obr. 55 zobrazeny teplotní a rychlostní profily v pěti úsecích po délce střechy, ve vzdálenosti od příváděcího otvoru  $0H$ ,  $0,25H$ ,  $0,5H$ ,  $0,75H$  a  $1H$ , kde  $H$  je délka střechy.

**Teplotní profily** (Obr. 55) ve větrané dutině simulovaného střešního pláště vychází z tvaru tepelných mezních vrstev. Povrchy v dutině jsou bez reflexních úprav, proto dochází též k ohřívání spodního povrchu sáláním mezi oběma plášti a podél tohoto povrchu vzniká taktéž mezní vrstva. Lze sledovat nárůst teploty ve směru proudění podél

jednotlivých ploch ale i vzduchu v dutině. S rostoucí tloušťkou větrané vzduchové vrstvy lze pozorovat poměrně výrazný pokles teploty vzduchu uprostřed dutiny. U dutiny tloušťky 6 cm a více je teplota vzduchu opouštějící dutinu ve střední ose téměř shodná jako teplota venkovního vzduchu vstupujícího do dutiny.

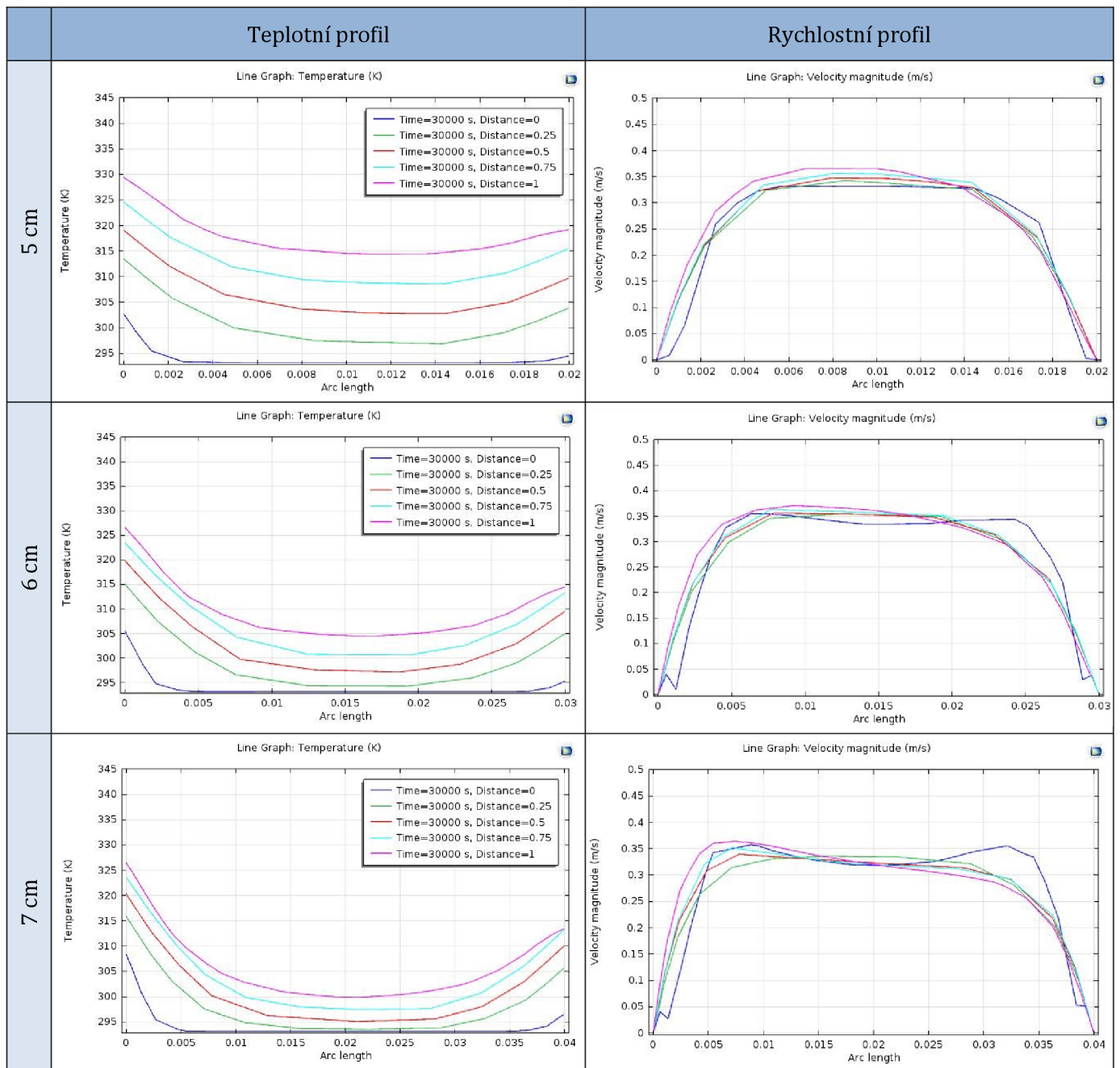
Z **rychlostních profilů** (Obr. 55) si lze povšimnout, že u menších tlouštěk větrané vzduchové vrstvy (do 3 cm) se rychlost proudění po délce střechy nemění, tzn., že rychlost ve směru proudění je téměř konstantní, nedochází k akceleraci. Rozdílné chování se začíná objevovat až od 4 cm výše. U širších dutin (od 4 – 5 cm) lze pozorovat akceleraci rychlosti proudění podél plášťů. Stejně tak je viditelný pokles rychlosti proudění v centrální části větraného průřezu. Dále je z výsledků simulace viditelné, že s rostoucí tloušťkou vzduchové vrstvy narůstají i maximální dosažené rychlosti proudění podél ohřívaných ploch. U větších průřezů, od vzdálenosti horního a dolního pláště 5 cm, je patrný náznak dělení vzduchového proudu do dvou samostatných proudů podél ploch v dutině.

Optimální tloušťka vzduchové dutiny je taková, aby byl vzduch odváděn jedním proudem a nedělil se do dvou samostatných podél jednotlivých plášťů. Dle tohoto kritéria se v tomto případě optimální jeví dutina tloušťky 4 – 5 cm, kde už vzniká náznak dělení proudu.



Obr. 55 Teplotní a rychlostní profily ve větrané dutině s emisivitou povrchů  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ ; na svislé ose je vynesena teplota v Kelvinech, na vodorovné ose šířka dutiny, na levé straně je povrch horního pláště, na pravé straně je povrch spodního pláště (pokračování na str. 108)





Obr. 55 Teplotní a rychlostní profily ve větrané dutině s emisivitou povrchů  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ ; na svislé ose je vynesena teplota v Kelvinech, na vodorovné ose šířka dutiny, na levé straně je povrch horního pláště, na pravé straně je povrch spodního pláště

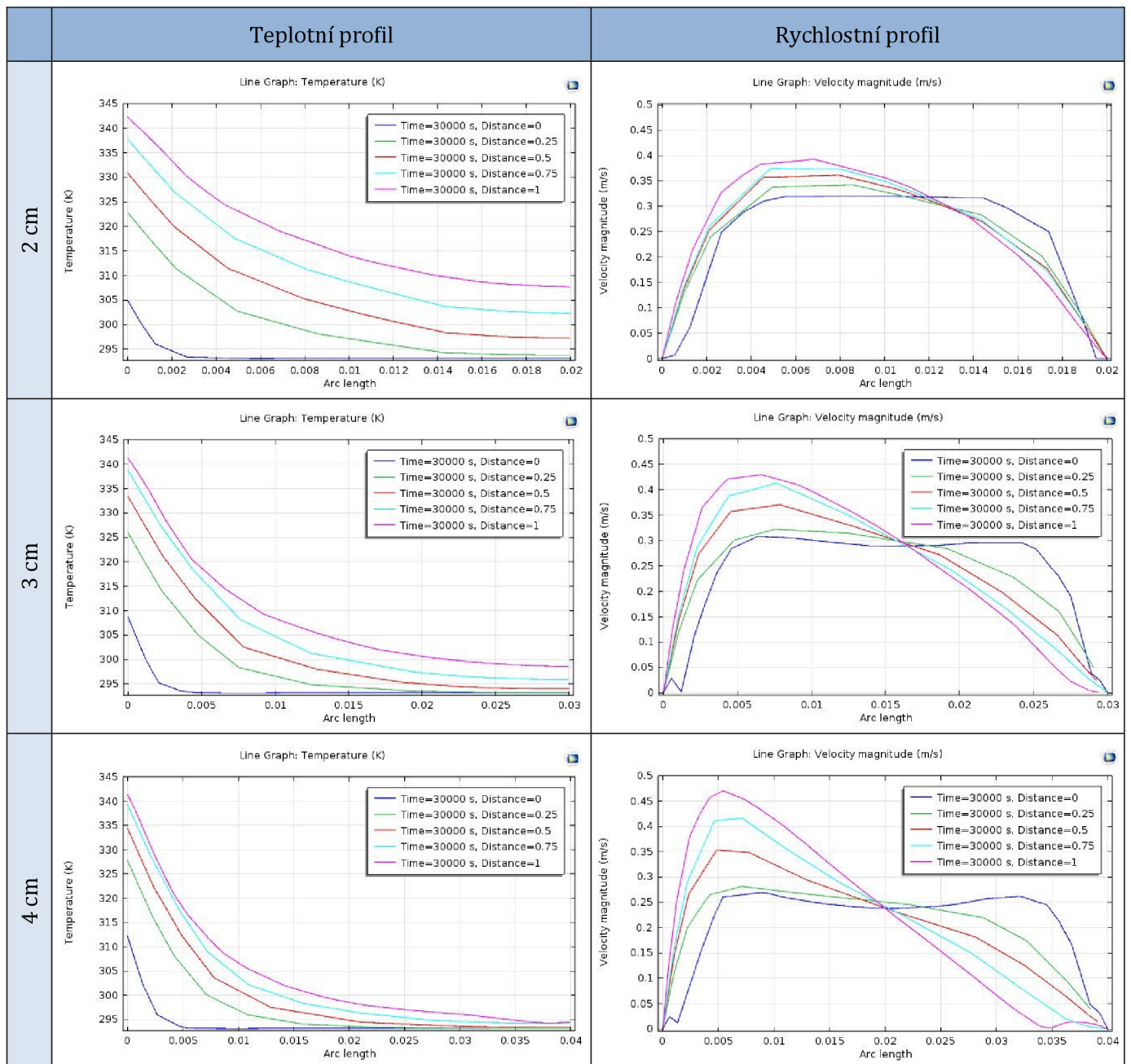
Na závěr této kapitoly je nutné připomenout, že prezentované výsledky vyjadřují chování daného střešního pláště, který je popsán v kapitole 4.6.1. Jakákoliv modifikace posuzovaného modelu (délka a sklon střechy, změna materiálů) by vedla k rozdílům ve výsledcích. Zásadní jsou tendence nikoliv konkrétní hodnoty.

### 5.2.2 Vliv sálání mezi horním a dolním pláštěm na proudění v dutině

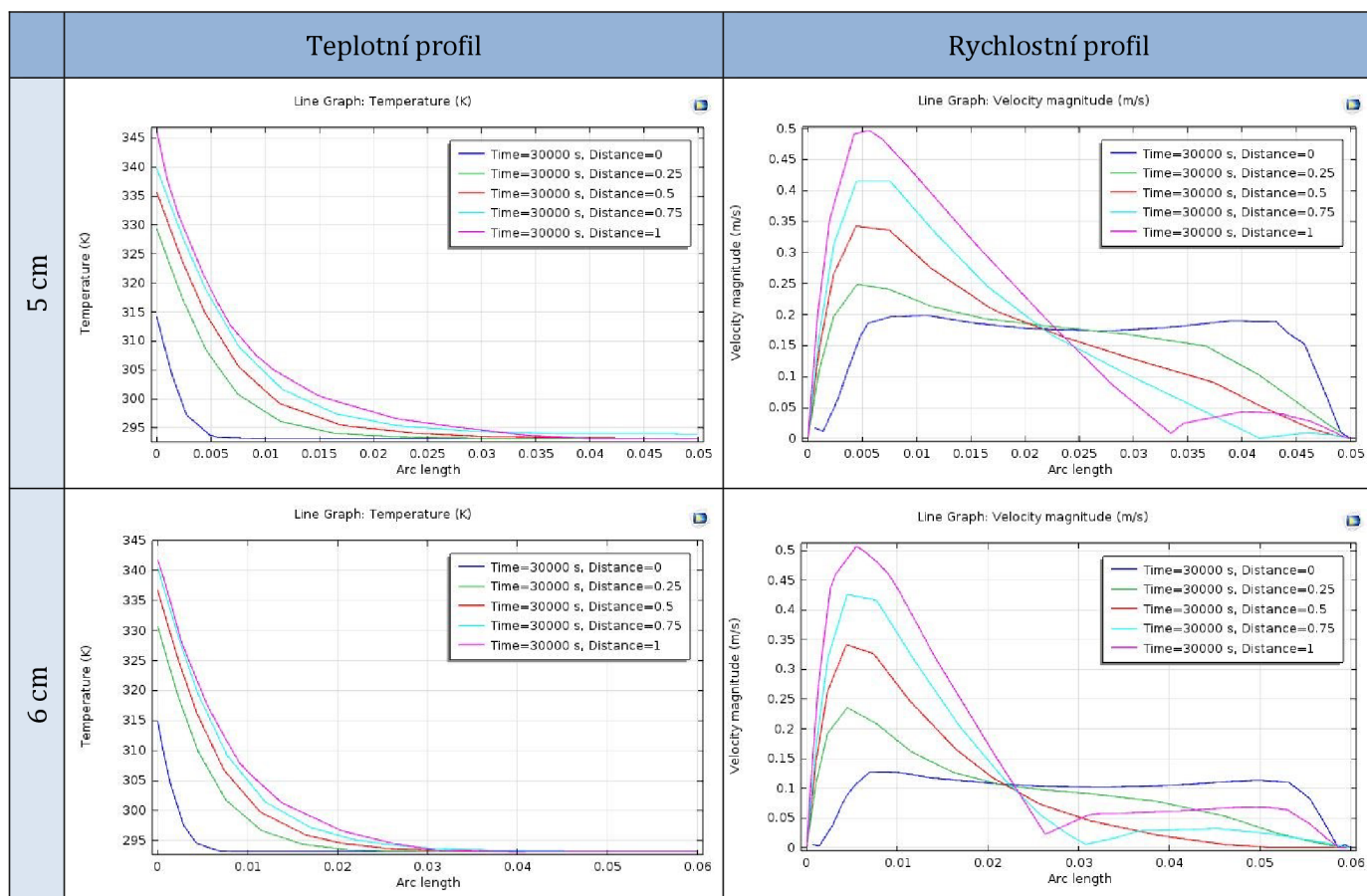
Emisivita vnitřních povrchů v mezistřešní dutině je klíčová pro přenos tepla mezi horním a dolním pláštěm. Určuje rovněž teploty těchto povrchů, což má zásadní vliv na vznik mezních vrstev, tedy vznik přirozeného proudění. V této kapitole je pozornost soustředěna na to jakým způsobem ovlivňuje složka radiace proudění vzduchu v dutině. Reflexní povrchy s velmi nízkou hodnotou emisivity transportují tak malé množství tepelné energie, že lze sálavou složku zanedbat. Tento přístup byl zvolen i v projektu zmiňovaném v předchozí kapitole. V modelu střešního pláště, který je blíže popsán v kapitole 4.6.1, je měněna tloušťka větrané vzduchové vrstvy a přitom je sledováno proudění v dutině. Toto je provedeno pro běžné povrchy s emisivitou  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$  a následně pro povrchy s velmi nízkou emisivitou. Z výpočetního hlediska je s nízkoemisivními povrchy uvažováno tím způsobem, že je zanedbána sálavá složka.

Obr. 56 nabízí grafy teplotních a rychlostních profilů střešního pláště bez vlivu radiace v dutině. Pro tloušťky vzduchové vrstvy od 2 cm do 6 cm po centimetrových krocích. V porovnání s variantou s povrchy o vysoké emisivitě, prezentované na Obr. 55, se teplotní i rychlostní profily zcela liší. Horní plocha dutiny dosahuje vyšších teplot, protože nepředává teplo spodnímu plášti sáláním. Ze stejného důvodu je spodní povrch dutiny výrazně chladnější, má teplotu přiváděného vzduchu. Výjimku tvoří pouze velmi malé šířky dutiny – do 3 cm, kdy je teplo předáváno spodnímu plášti prouděním z horního pláště. Rychlostní profily korespondují s teplotami, tzn. podél horního pláště vzniká proud pohybujícího se vzduchu a po délce střechy směrem vzhůru akceleruje. Je zde logicky dosaženo i vyšších rychlostí než u varianty s běžnou hodnotou emisivity, protože i teploty jsou zde vyšší. Naproti tomu podél chladného spodního povrchu proudění nevzniká, pouze sem zasahuje rychlostní mezní vrstva horního pláště. Porovnáním rychlostních profilů v závislosti na tloušťce větrané vzduchové vrstvy je možné zjistit, že rychlost proudění s rostoucí tloušťkou zvyšuje až do tloušťky 5 cm, kdy dalším navýšením na 6 cm již nepřináší další nárůst rychlosti.



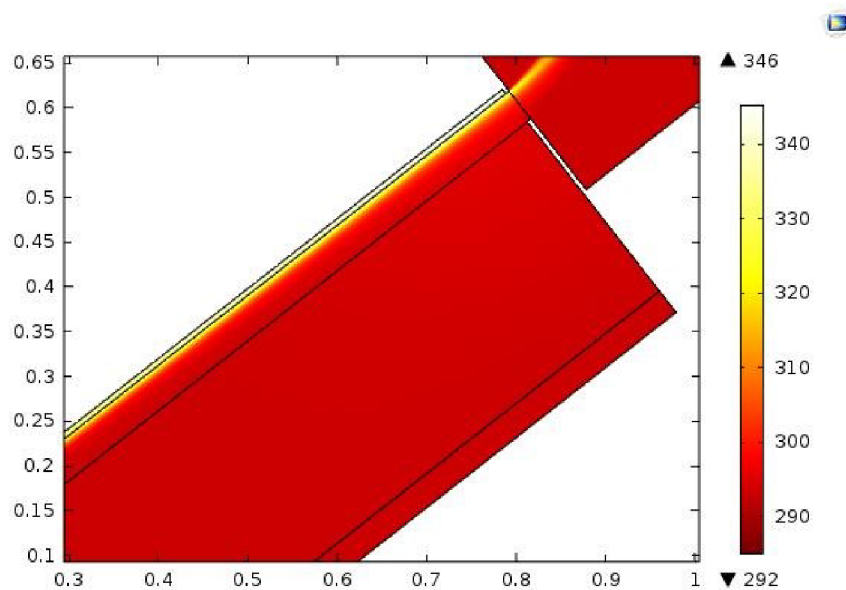


Obr. 56 Teplotní a rychlostní profily ve větrané dutině s velmi nízkou emisivitou povrchů (bez vlivu radiční složky); na svislé ose je vynesena teplota v Kelvinech, na vodorovné ose šířka dutiny, na levé straně je povrch horního pláště, na pravé straně je povrch spodního pláště (pokračování na str. 111)

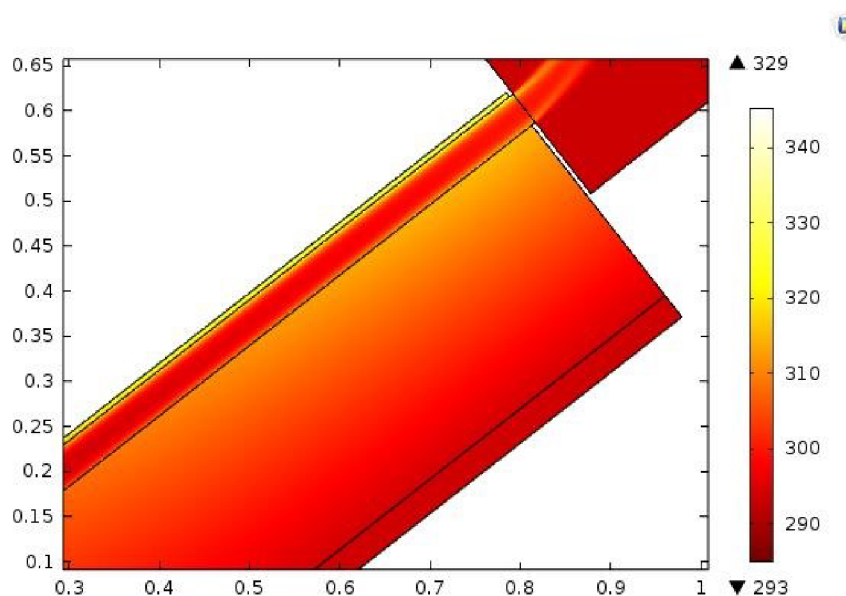


Obr. 56 Teplotní a rychlostní profily ve větrané dutině s velmi nízkou emisivitou povrchů (bez vlivu radiační složky); na svislé ose je vynesena teplota v Kelvinech, na vodorovné ose šířka dutiny, na levé straně je povrch horního pláště, na pravé straně je povrch spodního pláště

Pro lepší přehlednost výsledků simulace a možnost srovnání šíření tepla spodním pláštěm u obou variant, je graficky znázorněno 2D rozložení teplot ve střešním plášti s nízkoemisivními povrchy (Obr. 57) a s běžnými povrchy s vysokou emisivitou (Obr. 58). Při provedení doplňkové hydroizolační vrstvy z klasických materiálů dochází k výraznému ohřívání spodního pláště. Na Obr. 58 lze vidět prohřátou oblast tepelné izolace přiléhající k větrané vzduchové vrstvě. Oproti tomu u varianty s reflexní úpravou povrchů ve větrané dutině nedochází k přenosu tepla na spodní plášť a tepelná izolace zůstává chladná v celé své tloušťce. Rovněž je zde viditelná tepelná mezní vrstva ve vzduchové mezeře. U varianty s nízkoemisivními povrchy je tato vrstva pouze podél povrchu horního pláště a dosahuje vyšších teplot než u varianty s běžnými povrchy. U varianty s povrchy s vysokou emisivitou je přítomna tepelná mezní vrstva podél obou povrchů.



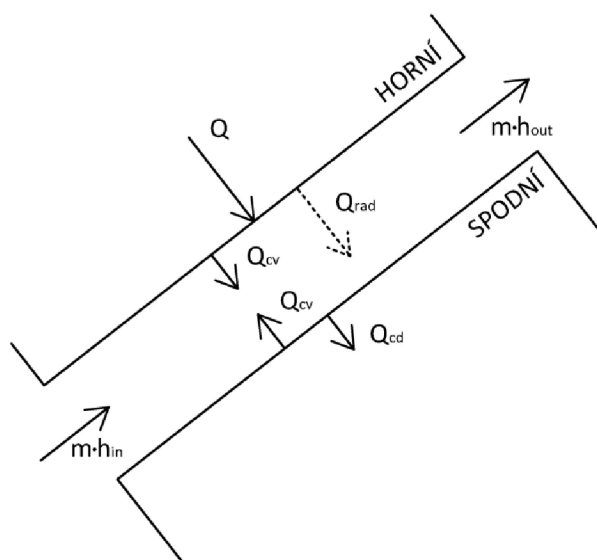
Obr. 57 Rozložení teplot ve střešním plášti – nízká emisivita povrchů ve větrané dutině (bez vlivu radiační složky)[72]



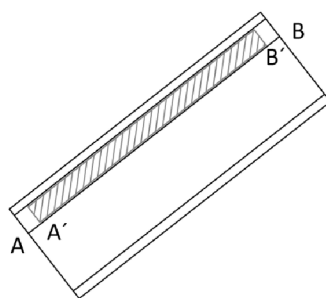
Obr. 58 Rozložení teplot ve střešním plášti – vysoká emisivita povrchů ve větrané dutině  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,94$

Dále byla pro obě varianty střešního pláště provedena tepelná bilance, což umožní přesnější porovnání než pouze grafické vyhodnocení. Na Obr. 59 je uvedeno schéma se znázorněním distribuce tepla ve střešním plášti, tedy veličin, které vystupují v tepelné bilanci. Teplo vstupující skrze horní plášť do vzduchové dutiny  $Q$  [W] je rozděleno do složky konvekční  $Q_{cv}$  [W], jedná se o teplo, které stoupá podél povrchu a složku radiační

$Q_{rad}$  [W], která se šíří sáláním k protějšímu povrchu. Jelikož je vzduchová vrstva propojená na obou koncích s vnějším prostředím, tak je nutné vyčíslit kolik tepla je odnášeno ze vzduchové vrstvy. To lze vypočítat jako násobek hmotnostního průtoku  $\dot{m}$  [kg·s<sup>-1</sup>] a rozdílu měrné entalpie na vstupu a výstupu  $\Delta h = h_{in} - h_{out}$  [J·kg<sup>-1</sup>]. Tepelná bilance střešního pláště je provedena pro tloušťky vzduchové vrstvy 2 – 7 cm v krocích po 1 cm. Tab. 17 uvádí jednotlivé složky tepla a také procentuální podíl tepla odváděného větranou vzduchovou vrstvou k teplu přijímanému povrchem střešního pláště, tj. účinnost větrání vzduchové vrstvy. V okrajových částech použitého modelu mohou vznikat nepřesnosti, proto je za kontrolní objem zvolen prostor dutiny zkrácený o počátečních 5 cm (pozice A') a koncových 5 cm (pozice B'), viz Obr. 60. Z tohoto kontrolního objemu byly generovány hodnoty pro Tab. 17. Grafické srovnání účinností větrání jednotlivých variant nabízí Obr. 61.



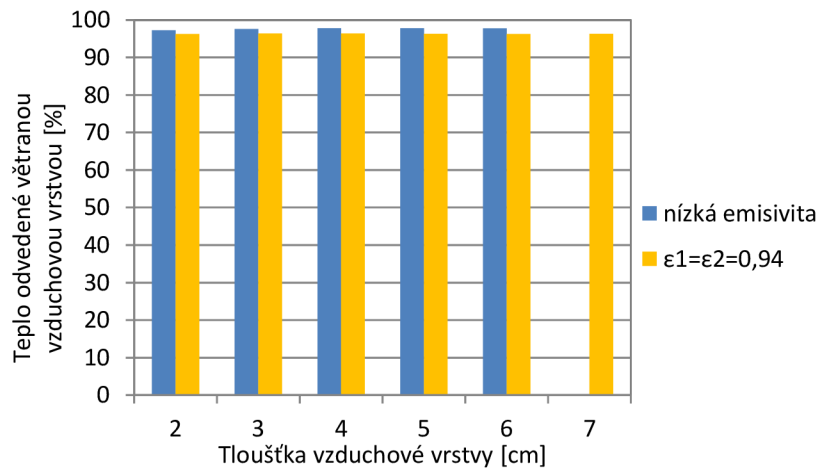
Obr. 59 Distribuce tepla ve střešní konstrukci [72 ]



Obr. 60 Uvažovaný kontrolní objem ve vzduchové vrstvě (vyznačený šrafovou)

Tab. 17 Tepelná bilance střešního pláště [72]

| Tloušťka vzduch. vrstvy   | Horní plášť |          | Spodní plášť |          | $\dot{m} \cdot h_{in}$ | $\dot{m} \cdot h_{out}$ | $\dot{m} \cdot \Delta h$ | $\frac{\dot{m} \Delta h}{q'' S}$ |
|---|-------------|----------|--------------|----------|------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|
|   | $Q_{rad}$   | $Q_{cv}$ | $Q_{cv}$     | $Q_{cd}$ |                        |                         |                          |                                  |
| nízká emisivita povrchů v dutině (bez vlivu radiační složky)      |             |          |              |          |                        |                         |                          |                                  |
| 2 cm  | -           | 150      | 0,82         | 0,82     | -30,14                 | 115,74                  | 145,88                   | 97,25 %                          |
| 3 cm  | -           | 150      | 0,23         | 0,23     | -42,54                 | 103,85                  | 146,39                   | 97,59 %                          |
| 4 cm  | -           | 150,11   | 0,088        | 0,088    | -48,55                 | 98,36                   | 146,91                   | 97,87 %                          |
| 5 cm  | -           | 150,11   | 0,023        | 0,023    | -40,70                 | 106,12                  | 146,82                   | 97,81 %                          |
| 6 cm  | -           | 149,91   | 0,00047      | 0,00047  | -30,47                 | 116,09                  | 146,56                   | 97,76 %                          |
| emisivita povrchů v dutině $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ |             |          |              |          |                        |                         |                          |                                  |
| 2 cm  | 54,59       | 95,40    | 54,49        | 2,80     | -31,64                 | 112,75                  | 144,39                   | 96,27 %                          |
| 3 cm  | 56,32       | 93,66    | 56,17        | 2,66     | -50,32                 | 94,35                   | 144,67                   | 96,46 %                          |
| 4 cm  | 56,26       | 93,72    | 56,05        | 2,71     | -66,41                 | 78,26                   | 144,67                   | 96,46 %                          |
| 5 cm  | 56,54       | 93,54    | 56,27        | 2,74     | -79,03                 | 65,57                   | 144,60                   | 96,35 %                          |
| 6 cm  | 56,65       | 93,33    | 56,33        | 2,80     | -91,13                 | 53,29                   | 144,42                   | 96,29 %                          |
| 7 cm  | 56,66       | 93,31    | 56,29        | 2,85     | -100,56                | 43,94                   | 144,50                   | 96,35 %                          |



Obr. 61 Účinnost větrané vzduchové vrstvy [72]

Vyhodnocení účinnosti větrání vzduchové vrstvy se zakládá na okrajových podmínkách pro ustálený teplotní stav, kdy venkovní podmínka odpovídá denním teplotním maximům a interiérová podmínka je také fixní. Za těchto podmínek je rozdíl v účinnosti v závislosti na tloušťce vzduchové vrstvy zanedbatelný a rozdíl mezi variantami s nízkou a vysokou emisivitou činí přibližně 1 %. Při dalším pokračování projektu lze doporučit prověření účinnosti větrání vzduchové vrstvy za okrajových podmínek blížících se reálným



podmínkám, tj. harmonicky oscilující teplota venkovního prostředí a teplota vzduchu v interiéru reagující na změny v exteriéru.

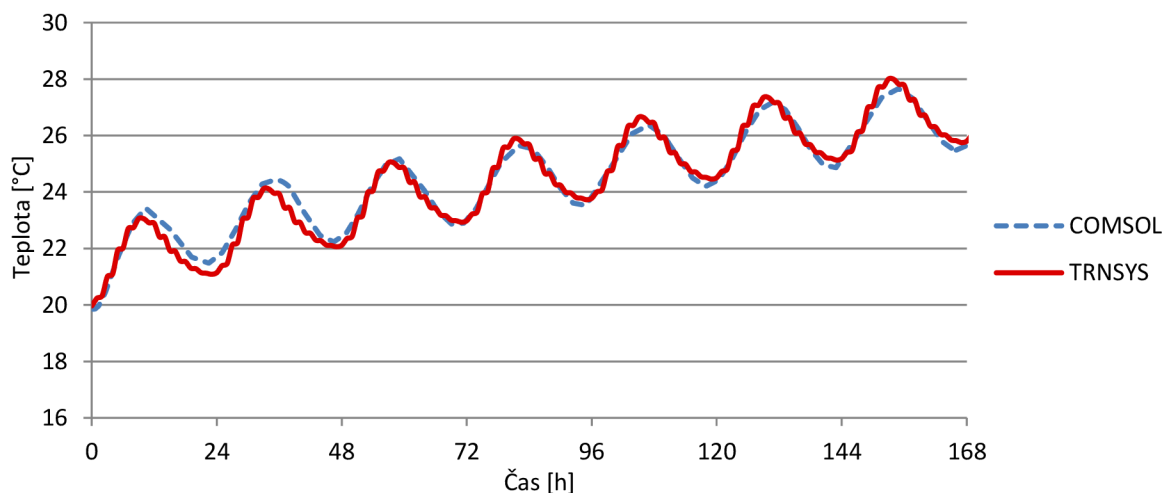
Výsledky těchto dvou studií, s vysokoemisivními a nízkoemisivními povrchy, nabízí porovnání tvaru vzduchového proudu vznikajícího v dutině a rozložení teplot v prostoru vzduchové vrstvy. Obecně lze konstatovat, že v dutině s vysokoemisivními povrchy vznikají proudy dva – podél horního povrchu a spodního povrchu, naopak v dutině s nízkoemisivními povrchy vzniká proud pouze jeden a to podél horního povrchu. Dále lze ze studií vyzorovat optimální tloušťku větrané vzduchové vrstvy. V případě vysokoemisivních povrchů je to tloušťka mezi 4 – 5 cm, kdy u 5 cm dutiny je již patrný náznak dělení do dvou samostatných proudů, přičemž ve větrané vzduchové vrstvě o optimální tloušťce má vznikat jediný společný proud vzduchu. V případě nízkoemisivních povrchů, kdy vzniká vzduchový proud pouze podél horního pláště nelze stanovit optimální tloušťku tímto způsobem. Proto byla sledována maximální rychlost proudění, která byla dosažena u tlouštěk 5 cm a 6 cm. Rovněž odvádění tepla se jeví při těchto tloušťkách jako nejefektivnější.

### **5.2.3 Tepelná bilance větraného střešního pláště oproti nevětrané variantě**

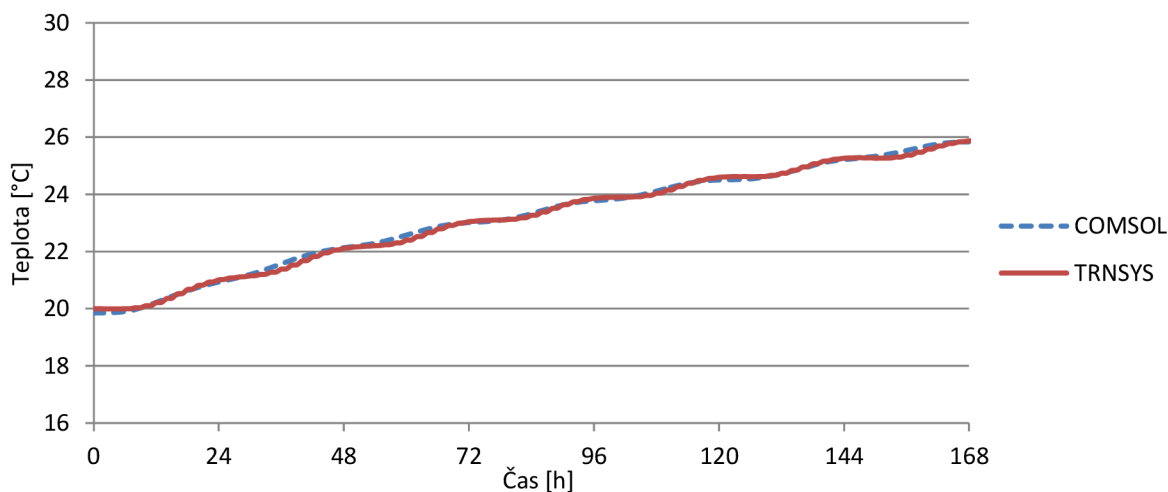
Pro vyčíslení tepelného namáhání interiéru ze strany střešního pláště byl zvolen výpočetní software TRNSYS. Program COMSOL, který byl doposud využíván pro všechny simulace v této práci, sice nabízí podrobný výpočet v rámci řešení detailu střešní skladby, ale nelze ho využít pro komplexní výpočet celé místnosti. K tomuto účelu byl vytvořen dynamický model podkrovní místnosti. Veškeré podrobnosti modelu a výpočtu jsou popsány v kapitole 4.7. Tato studie vznikla při stáži autorky na univerzitě v Gentu v Belgii ve výzkumné skupině prof. Arnolda Janssensse, která je zaměřená na zkoumání vnitřního prostředí budov.

3D model pro simulaci nevětraného střešního pláště, provedené v programu TRNSYS, tvoří celou podkrovní místnost, zatímco model v COMSOLu představuje pouze 2D výseč zahrnující jednometrový úsek střešního pláště, vnitřního vzduchu a podlahy. Porovnáním výstupů z obou programů byla nalezena uspokojivá shoda srovnávané veličiny – teploty líce stropního podhledu. Byl zachycen vývoj teploty stropního podhledu v období 7 dnů –

porovnání výsledků z obou programů pro variantu střešního pláště s tepelnou izolací z minerální vaty (Obr. 62) a pro variantu s tepelnou izolací z dřevovláknna (Obr. 63).



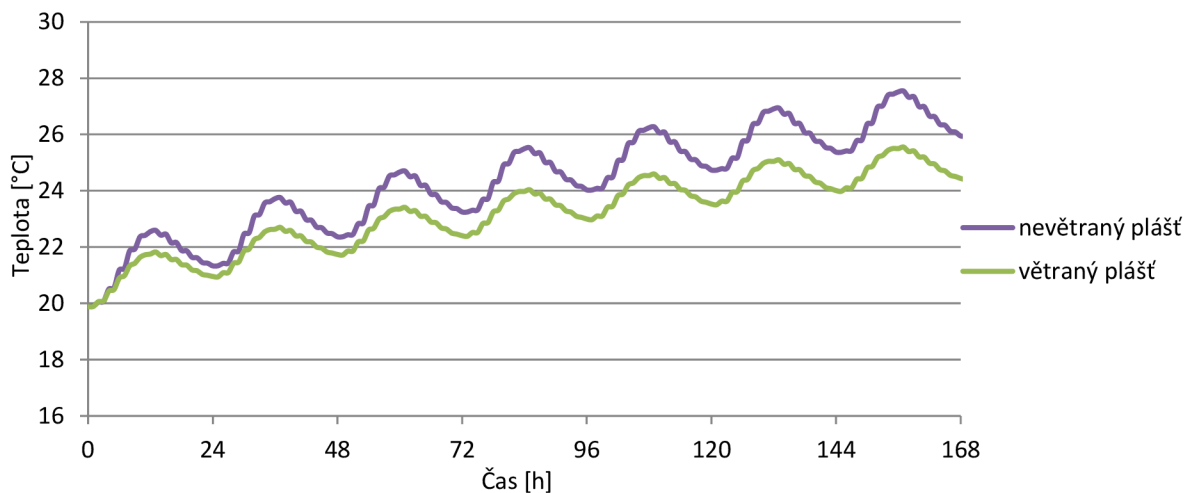
Obr. 62 Teplota stropního podhledu ve variantě tepelné izolace z minerální vaty – porovnání hodnot ze simulace z COMSOLu a TRNSYSu



Obr. 63 Teplota stropního podhledu ve variantě tepelné izolace z dřevovláknna – porovnání hodnot ze simulace z COMSOLu a TRNSYSu

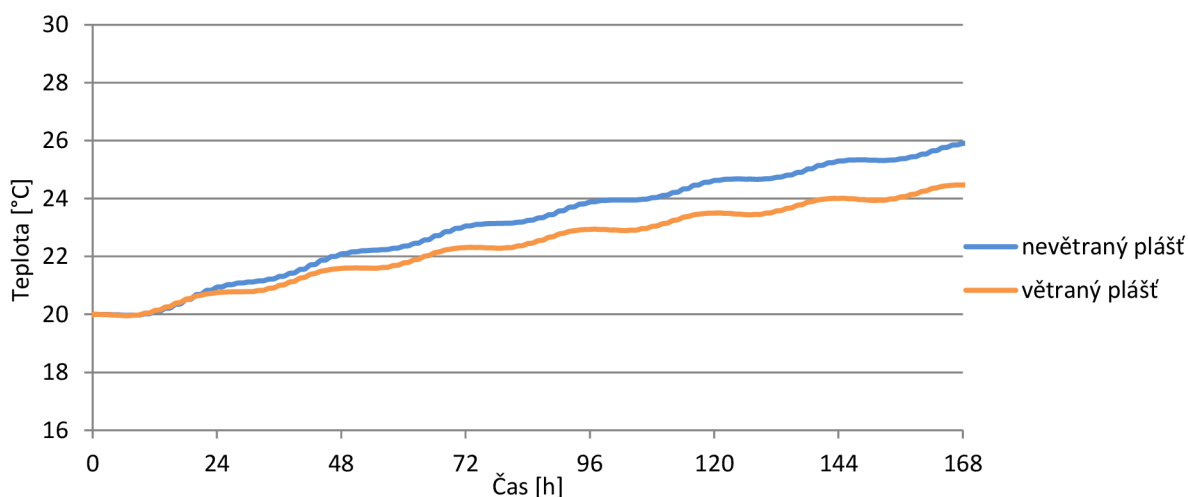
Stejný 3D model byl použit i pro větranou variantu střešního pláště. U všech konstrukcí byla zachována shodná skladba, pouze ve střešním plášti byla umístěna větraná dutina tloušťky 40 mm. Porovnání teplot stropního podhledu u větrané a nevětrané varianty v provedení tepelné izolace z minerální vaty nabízí Obr. 64. Již během prvního dne teplého období vykazuje dynamická simulace podkrovní místnosti nižší teploty podhledu u

větrané varianty oproti nevětrané. Teplotní rozdíly se s každým dalším dnem navyšují a sedmý den činí teplotní rozdíl již 2 °C.



Obr. 64 Teplota stropního pohledu ve variantě větraného a nevětraného střešního pláště s tepelnou izolací z minerální vaty, hodnoty ze simulace v TRNSYSu

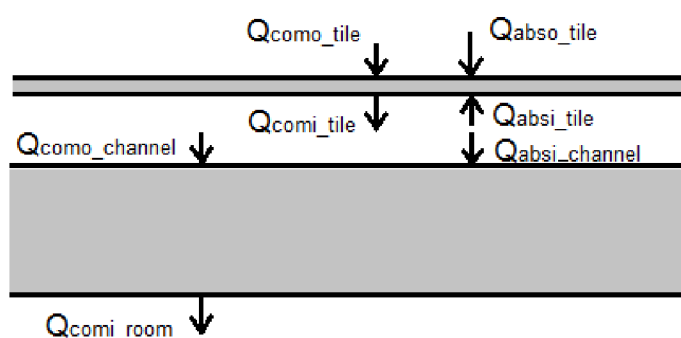
Stejné porovnání bylo provedeno i pro střešní skladbu s tepelnou izolací z dřevovláknna, viz Obr. 65. Rozdíl v teplotě stropního povrchu mezi větraným a nevětraným střešním pláštěm se začíná projevovat až třetí den teplého období a postupně se zvyšuje, sedmý den činí teplotní rozdíl 1,5 °C.



Obr. 65 Teplota stropního pohledu ve variantě větraného a nevětraného střešního pláště s tepelnou izolací z dřevovláknna, hodnoty ze simulace v TRNSYSu



V tepelné bilanci střešního pláště, uvedené v Tab. 18 a Tab. 19, jsou vyčísleny meze (maximální denní a minimální noční hodnoty) tepelných energií na všech rozhraních pevného materiálu a vzduchu, viz Obr. 66. V rovině vnějšího povrchu krytiny vystupuje energie absorbovaná vnějším povrchem střešního pláště  $Q_{abso\_tile}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ], tj. tepelné zisky ze slunečního záření, a energie vydávaná vnějším povrchem střešního pláště  $Q_{como\_tile}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ], zahrnující výměnu tepla prouděním a sáláním s oblohou. Ve větrané dutině na horním povrchu působí energie vydávaná/absorbovaná povrchem prouděním v dutině a sáláním s ostatními povrchy  $Q_{comi\_tile}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] a energie z vnějšího prostředí absorbovaná povrchem  $Q_{absi\_tile}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ]. Na spodním povrchu působí energie absorbovaná/ vydávaná povrchem prouděním v dutině a sáláním s ostatními povrchy  $Q_{como\_channel}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] a energie absorbovaná z vnějšího prostředí  $Q_{absi\_channel}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ]. Na stropním líci působí energie vydávaná/absorbovaná povrchem prouděním a sáláním s ostatními povrchy  $Q_{comi\_room}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ]. V Tab. 18 jsou prezentovány hodnoty pro střešní plášť s tepelnou izolací z minerální vaty a v Tab. 19 pro dřevovláknitou izolaci.



Obr. 66 Schéma střešního pláště s tepelnými energiemi působícími na jednotlivých površích

Následující tabulky uvádí mezní hodnoty tepelné energie absorbované a uvolňované povrchem během dne a noci pro větranou a nevětranou variantu. Nejvýznamnější veličinou je  $Q_{comi\_room}$  v posledním řádku, která definuje množství tepla pronikajícího do interiéru na metr čtvereční střešního pláště. Během denních teplotních maxim předává střešní plášť vnitřnímu prostředí  $5 W \cdot m^{-2}$  u nevětrané varianty s minerální vatou, je-li totožný střešní plášť větraný vzduchovou vrstvou tloušťky 40 mm, pak dojde ke snížení tepelného toku na  $3,5 W \cdot m^{-2}$ . Pro celou podkrovní místnost to pak znamená 89 W u nevětrané varianty, respektive 61 W u větrané varianty. V provedení tepelné izolace

z dřevovláknna prochází do interiéru u nevětrané varianty během dne až  $2,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a u větrané varianty  $1,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , což v celé ploše střechy vychází na 37 W u nevětrané, respektive 25 W u větrané varianty. Dále byl proveden stejný výpočet i pro variantu střešního pláště, která vykazovala nejlepší chování z hlediska povrchových teplot stropního líce v kapitole 5.1.4, kde byly hodnoceny kombinace tepelných izolací a stropních podhledů. Nejvýhodnější kombinací byla tepelná izolace z dřevovláknna a stropní podhled z jílových panelů, která dosahuje nejvyšší plošné tepelné kapacity. Nevětraná varianta propouští do interiéru  $1,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a větraná varianta  $1,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , přepočteno na celý střešní plášť 31 W u nevětrané, respektive 23 W u větrané varianty.

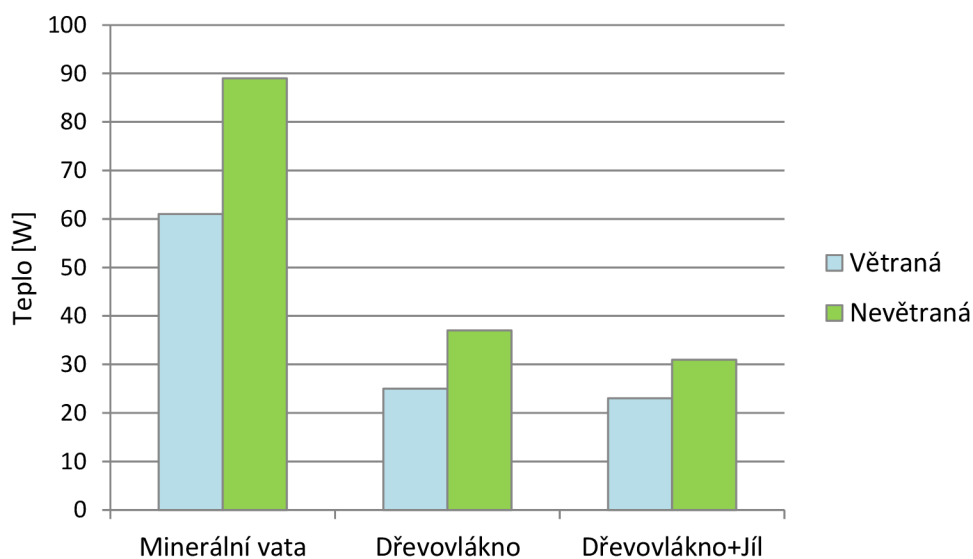
Celkový přehled tepla pronikajícího do interiéru střešním pláštěm pro všechny uvedené varianty nabízí graf v Obr. 67. Při využití dřevovláknité izolace v nevětrané variantě namísto minerální vaty dochází k 58% snížení tepelného namáhání interiéru během denních teplotních maxim. Aplikací větrané vzduchové vrstvy v případě minerální vaty bez dalších opatření se sníží tepelné namáhání o 31 %. S využitím dřevovláknité izolace, jílových podhledových desek a větrané vzduchové dutiny lze docílit 74% snížení tepelného namáhání oproti „typické střešní skladbě“.

Tab. 18 Tepelná bilance na površích střešního pláště větrané a nevětrané varianty v provedení tepelné izolace z minerální vaty.

| Tepelná energie                                  | Větraný plášť |       | Nevětraný plášť |      |
|--|---------------|-------|-----------------|------|
|  | Den           | Noc   | Den             | Noc  |
| $Q_{abs\_tile} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$     | 480,5         | 0     | 541,0           | 0    |
| $Q_{como\_tile} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$    | -366,4        | -1,4  | -518,9          | 0,5  |
| $Q_{comi\_tile} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$    | 112,6         | -13,5 | ---             | ---  |
| $Q_{abs\_tile} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$     | 2,8           | 0     | ---             | ---  |
| $Q_{como\_channel} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$ | 23,2          | -17,2 | ---             | ---  |
| $Q_{abs\_channel} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$  | 2,8           | 0     | ---             | ---  |
| $Q_{comi\_room} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$    | 3,5           | -0,5  | 5,0             | -0,2 |

Tab. 19 Tepelná bilance na površích střešního pláště větrané a nevětrané varianty v provedení tepelné izolace z dřevovláknna.

| Tepelná energie                         | Větraný plášť |       | Nevětraný plášť |      |
|---|---------------|-------|-----------------|------|
|   | Den           | Noc   | Den             | Noc  |
| $Q_{abs\_tile}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]    | 480,5         | 0     | 541,0           | 0    |
| $Q_{com\_tile}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]    | -358,8        | -3,7  | -500,9          | -3,5 |
| $Q_{com\_tile}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]    | 120,3         | -15,3 | ---             | ---  |
| $Q_{abs\_tile}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]    | 2,8           | 0     | ---             | ---  |
| $Q_{com\_channel}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ] | 32,3          | -19,7 | ---             | ---  |
| $Q_{abs\_channel}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ] | 2,8           | 0     | ---             | ---  |
| $Q_{com\_room}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ]    | 1,4           | 0,5   | 2,1             | 0,9  |









Obr. 67 Teplo procházející do interiéru střešním pláštěm v době denního teplotního maxima

Provedením posouzení tepelné bilance větrané a nevětrané střešní konstrukce je zřejmý pozitivní vliv větrané vzduchové vrstvy na tepelné namáhání interiéru. Vliv větrané vzduchové vrstvy se výrazněji projeví u varianty s minerální vatou a sádkartonovým podhledem.

#### 5.2.4 Krycí mřížky větracích otvorů

Veškeré doposud prezentované studie uvažovaly s volným přístupem i odvodem vzduchu z mezistřešní dutiny. Ve skutečnosti ale existuje potřeba tento prostor mezi horním a spodním pláštěm chránit před nežádoucími návštěvníky z živočišné říše. Pro zabránění vniknutí a osídlení dutiny hmyzem, drobným ptactvem a hlodavci, se umísťují na vstupní průběžný otvor větrací mřížky. Ve hřebeni střechy bývá osazen pod hřebenáči hřebenový větrací pás. Umístění těchto ochranných prvků na přívaděcí a odváděcí otvory představuje překážku pro proudění a narůstají tím tlakové ztráty. S redukcí plochy větracího otvoru vlivem umístění mřížky je obvyklé uvažovat i při výpočtu skutečné plochy větracích otvorů pro účely posouzení dostatečnosti větrání dle normových doporučení [29].

Tab. 20 Tlak před mřížkou vztažený k jednotce pevných částí mřížky

| Vzorek | Schéma  | Tlak na jednotku plochy pevných částí mřížky [Pa] | Procento otevřené plochy [%] | Procento pevných částí mřížky [%] |
|--------|---|---|------------------------------|-----------------------------------|
| 1      |  | 2,93  | 35                           | 65                                |
| 2      |  | 1,54  | 58                           | 42                                |
| 3      |  | 2,32  | 50                           | 50                                |
| 4      |  | 2,27  | 45                           | 55                                |
| 5      |  | 2,23  | 58                           | 42                                |
| 6      |  | 2,57  | 54                           | 46                                |

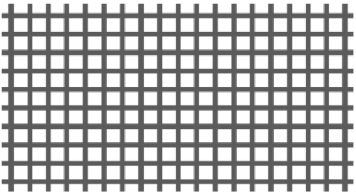
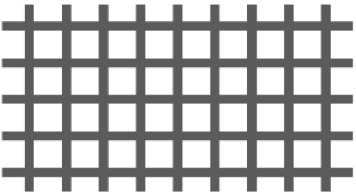

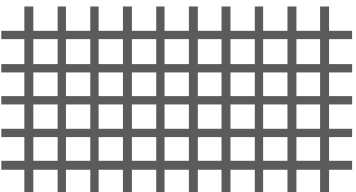
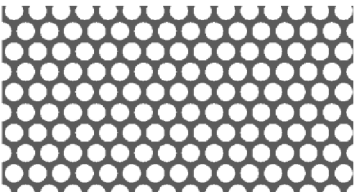
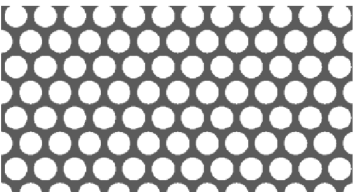
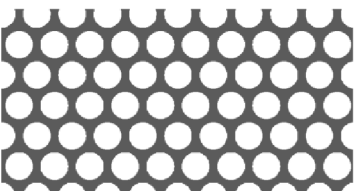

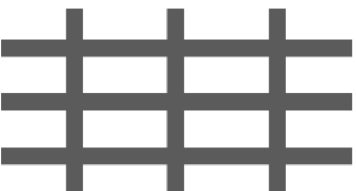
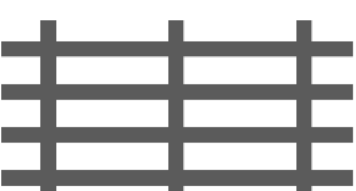


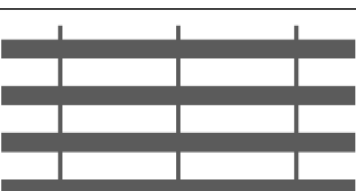
Kvůli prověření propustnosti těchto větracích mřížek bylo provedeno měření několika typů komerčně dostupných větracích mřížek s různou otevřenou plochou na ventilátorové dráze ve VZLÚ v Praze. Podrobněji je experiment popsán v kapitole 4.8.3, kde jsou uvedeny i výsledné hodnoty z měření. Byl sledován tlak vzduchu před mřížkami. Přepočítáním tlaku na jednotku dle procentuálního zastoupení pevné části mřížky z celkové plochy byl získán tlak vztahující se na 1 % pevných částí mřížky (Tab. 20). Ten byl vypočítán jako tlak vyvozený mřížkou (rozdíl tlaku před mřížkou a tlaku v potrubí bez osazené mřížky) ku procentu pevných částí mřížky.

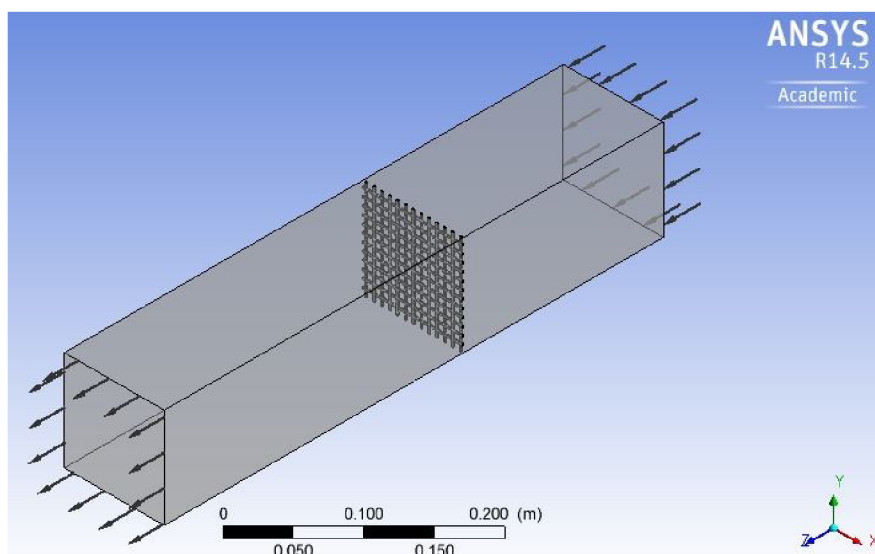
Z výsledků měření (Tab. 12) bylo zjištěno, že nárůst tlaku před mřížkami s měnícím se procentem otevřené plochy není lineární, dokonce se ani neshoduje u dvou mřížek se stejným procentem otevřené plochy (vzorek 2 a 5). Poukazuje to na skutečnost, že proudění vzduchu skrze mřížku a její tlaková ztráta je závislá i na tvaru otvorů. Toto zjištění vedlo k dalšímu zkoumání.

Pokračování výzkumu v této oblasti získalo podporu grantu juniorského specifického výzkumu FAST-J-14-2330 Optimalizace návrhu krycích mřížek větracích otvorů, období řešení 1. 1. 2014 – 31. 12. 2014. Další postup zahrnoval návrh třinácti mřížek se shodnou otevřenou plochou, která u všech variant činila 58 %, viz Tab. 21. Zastoupení mají různé tvary a velikosti otvorů – čtvercové, kruhové, obdélníkové i hexagonální. Obdélníkové otvory ve variantách různého poměru stran a také mřížky s nestejnou šířkou horizontálních a vertikálních částí mříže.

Navržené mřížky byly vymodelovány ve 3D v simulačním softwaru ANSYS TRX [73]. Model zahrnuje i tunel čtvercového průřezu o délce strany 100 mm a o celkové délce 500 mm (Obr. 68), kterým probíhá proudění. Umístění mřížky v tunelu je 200 mm od vletové části v celé ploše průřezu. Počáteční rychlost proudění byla zvolena  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Prostor tunelu byl diskretizován přibližně 600 000 elementy. Pro výpočet byl použit k- $\epsilon$  turbulentní model. Sledovanou veličinou byl celkový tlak 20 mm před mřížkou, a to na přímce vedoucí střední částí mezi dvěma protilehlými stěnami. Hodnoty celkového tlaku po průřezu uvádí graf na Obr. 69.

Tab. 21 Geometrie navržených větracích mřížek s otevřenou plochou 58 % [73]

|  |  |  |
|--|--|--|
|  <p>1a - oko 3 x 3 mm<br/>mříž 0,94 mm</p>  |  <p>1b - oko 6 x 6 mm<br/>mříž 1,88 mm</p>                                  |  <p>1c - oko 12 x 12 mm<br/>mříž 3,76 mm</p>  |
|  <p>1d - oko 5,32 x 5,32 mm<br/>mříž 1,67 mm</p>                                      |  <p>2a - oko <math>\varnothing</math> 4 mm<br/>mříž 1 mm</p>                |  <p>2b - oko <math>\varnothing</math> 5 mm<br/>mříž 1,25 mm</p>                       |
|  <p>2c - oko <math>\varnothing</math> 6 mm<br/>mříž 1,5 mm</p>                       |  <p>3a - opsaná kruž. <math>\varnothing</math> 6,6 mm<br/>mříž 1,79 mm</p> |  <p>4a - oko 8 x 18 mm<br/>mříž 3,53 mm</p>  |
|  <p>4b - otvor 6 x 24 mm<br/>mříž 3,15 mm</p>                                       |  <p>4c - otvor 4 x 36 mm<br/>mříž 2,46 mm</p>                             |  <p>4d - otvor 6 x 24 mm<br/>vertikální mříž 7,05 mm<br/>horizontální mříž 2 mm</p> |
|  <p>4e - otvor 6 x 24 mm<br/>vertikální mříž 0,84 mm<br/>horizontální mříž 4 mm</p> |  |  |



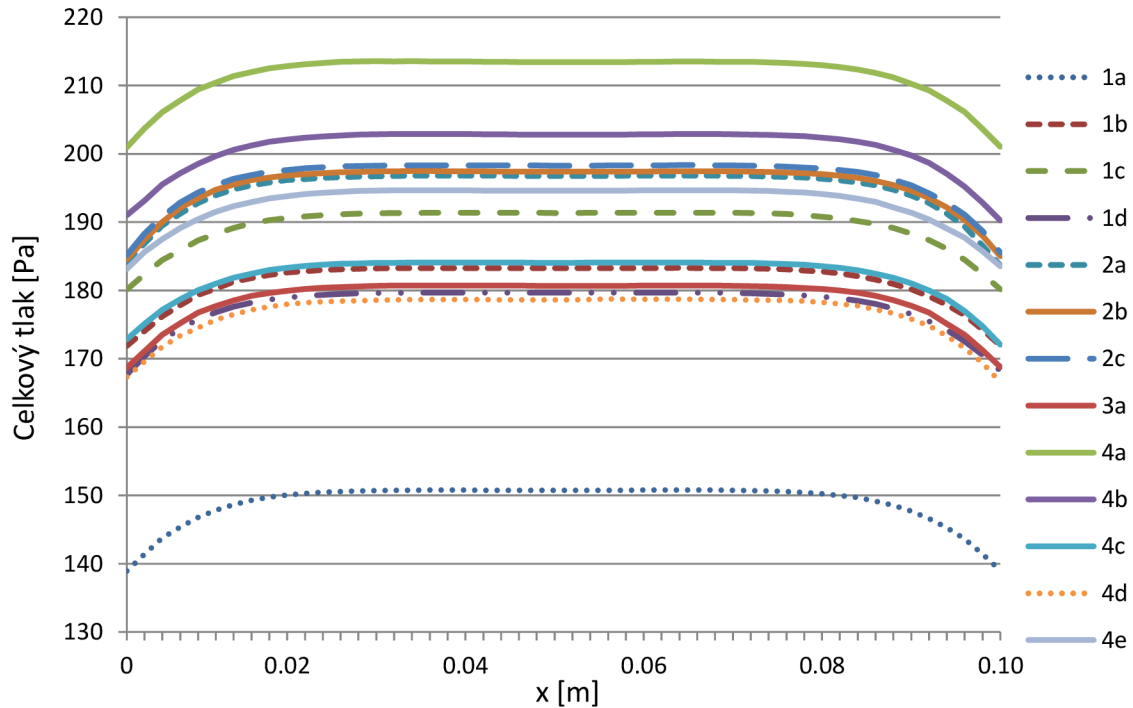
Obr. 68 Geometrie CFD modelu [73]

Porovnáním celkového tlaku před jednotlivými mřížkami (Obr. 69) lze odvodit, které mřížky dovolí snadnější prostup vzduchu skrze ně. Jako nejpropustnější, představující nejmenší odpor pro proudící vzduch, je mřížka 1a (s malými čtvercovými otvory) se 150 Pa, je zde výrazně nižší tlak než u všech ostatních mřížek. V rámci několika analýz byly prověřeny jednotlivé parametry tvaru otvorů.

Prvním zkoumaným faktorem byl **vliv velikosti otvorů** na proudění skrze mřížku, to bylo analyzováno na čtvercových a kruhových otvorech. U čtvercových otvorů byly porovnávány mřížky s velikostí ok 3, 6 a 12 mm (1a, 1b, 1c). Nejnižší tlak byl dosažen, jak již bylo uvedeno, u mřížky s nejmenšími otvory. Tlak před mřížkou 1b, jejíž plocha otvoru je čtyřikrát větší oproti 1a, je 183 Pa. U mřížky 1c, která má plochu otvoru čtyřikrát větší oproti 1b, je 191 Pa. Rozdíl v tlacích před mřížkami je 1b a 1c je poměrně malý (8 Pa) ve srovnání s rozdílem mezi mřížkami 1a a 1b (33 Pa). Zvětšováním plochy ok se zvyšuje tlak před mřížkami, ale neplatí to lineárně.

To samé bylo potvrzeno i na mřížkách s kruhovými otvory (2a, 2b, 2c), kde průměr oka činí 4, 5 a 6 mm. Plocha otvorů se neliší výrazně, tak jako u čtvercových průřezů. Nejnižší tlak byl zaznamenán u mřížky s nejmenšími otvory (2a) 197 Pa. Na mřížce 2b je tlak

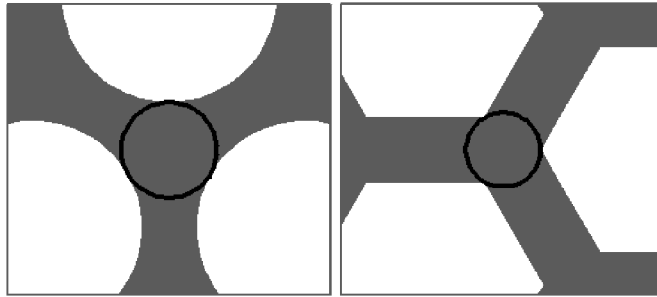
nepatrně vyšší a na mřížce 2c je tlak opět o trochu vyšší. Jednotlivé tlakové rozdíly nepřesáhly hodnotu 1 Pa.



Obr. 69 Celkový tlak 20 mm před mřížkami [73]

Pro účely zjištění, jakým způsobem ovlivňuje **tvar otvorů** proudění skrze mřížku, jsou porovnány mřížky s totožnou plochou jednotlivého otvorů ( $28,3 \text{ mm}^2$ ). Jedná se o mřížku s čtvercovými otvory 1d, s kruhovými otvory 2c a s hexagonálními otvory 3a. Nejnižší tlak 180 Pa byl zaznamenán na mřížce se čtvercovými otvory, mřížka s hexagonálními otvory vykazuje jen nepatrný rozdíl 1 Pa. Poměrně výrazný rozdíl 18 Pa nastává u mřížky s kruhovými otvory, na níž je tlak 198 Pa. Při porovnání geometrií mřížek 2c a 3a je rozdíl kromě tvaru otvorů také jistá nestejnóměrnost rozložení pevných části u mřížky s kruhovými otvory. Dochází zde ke kumulaci hmoty v uzlových bodech. Vyjádří-li se to vepsáním kružnice v tomto místě (Obr. 70), je kružnice většího průměru u mřížky s kruhovými otvory ( $d = 2,66 \text{ mm}$ ), než u mřížky s hexagonálními otvory ( $d = 2,07 \text{ mm}$ ).

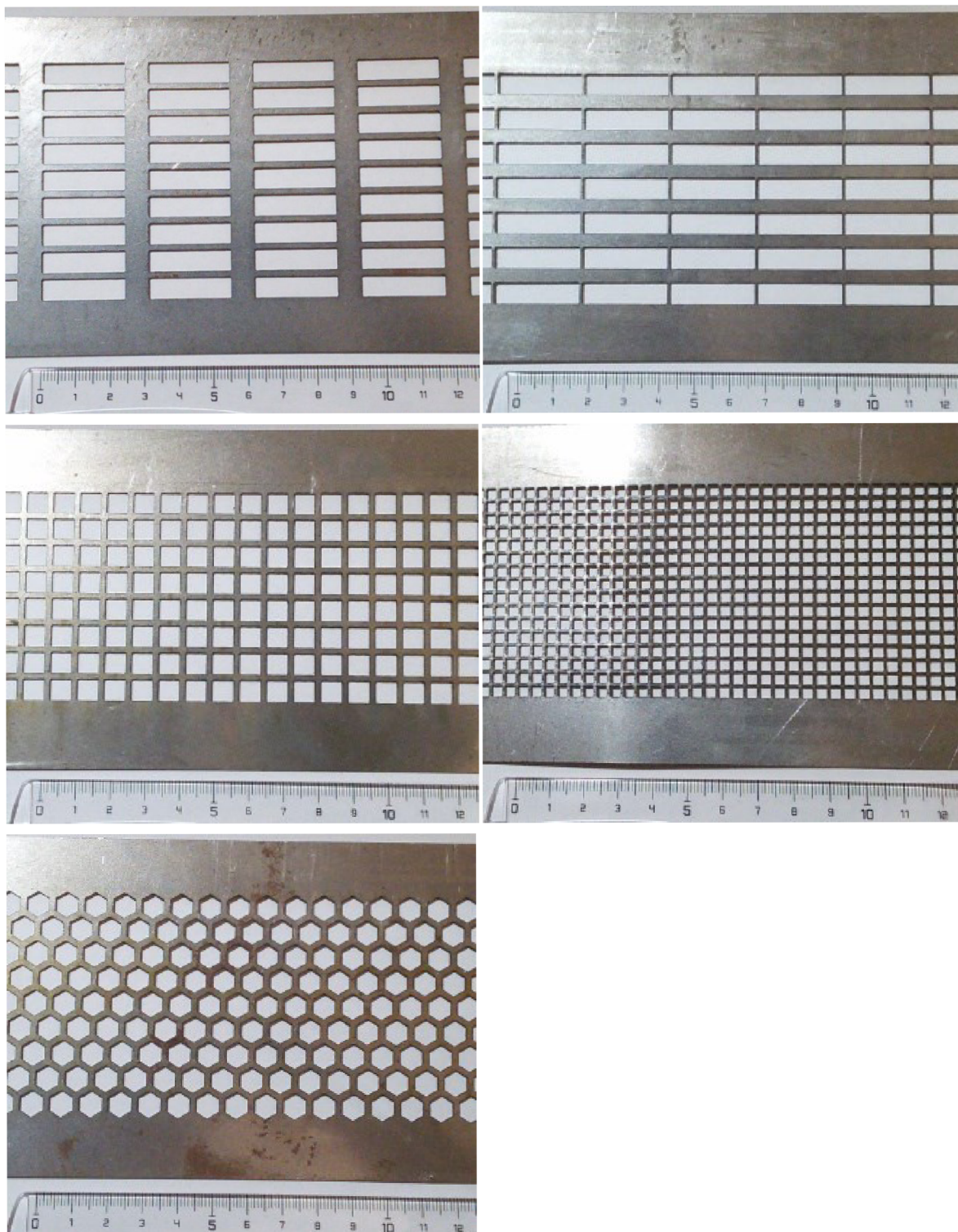




Obr. 70 Detail uzlového bodu mřížek 2c a 3a [73]

Dále byl zkoumán **vliv poměru stran obdélníkových otvorů**. Základní mřížka, ze které se vycházelo, je mřížka 1c se čtvercovým otvory o velikosti 12 x 12 mm. Byl na ni zjištěn tlak 191 Pa. Další porovnávané mřížky 4a, 4b a 4c mají obdélníkové otvory s různým poměrem stran. Snahou bylo vypořadovat, zda se projeví nějaká tendence růstu či klesání tlaků při snižování a rozšiřování základního čtvercového tvaru. Mřížka 4a s obdélníkovými otvory 8 x 18 mm vykazuje tlak 214 Pa. Na mřížce 4b s obdélníkovými otvory 6 x 24 mm je tlak 203 Pa. Na mřížce 4c s otvory 4 x 36 mm je zjištěn tlak 184 Pa. Před mřížkou s nejvíce protáhlými otvory 4c je sice nejnižší tlak vzduchu ze všech čtyř porovnávaných variant, nelze zde však vypořadovat souvislý vývoj tlakových křivek závislý na poměru stran obdélníku. Byl však zaznamenán trend v souvislosti s šířkou mříže, kdy u mřížek s užšími pevnými částmi byl tlak nižší než u větších šířek mříže. Zřejmě se jedná o ten samý jev jako u kruhových a hexagonálních otvorů na Obr. 70.

Posledním zkoumaným aspektem je **vliv nestejnomyernosti mřížky**. Záměrem bylo zjistit, zda se nějakým způsobem projeví různé uspořádaní jinak totožných otvorů. Za tímto účelem byly porovnány mřížky 4b, 4d a 4e s obdélníkovými otvory 6 x 24 mm. Mřížka 4b se stejně širokými svislými i vodorovnými částmi mřížky vykazuje tlak 203 Pa, tím dosahuje nejvyšší hodnoty ze všech tří posuzovaných mřížek. Na druhém místě je mřížka 4e se širokými vodorovnými částmi, na které byl dosažen tlak 195 Pa. Tlak na mřížce 4d s širokými svislými částmi je 179 Pa, což je výrazně nižší hodnota než u dvou předchozích mřížek. Možné vysvětlení je takové, že proudnice obcházející překážku, mají tendenci se spojit do jednoho proudu snáze v oblasti úzkých mříží. V takovém by případě seskupení otvorů 4d bylo energeticky výhodnější.



*Obr. 71 Prototypy mřížek*

Z hlediska praktického využití byl z CFD simulace získán poznatek, že mřížky s menšími otvory lépe propouštějí vzduch a jsou tudíž vhodnější pro účel zakrytí větracích otvorů.

Kromě toho, že představují menší překážku pro vzduch proudící ve větrané vzduchové vrstvě, také lépe chrání dutinu před vniknutím hmyzu. V rámci dalšího pokračování projektu byly vyrobeny prototypy vybraných mřížek (Obr. 71) – se čtvercovými otvory 3 mm (1a) a 6 mm (1b), s hexagonálními otvory (3a), s obdélníkovými otvory s širokou svislou mříží (4d) a širokou vodorovnou mříží (4e) a opět testovány na ventilátorové dráze ve VZLÚ v Praze.

Tab. 22 Výsledky z měření tlaků na prototypch mřížek na ventilátorové dráze ve VZLÚ

|             |      | frekvence měniče [Hz]                       |      |       |       |        |         |
|-------------|------|---|------|-------|-------|--------|---------|
|             |      | 1   | 2    | 3     | 6     | 9      | 24      |
|             |      | rychlost proudění $v$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]  |      |       |       |        |         |
|             |      | 1,8   | 3,2  | 5,2   | 10,5  | 15,2   | 40,9    |
|             |      | dynamický tlak na otvor bez mřížky $q$ [Pa] |      |       |       |        |         |
|             |      | 2,0   | 6,4  | 17,0  | 69,1  | 144,9  | 1047,2  |
| p_ bez      | [Pa] | 1,40  | 7,80 | 18,10 | 73,71 | 165,73 | 1183,08 |
| p_ ctv3     | [Pa] | 1,32  | 8,20 | 19,05 | 78,64 | 171,33 | 1207,10 |
| p_ ctv6     | [Pa] | 1,12  | 7,55 | 19,24 | 78,66 | 180,38 | 1225,58 |
| p_ hex      | [Pa] | 1,56  | 8,37 | 19,27 | 79,69 | 180,04 | 1296,00 |
| p_ obd vod  | [Pa] | 1,73  | 8,23 | 18,94 | -     | 180,41 | 1289,26 |
| p_ obd svis | [Pa] | 1,70  | 8,84 | 19,08 | 80,97 | 182,54 | 1296,73 |

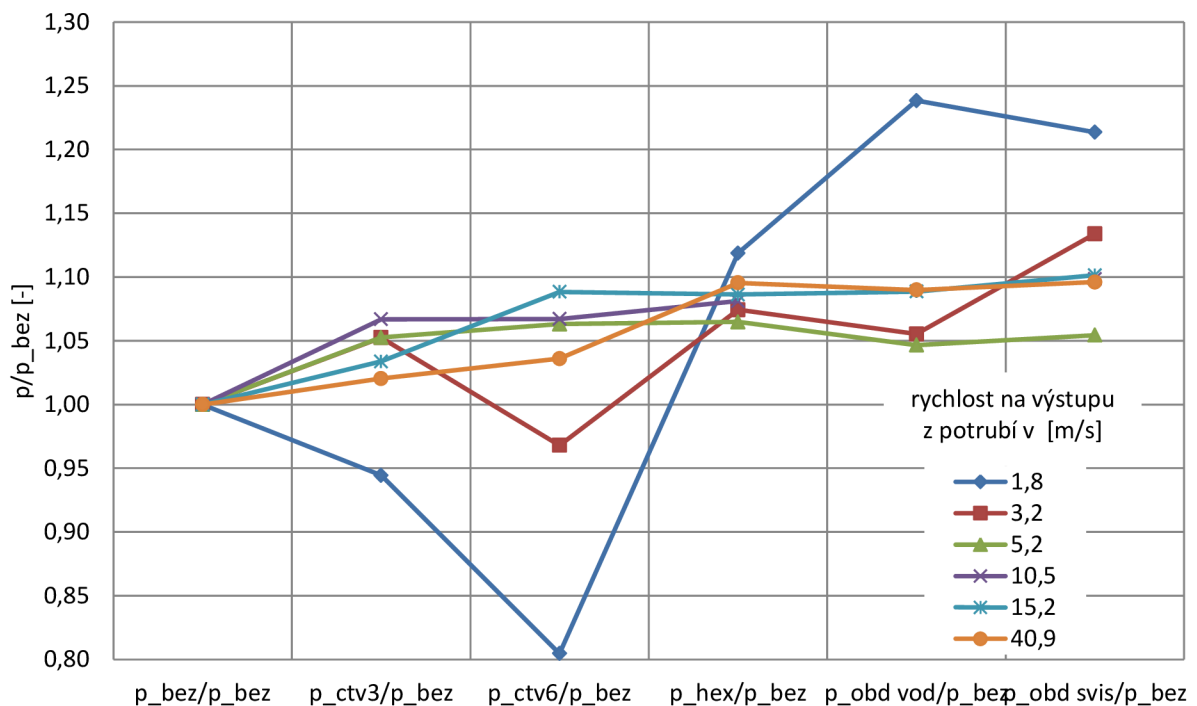
|                    |     |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| p_ bez/p_ bez      | [-] | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| p_ ctv3/p_ bez     | [-] | 0,94 | 1,05 | 1,05 | 1,07 | 1,03 | 1,02 |
| p_ ctv6/p_ bez     | [-] | 0,80 | 0,97 | 1,06 | 1,07 | 1,09 | 1,04 |
| p_ hex/p_ bez      | [-] | 1,12 | 1,07 | 1,06 | 1,08 | 1,09 | 1,10 |
| p_ obd vod/p_ bez  | [-] | 1,24 | 1,06 | 1,05 | -    | 1,09 | 1,09 |
| p_ obd svis/p_ bez | [-] | 1,21 | 1,13 | 1,05 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |

|               |     |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p_ bez/q      | [-] | 0,688 | 1,214 | 1,068 | 1,066 | 1,144 | 1,130 |
| p_ ctv3/q     | [-] | 0,650 | 1,278 | 1,124 | 1,138 | 1,183 | 1,153 |
| p_ ctv6/q     | [-] | 0,554 | 1,175 | 1,135 | 1,138 | 1,245 | 1,170 |
| p_ hex/q      | [-] | 0,770 | 1,304 | 1,137 | 1,153 | 1,243 | 1,238 |
| p_ obd vod/q  | [-] | 0,852 | 1,281 | 1,117 | -     | 1,245 | 1,231 |
| p_ obd svis/q | [-] | 0,835 | 1,377 | 1,126 | 1,171 | 1,260 | 1,238 |

Vysvětlivky ke zkratkám v tabulce: bez – bez mřížky, ctv3 – čtvercové otvory 3 mm, ctv6 – čtvercové otvory 6 mm, hex – hexagonální otvory, obd vod – obdélníkové otvory s širokou vodorovnou mříží, obd svis – obdélníkové otvory s širokou svislou mříží

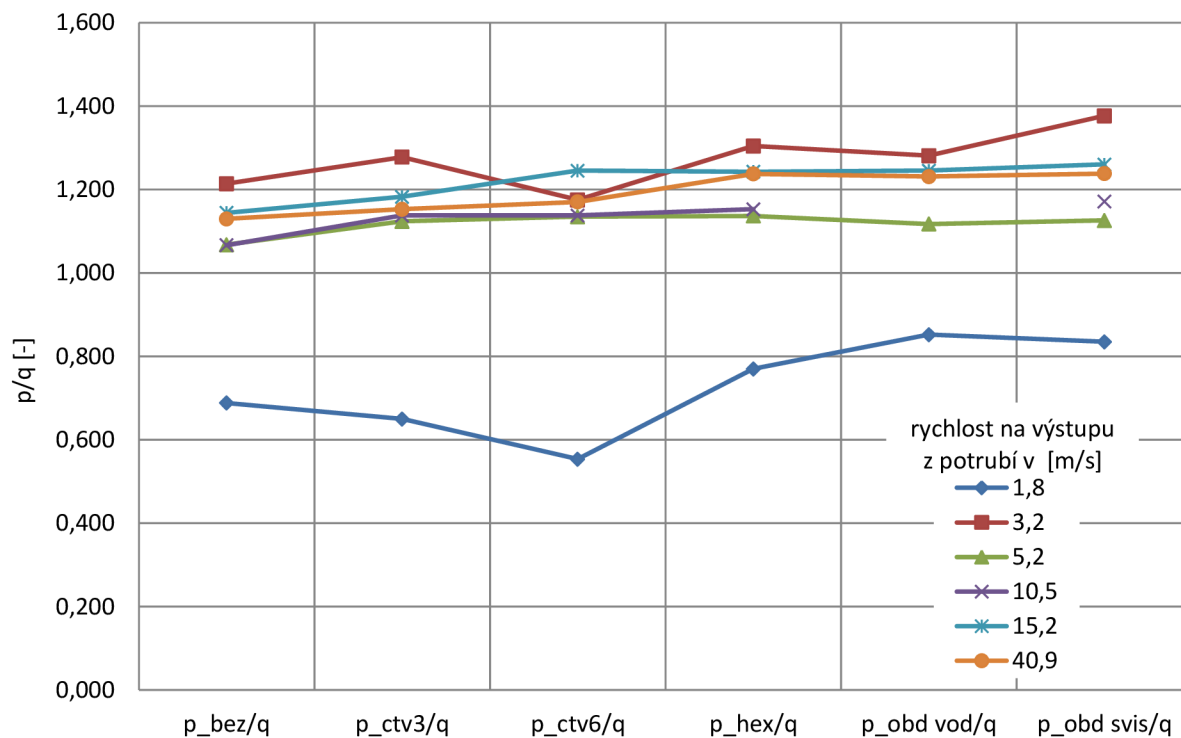
Během měření prototypů mřížek na ventilátorové dráze byly mřížky vystaveny různým rychlostem proudění, které byly dány frekvencí měniče. Rychlosti proudění uvedené v hlavičce Tab. 22 jsou vztaženy k rovině otvoru pro osazení mřížky. Tlak v potrubí byl měřen čtyřmi tlakovými senzory umístěnými 200 mm před záklopem s mřížkou. Hodnoty tlaku uvedené v první části Tab. 22 jsou průměrem ze všech čtyř tlakových skenerů. V druhé části této tabulky je uváděn poměr tlaku mřížky k tlaku bez mřížky. Ve třetí části je uveden poměr tlaku před mřížkou a dynamického tlaku na otvor bez mřížky.

Graf v Obr. 72 prezentuje přehledně tlaky před mřížkami vztažené k tlaku v potrubí bez mřížky v záklopu, pouze s prázdným výřezem. Teoreticky by mělo proudění probíhat snadněji u variant bez mřížky, tudíž hodnoty by měly vždy přesahovat hodnotu 1. Nicméně to se nepotvrdilo u nízkých rychlostí (1,8 a 3,2 m·s<sup>-1</sup>) při proudění skrze mřížky se čtvercovými otvory. Je to přisuzováno nízké přesnosti měření pro malé rychlosti proudění, při opakování experimentu pro rychlosti okolo 1 m·s<sup>-1</sup> by bylo vhodné zvážit jiné metody. U vyšších rychlostí se potvrdil předpoklad z CFD simulace, že mřížka s malými čtvercovými otvory umožňuje nejsnadněji prostup proudícího vzduchu.



Obr. 72 Poměr tlaku v potrubí pro mřížky vztažený k tlaku v potrubí bez mřížky

Graf v Obr. 73 uvádí tlak v potrubí před mřížkami v poměru k dynamickému tlaku v potrubí stanovenému výpočtečně  $q = 1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ .



Obr. 73 Poměr tlaku v potrubí a dynamického tlaku na otvoru bez mřížky

Výsledky získané z tohoto měření nejsou zcela jednoznačné, a je rozhodně doporučeno provést další měření. Zejména v oblasti nízkých rychlostí proudění vzduchu, jež je klíčové v oblasti použití mřížek jako krycího prvku přirozeně větrané vzduchové vrstvy ve střešním plášti. Pro rychlosti proudění cca  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  již není vhodné využití tohoto typu ventilátorové dráhy, kde jsou příliš vysoké ztráty třením o stěnu pláště a přesnost je již nevyhovující. Při dalším zkoumání tohoto tématu je nutné zvážit jiné experimentální metody.

Závěrem této kapitoly lze připomenout jednoznačný pozitivní vliv větrané vzduchové vrstvy na redukci tepelných zisků během teplého letního období. Pro zachování její účinnosti je třeba počítat s vlivem vřazených odporů, jako jsou krycí mřížky větracích otvorů. Obecně platí, čím vyšší procento otevřené plochy, tím snadněji vzduch prochází. Byl však zaznamenán i jistý vliv tvaru otvorů, který by bylo vhodné ještě dále ověřit.



### 5.3 Sjedenocný postup při výpočtu šíření tepla střešním pláštěm

V reálné stavební konstrukci se na transportu tepla podílí všechny tři způsoby přenosu – vedení, proudění a sálání. V tepelně technických posouzeních se často přistupuje ke zjednodušeným modelům pro usnadnění a urychlení výpočtu. Běžně bývá opomíjeno proudění v uzavřených vzduchových dutinách, v některých situacích však může být podstatné, například mezi okenními tabulemi při velkém rozdílu teploty vzduchu v interiéru a v exteriéru. Často je také zanedbáván vliv sálání, a to jak ve vzduchových vrstvách, tak i u vnějších povrchů konstrukcí. Za určitých okrajových podmínek se však mohou získané výsledky značně lišit od reálných hodnot. V případě, kdy není ve výpočtu zohledněn vliv sálání tepla z krytiny směrem k obloze v nočních hodinách, pak může docházet ke kondenzaci ve vzduchové mezeře, přestože to výsledky nedokládají. Proto je vždy velmi důležité, aby projektant správně odhadnul, které jevy se mohou v daném případě vyskytovat, a tudíž je nemůže považovat za zanedbatelné.

Výpočet tepelné bilance střešního pláště je používán zejména při výpočtu celkové bilance místnosti ve výpočtu tepelné stability místnosti, a také u výpočtu potřeby chlazení pro místnosti s klimatizací. Dále se používá mezi výzkumníky zabývajícími se prostupem tepla střešním pláštěm. Výpočty se provádí v různých přesnostech, podle účelu využití. Dřívější normy nabízely buď zjednodušený výpočet [34], který byl využíván programy, jako např. Svoboda software nebo DEKSOFT. Přesnější výpočty pak využívaly přesnějšího normového výpočtu [36], např. TRNSYS. V nynější době, softwary založené na zjednodušených metodách, jsou měněny dle nové metodiky [35]. Nejpřesnější výpočty zahrnují vlastní výpočet součinitele přestupu tepla, stanovení teploty oblohy, nebo při prezenci větrané vzduchové dutiny, určení typu proudění v dutině. Smyslem těchto přesných výpočtů přenosu tepla střešním pláštěm je poznání, jaké děje ve střešní skladbě nastávají a jak se skladba chová při změně různých parametrů, za účelem optimalizace střešních skladeb. Výsledkem bývají konstrukční doporučení, návrh nových produktů, či nové korelační vztahy.

Zde byla vytvořena metodika provádění přesných tepelně technických výpočtů dvouplášťových střešních konstrukcí. Tento navržený sjedenocný postup výpočtu

reflektuje i na poznámku v normě ČNS 73 1901, kde je uvedeno, že pro snížení nežádoucích tepelných zisků má být proveden samostatný návrh vzduchové vrstvy, ale není zde uvedena metodika výpočtu ani odkaz na jinou normu. Proto byla vytvořena tato část publikace, kde bylo snahou vytvořit přehledný postup provedení tepelně technického výpočtu střešního pláště, zahrnujícího větranou vzduchovou vrstvu. Na Obr. 74 je zachycen vývojový diagram tepelně technického výpočtu pro větraný střešní plášť nebo pro podkrovní místnost s přilehlým větraným střešním pláštěm.

Prvním krokem je provedení návrhu střešního pláště a případně i přilehlého podkroví, podle požadavků na typ výsledků. Následně je třeba zvolit vhodný výpočetní software, a to zejména podle toho, zda se má jednat o komplexní výpočet celé místnosti či dokonce budovy, nebo je pozornost soustředěna na konkrétní stavební konstrukci či konstrukční detail. Pro výpočty v rámci místnosti či celé budovy jsou vhodné programy pro dynamickou simulaci budov. Mezi nejužívanější patří TRNSYS, EnergyPlus nebo DesignBuilder. V jednotlivých konstrukcích je uvažováno s jednorozměrným šířením tepla. Geometrii lze zadat definicí všech ploch nebo importováním 3D modelu. Pro výpočty detailů se využívají programy na principu metody konečných prvků, jako jsou COMSOL, ANSYS, apod. Geometrii lze obvykle vynést přímo v programu nebo importovat CAD soubor. Před samotným výpočtem je potřeba diskretizovat oblast vytvořením sítě, buď v rámci programu, nebo s využitím doplňkového programu. V Tab. 23 je uveden přehled výhod a nevýhod, které se pojí k těmto dvěma typům programů a může pomoci s výběrem softwaru.

Dle typu zvoleného softwaru probíhá příprava výpočtového modelu (Obr. 75). Model vychází z návrhu střešního pláště či místnosti, ale uvažuje s jistým zjednodušením geometrie. To platí především pro MKP. Zde se zejména zjednodušuje tvar krytiny, zanedbávají se některé konstrukční prvky, jako například laťování či spáry mezi jednotlivými taškami. Pakliže výpočet vyžaduje zahrnutí těchto vlivů, lze doporučit dbát na jednoduchost tvarů. Může se tím výrazně snížit výpočetní náročnost. Spáry v krytině lze zadat i jiným způsobem než vynešením v geometrii. Lze je vyjádřit hodnotou propustnosti pláště. Dále je potřeba připravit okrajové podmínky, venkovní (počasí) i vnitřní, je-li uvažováno s větracími režimy, vnitřními zdroji tepla, apod. Dále pak

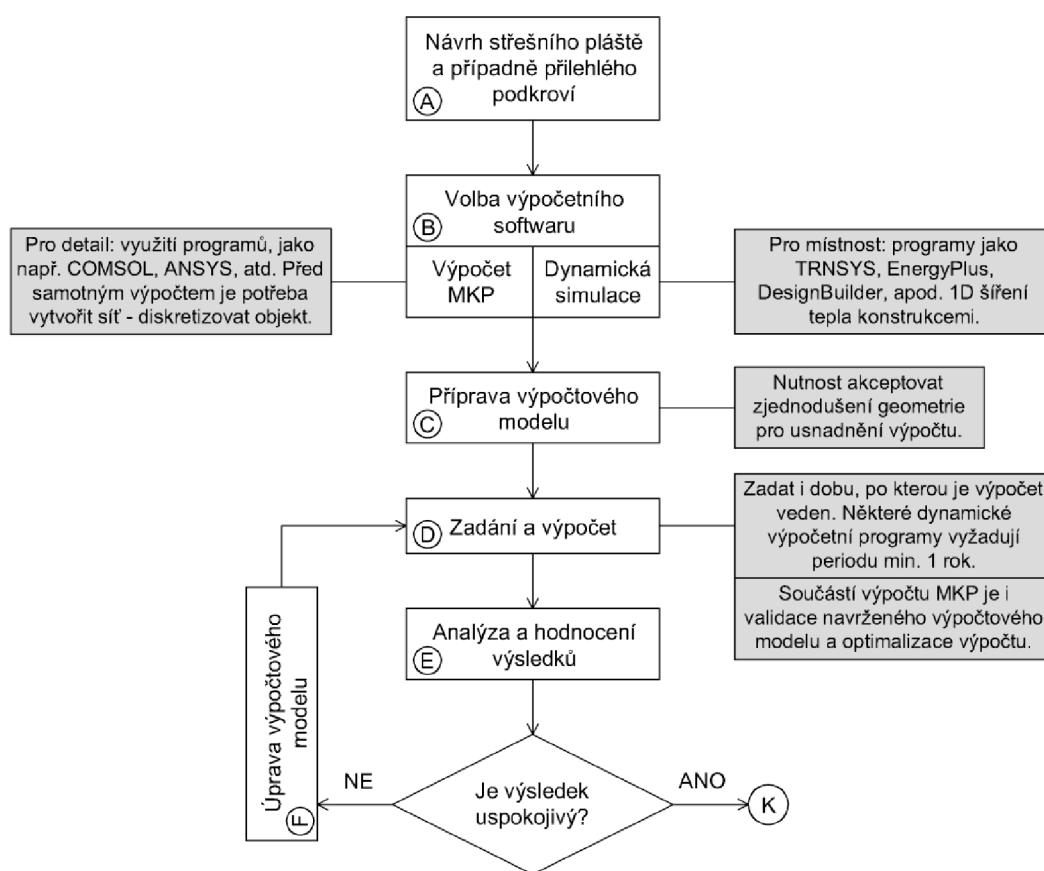
počáteční podmínky, jimiž se rozumí výchozí teplota na počátku výpočtu. U skladby střešního pláště je třeba znát povrchové vlastnosti i materiálové charakteristiky všech vrstev. U podkrovní místnosti platí to samé i pro všechny zbývající ohraničující konstrukce. Samostatnou analýzu vyžaduje větraná vzduchová vrstva, u níž jsou sledovány její charakteristické vlastnosti, jimiž jsou délka, vzdálenost pláštů, tvar spodního líce krytiny, laťování, spáry horního pláště, větrací mřížky, emisivita povrchů v dutině a také předpokládaný teplotní rozdíl povrchu pláštů a okolního prostředí. Všechny tyto parametry ovlivňují vlastnosti proudění – typ proudění, Nusseltovo číslo, potažmo součinitel přestupu tepla, podíl přenosu tepla sáláním mezi horním a spodním pláštěm, a také tlakové poměry ve větrané vrstvě. Vyjmenované vlastnosti mají přímý vliv na teplotní a rychlostní pole ve větrané vzduchové vrstvě. V případě MKP je třeba znát, jaký typ proudění zde nastane, laminární či turbulentní, a v závislosti na tom budou programem generovány vzorce pro výpočet proudění. Naopak u dynamické simulace je vhodné dopočítat vlastní součinitele přestupu tepla, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků.

V pravé části diagramu (Obr. 75) je čárkovaně vyznačena oblast, kde jsou uvedeny fyzikální veličiny a informace vstupující do výpočtu, které jsou klíčové pro vytvoření funkčního výpočtového modelu. Jednotlivým parametrům je věnován podrobnější popis dále v textu. Pro přehlednost je text členěn do číslovaných **částí**, odkazy na ně jsou uvedeny nad jednotlivými okny.

Po vytvoření výpočtového modelu je provedeno zadání všech veličin a informací do programu a je iniciován výpočet. Je třeba zadat dobu výpočtu, tj. periodu, po kterou je výpočet veden. Některé dynamické výpočetní softwary vyžadují období minimálně jednoho roku. Při výpočtu MKP je nutné vytvořený výpočtový model validovat, tedy porovnat výsledky s měřením na stejné konstrukci za totožných okrajových podmínek, nebo lze porovnat s výsledky již validovaného modelu. U MKP je také riziko, že během výpočtu nenastane konvergence a výpočet selže. V tomto případě je většinou potřeba upravit síť – zjemnit nebo rozšířit oka, nebo přistoupit k nějakým zjednodušením v geometrii. Také může značit nevhodné zadání okrajových podmínek v detailu napojení vzduchové dutiny na venkovní prostředí.

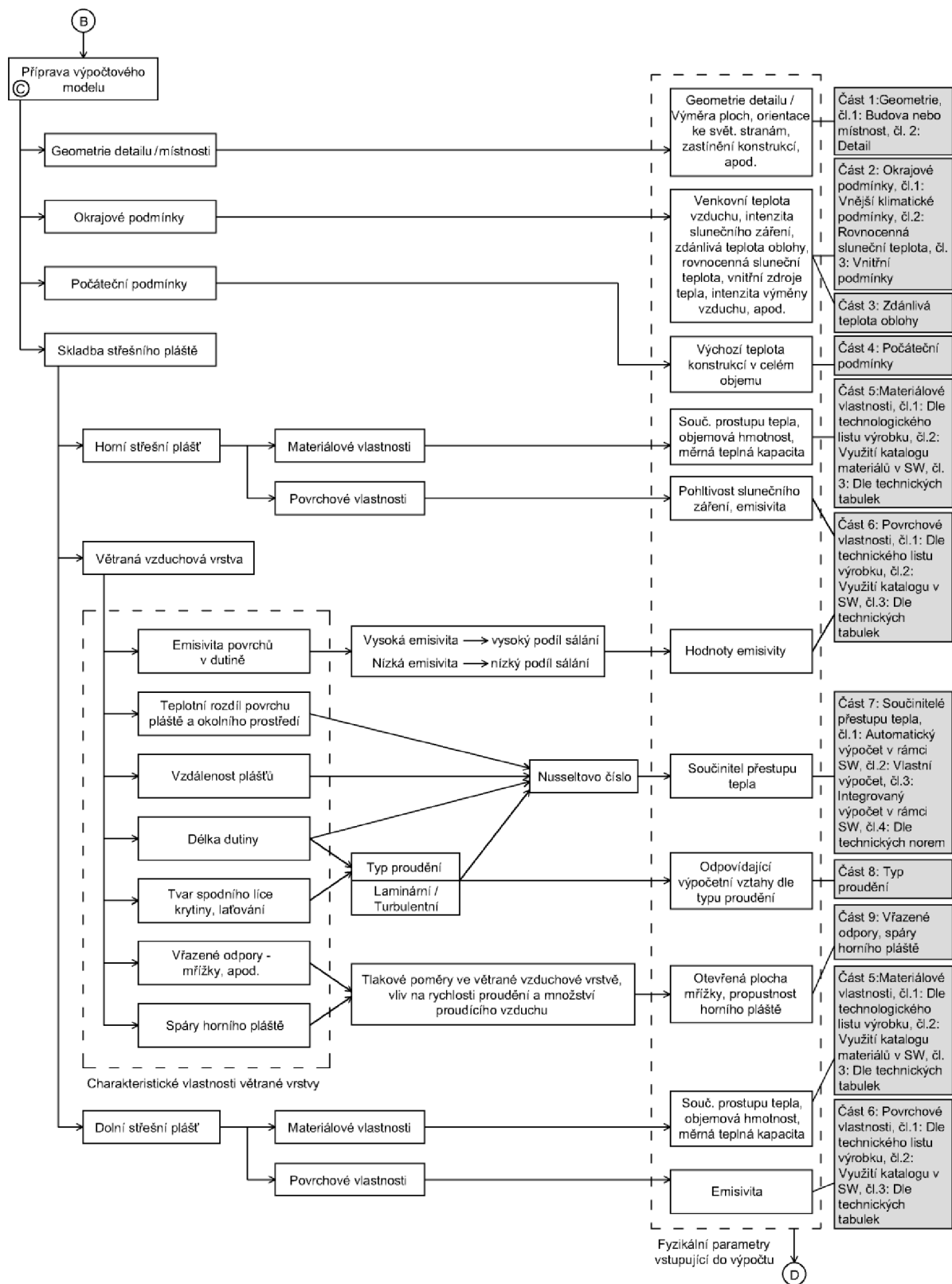


Jakmile je výpočet dokončen, je možné začít s vyhodnocováním dat a prováděním analýz. Tab. 24 zobrazuje přehled nejvýznamnějších analýz, jež je možné zpracovat z výsledků dynamické simulace nebo výpočtu MKP. Nejčastěji hodnocené jsou teplota vnitřního vzduchu, střední radiční teplota a vnitřní povrchová teplota. Pokud konstrukce nevyhoví stanoveným limitům, pak následuje úprava návrhu a výpočtového modelu. Změny se většinou dotýkají dimenze vrstev či materiálových vlastností. V případě problematiky celé místnosti, také úpravou zasklení, stínících prvků, či orientací ke světovým stranám. Tento proces je opakován do té doby, než jsou splněny požadavky na místnost či konstrukci.



Obr. 74 Postup tepelně technického výpočtu střešního pláště či podkrovní místnosti

Metodika tepelně technického výpočtu je schematicky znázorněna na Obr. 74. Metodický postup při tvorbě přesného výpočtového modelu větraného střešního pláště uvádí Obr. 75. Pozornost je zejména soustředěna na větranou vzduchovou vrstvu, kde přináší přehled o tom, jaké veličiny jsou ovlivněny kterými parametry. Struktura standardu metodiky obsahuje devět **částí**, které jsou dále členěny do **článků**.



Obr. 75 Metodický postup přípravy výpočtového modelu šikmého střešního pláště

Tab. 23 Výhody a nevýhody MKP a dynamické simulace

| MKP |  | Dynamická simulace |   |
|-----|--|--------------------|---|
| ⊕   | přesný výpočet rychlostního a teplotního pole ve vzduchové vrstvě  | ⊕                  | snadné zadání a rychlý výpočet                          |
| ⊕   | možnost sledování detailů v dutině a jejich vliv na větrání (mřížky, spáry v krytině, latě)  | ⊕                  | tepelná bilance střešního pláště i místnosti            |
| ⊕   | výpočet přináší přesné hodnoty součinitele přestupu tepla  | ⊖                  | výpočet není tak přesný jako MKP                        |
| ⊖   | nutnost vytvořit funkční výpočetní model a validovat jej   | ⊖                  | nelze definovat typ proudění ve vzduchové vrstvě        |
| ⊖   | časová náročnost výpočtu, nedochází-li ke konvergenci je výpočet přerušen a musí se upravit výpočetní model a spustit nový výpočet – toto může nastat i několikrát po sobě, než je výpočet optimalizován | ⊖                  | nelze započítat vliv laťování ani spáry v horním plášti |

Tab. 24 Přehled nejčastějších analýz výsledků z MKP a dynamické simulace

| MKP  | Dynamická simulace  |
|--|---|
| detailní analýza teplotního a rychlostního pole ve vzduchové vrstvě  | analýza účinnosti větrané vzduchové vrstvy                                    |
| generování lokálních hodnot součinitele přestupu tepla a globální hodnoty pro příslušný povrch   | tepelná bilance místnosti i střešního pláště                                  |
| analýza účinnosti větrané vzduchové vrstvy   | průměrné teploty a rychlosti ve větrané vzduchové vrstvě v závislosti na čase |
| tepelná bilance střešního pláště   |   |
| teploty v průběhu času v jakémkoliv místě střešního pláště, na povrchu i v hmotě; možnost generování zprůměrovaných hodnot pro jakýkoliv povrch, plochu či obsah |   |

Navrhovaný standard se dotýká všech veličin, které vystupují ve vztazích pro přesný výpočet šíření tepla větraným střešním pláštěm. Je pomocným nástrojem, jak se rychle v dané problematice zorientovat. Většina dostupné literatury se zabývá výpočtem doporučeným v normě – zjednodušeným či přesnějším. Na straně druhé existují publikace na velmi odborné úrovni z oblasti termiky a hydrauliky, které jsou velmi obsáhlé a časově náročné na nastudování. Proto byla vytvořena tato část práce, s jejíž pomocí mohou studenti nebo začínající specialisté na tepelnou techniku a energetiku staveb snadněji zvolit vhodné postupy a vztahy pro výpočet potřebných koeficientů a veličin.

### *Část 1: Geometrie*

V úlohách kde je sledován celek – místnost nebo budova není důležitý tvar jednotlivých konstrukcí, ale především jejich plošná výměra a orientace ke světovým stranám, protože softwary pro dynamickou simulaci počítají s jednorozměrným šířením tepla. Naopak při řešení detailů (2D a 3D úlohy) se používají programy na principu MKP a snahou je zachovat autentičnost tvaru konstrukce, nicméně většinou se přistupuje k dílčím zjednodušením s přihlédnutím k úspoře výpočetního výkonu.

#### **Článek 1: Budova nebo místnost**

Při výpočtu místnosti či celé budovy lze zadat geometrii do softwaru výměrou ploch a jejich orientací ke světovým stranám. Dále se zadávají rozměry a poloha oken, typ zasklení, zastínění, atd. Při zadávání oken se většinou využívá výběru z katalogu v softwaru. Další možností je importovat geometrii do programu v podobě CAD souboru.

#### **Článek 2: Detail**

V případě detailu se geometrie vynese přímo v programu, nebo ji lze importovat v CAD souboru do programu. Je obvyklé přistoupit ke zjednodušením tvaru či zanedbáním některých prvků. Složitost geometrie značně zvyšuje výpočetní nároky a prodlužuje dobu výpočtu. Záleží vždy na zvážení co je podstatné a zanedbat nelze. Naopak to, co není sledováno a nepředpokládá se, že by příliš ovlivnilo výsledek výpočtu, lze zanedbat či zjednodušit. Programy využívající MKP nerozeznávají kde je nahoře a kde dole, proto je nutné v úlohách s přirozeným prouděním nadefinovat gravitační pole.

## *Část 2: Okrajové podmínky*

Pro každý tepelně technický výpočet je třeba zvolit okrajové podmínky. Zatímco při výpočtu detailu si lze vystačit jen s vnější povrchovou teplotou, nazývanou rovnocenná sluneční teplota, u dynamické simulace místnosti je nutné zadat mnohem více veličin. Z vnějších klimatických údajů se zadává teplota, vlhkost, intenzita slunečního záření, rychlost větru a barometrický tlak. Rovněž je důležitá zeměpisná poloha, nadmořská výška, typ okolní krajiny, nebo charakter zástavby. Program uvažuje s pozicí slunce na obloze a také s větrnými poměry lokality. Ze strany interiéru vstupují do výpočtu vnitřní tepelné zdroje a intenzita výměna vzduchu.

### **Článek 1: Vnější klimatické podmínky**

Při posuzování stavby z hlediska letního období jsou voleny klimatické návrhové hodnoty dle dané lokality [32]. Součástí řady výpočetních softwarů je katalog s klimatickými daty vztahující se vždy ke konkrétní lokalitě. Hodnoty vychází z dlouholetých průměrů získaných meteorologickým měřením. Sluneční záření pronikající atmosférou je z části rozptýleno, proto je rozlišováno sluneční záření přímé a rozptýlené, neboli difúzní, obě veličiny bývají programem vyžadovány. Záření odražené od zemského povrchu a jiných těles se rovněž řadí mezi záření rozptýlené. Tyto hodnoty bývají součástí vestavěných klimatických katalogů. Nevýhodou katalogů je, že pro požadovanou oblast nemusí být k dispozici data. Většinou zde bývá pro Českou republiku uvedeno jen pár měst. Další možností je použití klimatických dat z meteostanice pro konkrétní lokalitu a časové období.

Další možností je vložení harmonicky se opakujících podmínek jednoho dne, většinou teplého slunečného dne s vysokými teplotami. Tyto okrajové podmínky jsou vhodné pro sledování období „nahřívání“ konstrukce, kdy v počátečním stavu je teplota konstrukcí ustálena na konstantní hodnotě, např. 20 °C. Po určitém období vystavení konstrukcí těmto oscilujícím podmínkám se ustálí odezva konstrukcí na tuto teplotní zátěž. Oblast, kdy teplota konstrukcí osciluje již ve stejném intervalu, se nazývá **kvazistacionární**. Rovněž toto období může být sledováno ve výsledcích.

## **Článek 2: Rovnocenná sluneční teplota**

V některých případech, zejména při řešení detailu, lze využít jako náhradu vnějších klimatických podmínek jednu souhrnnou veličinu – rovnocennou sluneční teplotu. Ta vyjadřuje teplotu povrchu konstrukce – krytiny. Lze ji získat výpočtem (98) z teploty vzduchu a intenzity slunečního záření nebo z naměřených hodnot.

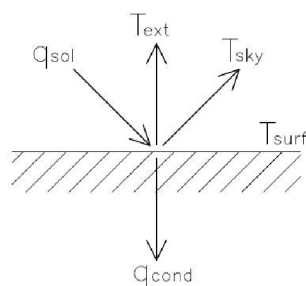
## **Článek 3: Vnitřní podmínky**

Mezi vnitřní okrajové podmínky se řadí vnitřní tepelné zdroje, pobyt osob, režimy větrání a intenzita výměny vzduchu. Tepelným zdrojem bývají domácí spotřebiče, počítače, vařiče, osvětlení, ale i přímo osoby, a to dle charakteru činnosti, kterou vykonávají.

### *Část 3: Zdánlivá teplota oblohy*

Výpočet může být zpřesněn vlastním výpočtem zdánlivé teploty oblohy. Každý program pro dynamickou simulaci budov má již nějakou hodnotu předdefinovanou. Program tedy nedává automaticky požadavek na zadání této veličiny, takže si uživatel nemusí uvědomovat, s jakou hodnotou program počítá.

Vnější stěnové konstrukce, zasklení výplní otvorů a především střešní konstrukce jsou vystaveny ochlazovacím účinkům oblohy. K vyčíslení tepelných toků sáláním střešního pláště směrem k obloze je nutné znát teplotu oblohy. Tento člen se vyskytuje v bilanční rovnici pro povrch střešního pláště (100), která je schematicky zakreslena v Obr. 76. Teplota oblohy se pohybuje v rozmezí přibližně  $-45\text{ °C}$  pro jasnou oblohu a až  $12\text{ °C}$  pro zataženou oblohu [56], [57], ale v teplých a vlhkých klimatických podmínkách může dosahovat až  $20\text{ °C}$ . Okamžitá teplota oblohy je ovlivněna meteorologickými veličinami –



Obr. 76 Schematické znázornění tepelných toků na povrchu střešního pláště

teplotou a vlhkostí vzduchu a také výskytem oblačnosti a jejím typem. Její teplotu lze vypočítat z různých korelačních vztahů.

$$q_{cond} = \alpha \cdot q_{sol} - h \cdot (T_{surf} - T_{ext}) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{surf}^4 - T_{sky}^4) \quad (100)$$

Existuje mnoho korelačních vztahů pro výpočet teploty oblohy. Ty nejvíce zjednodušené uvažují pouze s teplotou suchého teploměru. Přesnější výpočty zahrnují i složku vodní páry formou parciálního tlaku vodní páry [58], [59] nebo teploty rosného bodu [60]. Pro získání ještě přesnějších výsledků se užívá výpočtového modelu se zahrnutím faktoru oblačnosti  $CC$  v rozmezí hodnot 0 – 1,  $CC = 0$  pro čistou oblohu,  $CC = 1$  pro úplně zataženou oblohu [58], [56], [60], [61]. U některých výpočetních rovnic je rozlišován i typ oblačnosti – nízká, střední, vysoká. V literatuře lze nalézt výpočtové modely emisivity lišící se pro den a noc [62]. Dle doporučení evropské normy [36] je postačující výpočet dle Swinbanka (1963) se zanedbáním vlivu oblačnosti:

$$T_{sky} = [9,36 \cdot 10^{-6} \cdot T_{ext}^6]^{0,25} \quad (101)$$

kde venkovní teplotu  $T_{ext}$  je třeba dosadit v Kelvinech a výsledná teplota oblohy  $T_{sky}$  [K].

Emisivita oblohy závisí na stejných faktorech jako její teplota. Rovněž pro její vyčíslení existuje celá řada korelací s různou přesností. Obecně však platí, že pro zataženou oblohu je její hodnota přibližně 0,97, kdežto u jasné oblohy se její emisivita pohybuje okolo 0,75. Přehled vybraných výpočtových modelů teploty oblohy a její emisivity je v Tab. 25.

Tab. 25 Vybrané korelační vztahy pro teplotu oblohy a její emisivitu [63], [64], [65]

|   |  |
|---|--|
| Swinbank (1963)<br>Cole (1976)<br>[56] [66] | $T_{sky} = [9,365574 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - CC) \cdot T_{ext}^6 + T_{ext}^4 \cdot CC \cdot \varepsilon_{clouds}]^{0,25} \quad (102)$ |
|   | $\varepsilon_{clouds} = (1 - 0,84 \cdot CC)(0,527 + 0,161 \cdot e^{8,45 \cdot (1-273/T_{ext})}) + 0,84 \cdot CC \quad (103)$           |
| Berdahl a Martin<br>(1984)<br>[60] [62]     | $T_{clear\_sky} = T_{ext}(\varepsilon_{clear})^{0,25} \quad (104)$   |
|   | $\varepsilon_{clear} = 0,711 + 0,56(T_{dp}/100) + 0,73(T_{dp}/100)^2 \quad (105)$  |
|   | $Ca = 1 + 0,0224 \cdot CC + 0,0035 \cdot CC^2 + 0,00028 \cdot CC^3 \quad (106)$  |
|   | $T_{sky} = Ca^{0,25} \cdot T_{clear\_sky} \quad (107)$   |



Tab. 25 Vybrané korelační vztahy pro teplotu oblohy a její emisivitu (pokračování ze str. 140)

|   |  |       |
|---|--|-------|
| Brutsaert (1984)<br>[59]  | $\varepsilon_{clear} = 1,72(p_v/T_{ext})^{1/7}$  | (108) |
| Monteith a<br>Unsworth (1990)<br>[61]   | $\varepsilon_{clouds} = (1 - 0,84 \cdot CC) \cdot \varepsilon_{clear} + 0,84 \cdot CC$ | (109) |
|   | $\varepsilon_{clear} = 9,2 \cdot 10^{-6} \cdot T_{ext}^2$                              | (110) |
| Aubinet (1994)<br>[58] [62]   | $T_{sky} = 94 + 12,6 \cdot \ln(P_v) - 13 \cdot K_t + 0,341 \cdot T_{ext}$              | (111) |
|   | $\varepsilon_{clouds} = 0,682 + 0,0352 \cdot \ln(P_v) + 0,133 \cdot \ln(1 - K_0)$      | (112) |
| <p><math>T_{sky}</math> – teplota oblohy [K]; <math>T_{ext}</math> – teplota venkovního vzduchu [K]; <math>T_{clear\_sky}</math> – teplota čisté oblohy [K];<br/> <math>T_{dp}</math> – teplota rosného bodu [°C]; <math>\varepsilon_{clouds}</math> – emisivita oblohy s oblačností [-]; <math>\varepsilon_{clear}</math> – emisivita čisté oblohy [-];<br/> <math>p_v</math> – parciální tlak vodní páry [kPa]; <math>CC</math> – faktor oblačnosti [-]; <math>Ca</math> – efekt oblačnosti [-];<br/> <math>P_v</math> – parciální tlak vodní páry [Pa]; <math>K_t</math> – index čistoty oblohy; <math>K_0</math> – index atmosferické čistoty</p> |  |       |

Index čistoty oblohy  $K_t$  je definován jako poměr globálního slunečního záření a extraterestriální insolace (sluneční záření dopadající na vnější povrch atmosféry). Výpočtové modely pro teplotu oblohy a její emisivitu jsou založeny na reálných měřeních, proto jsou často použitelné jen pro určité rozpětí teplot či vlhkostí vzduchu. Rovněž bývají vztaženy pouze k jisté lokalitě, ve které bylo měření prováděno. Každá oblast má specifické klimatické podmínky a při užití vztahu pro danou oblast lze dosáhnout poměrně vysoké přesnosti. Vznikl-li vztah z dat měřených na větším území s rozličnými klimatickými poměry, je výsledek obecně lépe aplikovatelný, ale s mnohem nižší přesností. [62] Informace uvedené v této části byly publikovány autorkou na doktorské konferenci JuniorStav 2016 [65].

#### Část 4: Počáteční podmínky

Na počátku výpočtu je uvažováno s vyrovnanými teplotami v celé konstrukci / místnosti. Pro iniciaci výpočtu je nutné zadat hodnotu počáteční teploty. Většinou se uvažuje s hodnotou 20 °C.

#### Část 5: Materiálové vlastnosti

Základními materiálovými vlastnostmi potřebnými k zadání tepelně technického výpočtu jsou součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost, měrná tepelná kapacita a tloušťka materiálu.

### **Článek 1: Dle technického listu výrobku**

Hodnoty všech základních materiálových veličin by měly být uvedeny v technickém listu výrobku. Jejich využití by mělo přinést nejpřesnější možné výsledky. U některých materiálů, zejména z přírodních surovin, nebývá uváděna měrná tepelná kapacita, proto je nutné ji získat z jiných podkladů, např. technických tabulek nebo odborné literatury.

### **Článek 2: Využití katalogu materiálů v SW**

Méně přesnou variantou je užití katalogu materiálů zabudovaného v rámci softwaru. Bývají zde parametry komerčně dostupných stavebních výrobků, ale i materiálů obecně. Nevýhodou je, že katalog nemusí být aktualizovaný a parametry výrobků výrobci neustále vylepšují. Týká se to zejména tepelných izolací. Naopak výhodou použití katalogu může být, že některé materiály, jejichž hodnoty jsou závislé např. na teplotě, jsou v katalogu nadefinovány s touto závislostí.

### **Článek 3: Dle technických tabulek**

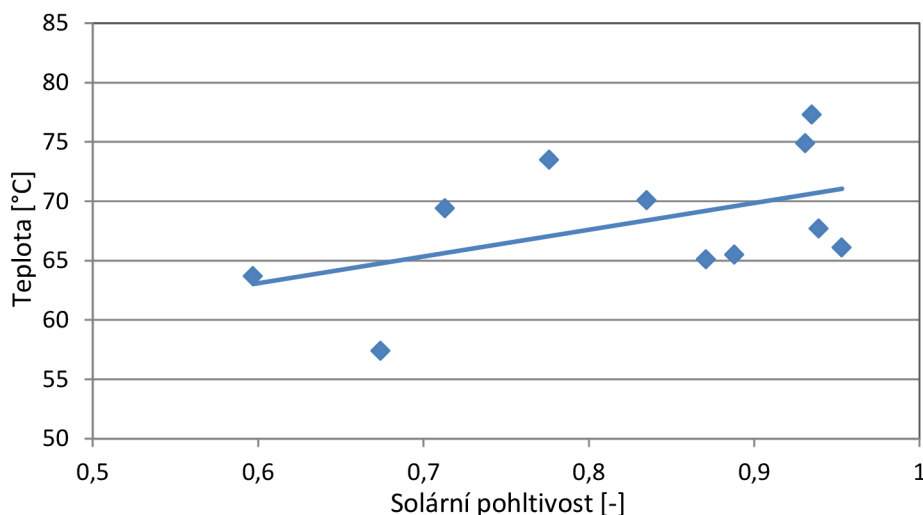
Parametry, které neuvádí výrobce a obecné materiály, jako například různé druhy dřeva či kamene, lze vyhledat v technických tabulkách, např. v [42].

### *Část 6: Povrchové vlastnosti*

Povrchové vlastnosti vnějšího povrchu stavební konstrukce určují, jaké procento slunečního záření bude odraženo a kolik bude pohlceno, což významně ovlivňuje povrchovou teplotu. Barva, lesk a hrubost povrchu mají přímý vliv na odrazivost slunečního záření. Tyto materiálové vlastnosti mají následně vliv na množství pohlceného tepla. U přesných výpočtů je však bezpodmínečně mít k dispozici co nejpřesnější hodnoty sluneční pohltivosti či odrazivosti.

Tímto tématem se zabýval článek autorky [23], ve kterém byly měřeny povrchové teploty krytiny a hodnoceny v závislosti na pohltivosti slunečního záření. V kapitole 4.8.1 je popsán celý experiment a uvedeny dosažené teploty. Teplota krytiny je ovlivňována nejen sluneční pohltivostí, ale i materiálovými vlastnostmi krytiny. Nebyla vyzkoušena přímá posloupnost mezi solární pohltivostí a dosaženou teplotou. V grafu na Obr. 77 jsou

vyneseny povrchové teploty 11 vzorků v závislosti na jejich solární pohltivosti. Přestože nebyla nalezena přímá posloupnost, je patrný rostoucí trend.



Obr. 77 Závislost dosažené maximální povrchové teploty krytiny během letního dne na solární pohltivosti u vzorků různých typů střešních krytin

Povrchové a materiálové charakteristiky krytiny ovlivňují množství tepla penetrující střešním pláštěm. Studie v rámci kapitoly 5.1.6 ukázala, že povrchová teplota krytiny ovlivňuje teplotu stropního podhledu poměrně významně, a proto se i ve výpočtu špatný odhad vlastností krytiny projeví.

Další významnou povrchovou vlastností je emisivita. Z hlediska výpočtu je důležité znát její hodnotu pro všechny povrchy konstrukce, i pro povrchy v dutině.

### Článek 1: Dle technického listu výrobku

Nejpřesnější variantou je jednoznačně použití hodnot sluneční pohltivosti a emisivity z technického listu výrobku. Alternativou je provedení vlastního laboratorního měření.

### Článek 2: Využití katalogu v SW

Většinou každý výpočetní software má k dispozici katalog materiálů i povrchových vlastností pro různé povrchové úpravy. Těchto hodnot lze využít pro výpočet, ale někdy nebývá snadné zvolit správnou položku. Stává se, že v katalogu materiálů jsou pro zdánlivě podobné výrobky značně odlišné hodnoty.

### Článek 3: Dle technických tabulek

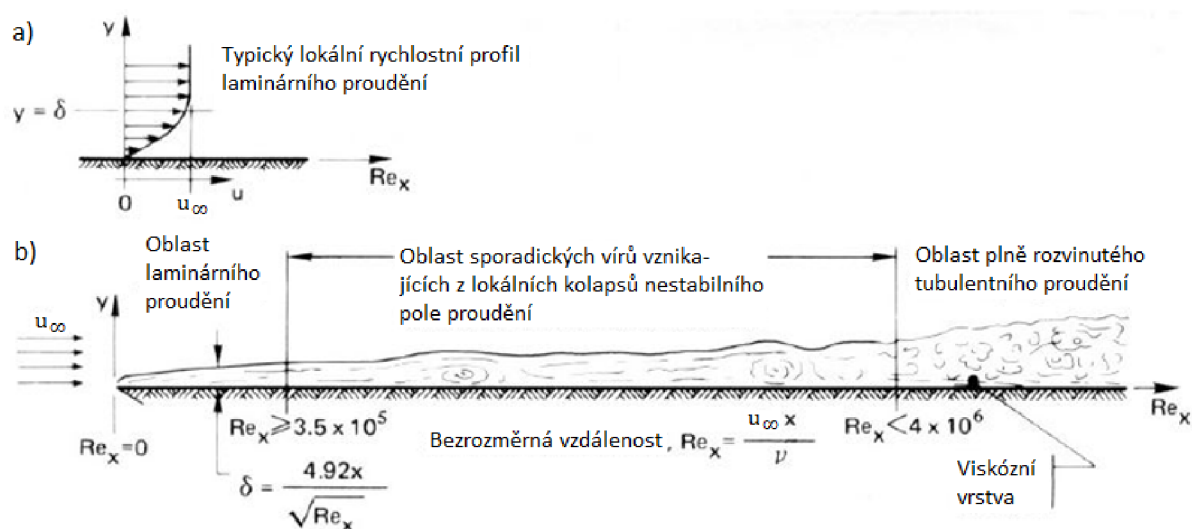
Nejsou-li k dispozici přesné laboratorní hodnoty z vlastního měření či od výrobce, pak lze užít hodnoty z technických tabulek, např. publikovaných v odborné literatuře [42]. Přibližné hodnoty pohltivosti slunečního záření dle barevnosti povrchu (Tab. 26) jsou uvedeny v normě [36].

Tab. 26 Hodnoty sluneční pohltivosti venkovních neprůsvitných konstrukcí [36]

| Barva                     | světlá | střední | tmavá |
|---------------------------|--------|---------|-------|
| $\alpha_{\text{sol}} [-]$ | 0,3    | 0,6     | 0,9   |

#### Část 7: Součinitelé přestupu tepla

Má-li konstrukce odlišnou teplotu než okolní vzduch, pak se v blízkosti povrchu konstrukce vyskytuje tenká vrstva vzduchu, jejíž teplota je ovlivňována teplotou přilehlé konstrukce. Tloušťka této mezní vrstvy  $\delta_T$  zasahuje do vzdálenosti, kde je dosaženo 99% vyrovnání teplot. Při nuceném proudění vzduchu podél konstrukce ulpívá při povrchu vlivem třecích sil vrstva vzduchu tloušťky  $\delta$ , kde dochází k deformaci rychlostního pole (Obr. 78). Zde opět platí pravidlo pro určení tloušťky mezní vrstvy zasahující do vzdálen-



Obr. 78 Rychlostní mezní vrstva při povrchu konstrukce: a) oslabení rychlostního profilu v tloušťce mezní vrstvy; b) průběh mezní vrstvy po délce z laminárního na turbulentní proudění v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla [40]

nosti 99% dosažení rychlosti proudění v přilehlém prostředí. Obecně platí, že tloušťka tepelné a rychlostní mezní vrstvy se liší, jejich vzájemný poměr udává, zda se při povrchu konstrukce šíří teplo primárně vedením či prouděním. [40]

#### Součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce

Na vnější straně střešní konstrukce dochází ke smíšenému proudění vlivem větru a vlivem rozdílu teploty krytiny a venkovního vzduchu. V této oblasti může docházet k laminárnímu i turbulentnímu proudění. Přibližnou tloušťku mezní vrstvy  $\delta$  [44] lze vyjádřit vztahem:

$$\delta = \frac{4,92 \cdot L}{\sqrt{Re_L}} \quad (113)$$

kde  $L$  je délka střechy od okapu ke hřebeni [m] a  $Re_L$  je Reynoldsovo číslo [-].

Součinitel přestupu tepla je proměnlivá veličina, jejíž okamžitá hodnota je závislá na rychlosti proudění vzduchu při povrchu konstrukce, dále pak je ovlivněna rozdílem teploty povrchu a vzduchu, tvarem a nerovnostmi povrchu, rozměrem konstrukce a je-li konstrukce na návětrné či závětrné straně. Jeho výpočet [57] lze provést na základě znalosti Nusseltova čísla, jež je funkcí Reynoldsova a Prandtlova čísla.

$$h_{se} = \frac{Nu_{L,e} \cdot \lambda}{L} \quad (114)$$

kde  $Nu_{L,e}$  je Nusseltovo číslo [-] vnějšího povrchu pro charakteristickou délku konstrukce  $L$  [m] a  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti vzduchu [ $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ]. Pro získání Nusseltova čísla existuje mnoho korelačních vztahů. V případě proudění vzduchu při vnějším povrchu střešního pláště [44] se jeví jako nejvhodnější použití následujícího vztahu:

$$Nu_{L,e} = f(Re_L, Pr) = 0,036 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (115)$$

Prandtlovo číslo  $Pr$  pro vzduch se pohybuje okolo hodnoty 0,71 v závislosti na teplotě vzduchu. Reynoldsovo číslo  $Re_L$  určuje, zda bude proudění laminární či turbulentní, jeho výpočet se provádí dle vztahu [44]:

$$Re_L = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (116)$$

kde  $u$  je rychlost větru [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] a  $\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Přechod z laminárního na turbulentní proudění nastává, v případě proudění podél povrchu konstrukce ve venkovním prostředí, okolo hodnot  $Re \approx 10^5$ .

Smith ve své práci uvedl, že pro rychlost okolního větru do  $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je součinitel přestupu tepla výhradně funkcí teplotního rozdílu mezi teplotou povrchu a teplotou okolního vzduchu. Pro rychlosti větru větší než  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je hodnota součinitele přestupu tepla primárně závislá na rychlosti větru. [67]

#### Součinitel přestupu tepla ve větrané vzduchové dutině

Ve větrané vzduchové vrstvě vymezené dvěma paralelními pláštěmi dochází především k přirozenému proudění, průběh větrání není okolním větrem příliš ovlivněn. Horní střešní plášť je po celé své délce rovnoměrně nahříván slunečním zářením, proto je pro získání součinitele přestupu tepla  $h_{cav}$  [44] nutné zvolit výpočetní postup jako pro tepelný výměník s deskou s rovnoměrnou hustotou tepelného toku.

$$h_{cav} = \frac{Nu_{L,cav} \cdot \lambda}{L} \quad (117)$$

a pro malé tloušťky větrané vzduchové vrstvy platí vztah nikoliv v závislosti na délce dutiny, ale na její tloušťce [44]:

$$h_{cav,D} = \frac{Nu_{D,cav} \cdot \lambda}{D} \quad (118)$$

kde  $Nu_{L,cav}$  je Nusseltovo číslo [-] pro charakteristickou délku konstrukce  $L$  [m],  $Nu_{D,cav}$  je Nusseltovo číslo [-] pro přirozeně větranou dutinu tloušťky  $D$  [m] a  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti vzduchu [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]. Rovněž v tomto případě existuje velmi mnoho korelačních vztahů pro Nusseltovo číslo, ať už pro získání lokální hodnoty či průměrné hodnoty pro celou desku. Nejznámějším a nejčastěji užívaným vztahem pro přirozeně větrané dutiny ve spádu je globální korelační vztah od Azevedo a Sparrow (119) [16], který je vytvořen pro všechny varianty vyhřívání dutiny – horním povrchem, spodním povrchem a oběma

povrchy. Dalším často užívaným vztahem je korelační vztah též od Azevedo a Sparrow [16], ale pouze pro horní vyhřívaný povrch (120).

$$Nu_D = 0,645[(D/H)Ra_D]^{0,25} \quad (119)$$

$$Nu_D = 0,644[(D/H)Ra_D \cos \theta]^{0,25} \quad (120)$$

K často používaným vztahům, vhodným pro větraný střešní plášť patří i vztahy od Vliet a Liu [44]. Ty rozlišují mezi způsobem proudění v dutině, a to pro laminární proudění, tj.  $Ra_{*y} < 10^{13}$

$$\overline{Nu}_y = 0,75 Ra_{*y}^{1/5} \quad (121)$$

a pro turbulentní proudění v dutině, tj.  $Ra_{*y} > 10^{13}$

$$\overline{Nu}_y = 0,645 Ra_{*y}^{0,22} \quad (122)$$

Postup výpočtu Rayleighova čísla je podrobně popsán v kapitole 4.4.2.  $\overline{Nu}_y$  je průměrné Nusseltovo číslo pro celou plochu konstrukce.

Pro přímý výpočet v rozhraní simulačního softwaru lze využít vztahu pro lokální Nusseltovo číslo

$$Nu_D = \frac{q'' \cdot D}{(T - T_\infty) \cdot \lambda} \quad (123)$$

a následně integrací obdržet průměrné Nusseltovo číslo

$$\overline{Nu}_D = \frac{1}{H'} \int_{H_1}^{H_2} Nu_D(x) dx \quad (124)$$

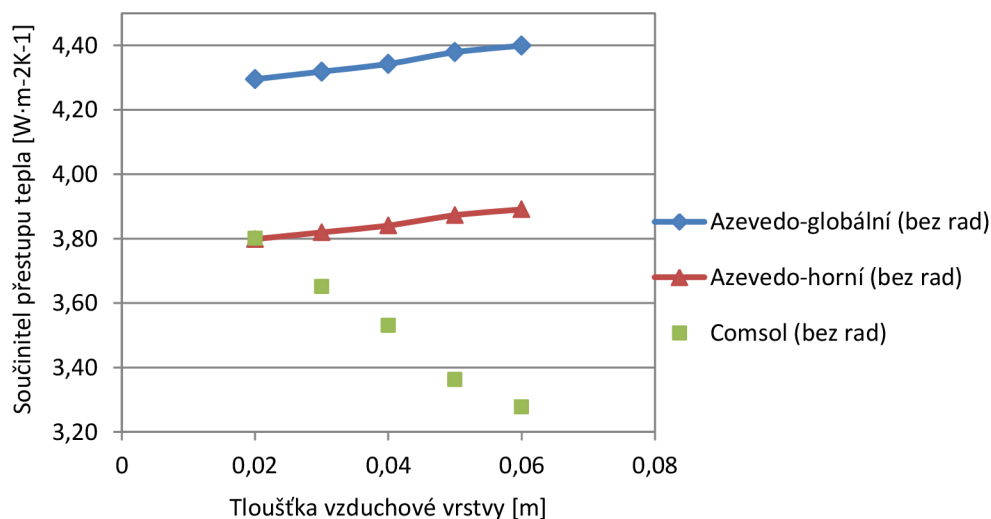
Na modelu větraného střešního pláště popsaného v kapitole 4.6.1 byly sledovány hodnoty součinitele přestupu tepla ve větrané vzduchové vrstvě na horním i spodním povrchu pro různé dimenze dutiny. Primárně tato data sloužila validaci modelu, zde slouží pro ilustraci, jakých hodnot dosahuje součinitel přestupu tepla v dutině – na horním a spodním povrchu dutiny různými metodami přesného výpočtu. Krytina je vyhřívaná, tepelný tok je tedy shora dolů. Tyto hodnoty byly získány výpočtem (118) z Nusseltova



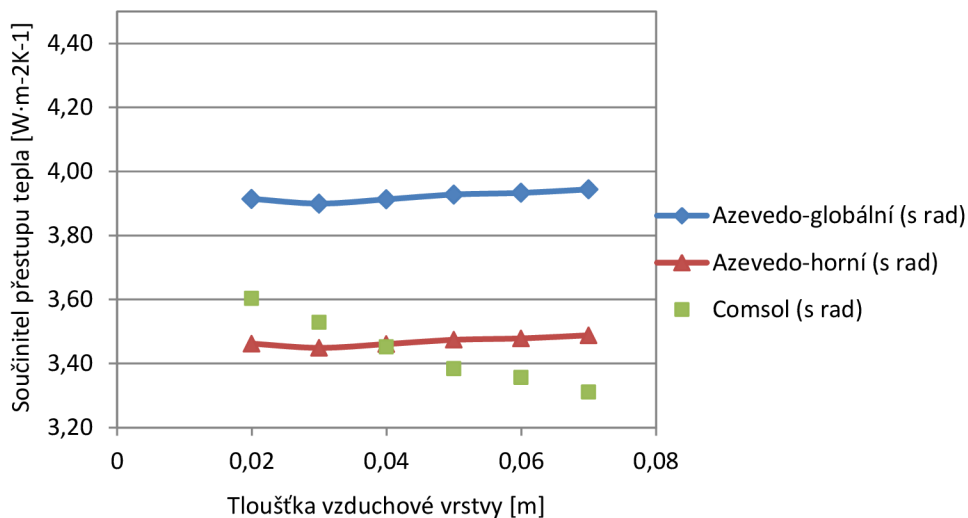
čísla závislém na tloušťce vzduchové vrstvy. Bylo použito korelačních vztahů Azeveda a Sparrowa (119) a (120) a také přímého výpočtu v programu Comsol (124). Přehled výsledků je uveden v Tab. 27. Grafické znázornění uvádí Obr. 79, Obr. 80 a Obr. 81.

Tab. 27 Hodnoty Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla pro model větraného střešního pláště definovaného v kapitole 4.6.1

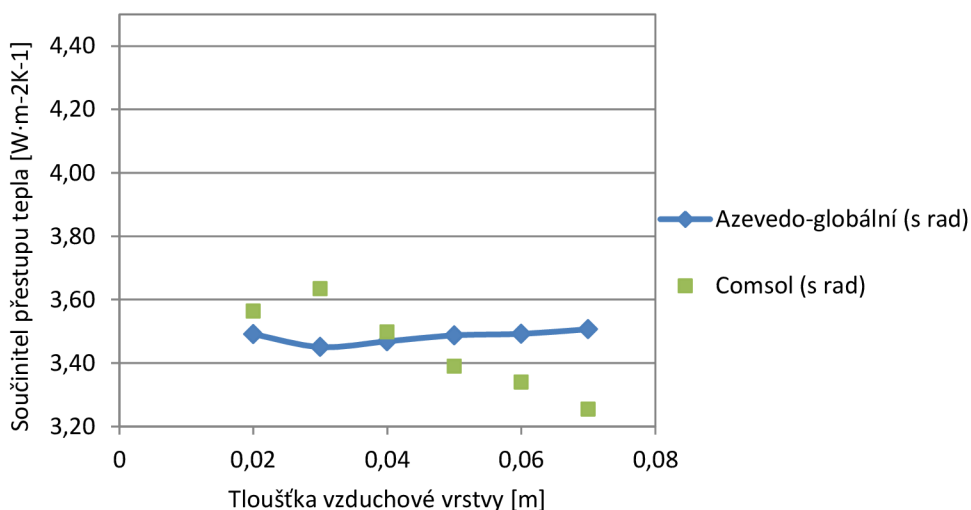
| Tloušťka vzduchové vrstvy   | Azevedo & Sparrow korelace pro horní povrch |                    | Azevedo & Sparrow globální korelace |                    |                     |                    | CFD simulace        |                    |                     |                    |
|---|---|--------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
|   |   |                    | horní povrch                        |                    | spodní povrch       |                    | horní povrch        |                    | spodní povrch       |                    |
|   | Nu <sub>D,cav</sub>                         | h <sub>cav,D</sub> | Nu <sub>D,cav</sub>                 | h <sub>cav,D</sub> | Nu <sub>D,cav</sub> | h <sub>cav,D</sub> | Nu <sub>D,cav</sub> | h <sub>cav,D</sub> | Nu <sub>D,cav</sub> | h <sub>cav,D</sub> |
| nízká emisivita povrchů v dutině (bez vlivu radiační složky)      |   |                    |                                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |
| 2 cm  | 2,88  | 3,80               | 3,25                                | 4,30               |                     |                    | 2,88                | 3,80               |                     |                    |
| 3 cm  | 4,34  | 3,82               | 4,91                                | 4,32               |                     |                    | 4,15                | 3,65               |                     |                    |
| 4 cm  | 5,82  | 3,84               | 6,58                                | 4,34               |                     |                    | 5,35                | 3,53               |                     |                    |
| 5 cm  | 7,34  | 3,87               | 8,29                                | 4,38               |                     |                    | 6,37                | 3,36               |                     |                    |
| 6 cm  | 8,84  | 3,89               | 10,00                               | 4,40               |                     |                    | 7,45                | 3,28               |                     |                    |
| emisivita povrchů v dutině $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ |   |                    |                                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |
| 2 cm  | 2,62  | 3,46               | 2,97                                | 3,91               | 2,64                | 3,49               | 2,73                | 3,60               | 2,70                | 3,56               |
| 3 cm  | 3,92  | 3,45               | 4,43                                | 3,90               | 3,92                | 3,45               | 4,01                | 3,53               | 4,13                | 3,63               |
| 4 cm  | 5,24  | 3,46               | 5,93                                | 3,91               | 5,26                | 3,47               | 5,23                | 3,45               | 5,30                | 3,50               |
| 5 cm  | 6,58  | 3,47               | 7,44                                | 3,93               | 6,61                | 3,49               | 6,41                | 3,38               | 6,42                | 3,39               |
| 6 cm  | 7,91  | 3,48               | 8,94                                | 3,93               | 7,94                | 3,49               | 7,63                | 3,36               | 7,59                | 3,34               |
| 7 cm  | 9,25  | 3,49               | 10,46                               | 3,94               | 9,30                | 3,51               | 8,78                | 3,31               | 8,63                | 3,25               |



Obr. 79 Součinitel přestupu tepla pro horní plášť – nízká emisivita povrchů v dutině



Obr. 80 Součinitel přestupu tepla pro horní plášť – emisivita povrchů v dutině  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$



Obr. 81 Součinitel přestupu tepla pro spodní plášť – emisivita povrchů v dutině  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$

Součinitel přestupu tepla ve větrané dutině se u podrobných výpočtů nezadává, ale je počítán programem automaticky. U dynamických simulací je vyžadováno zadání součinitele přestupu tepla. Některé programy k větrané vrstvě přistupují jako k exteriéru, jiné ji jistým způsobem zohledňují. Nejběžnější je využití normových hodnot, také je nutné dodat, že tabulkové hodnoty (Tab. 28) jsou odvozeny pro rozdíl teplot 10 K. V rámci některých programů je možné využít jednoduchého doplňkového výpočtu. Nejpřesnější

variantou je provedení vlastního doplňujícího výpočtu dle korelačních vztahů, např. viz diagram na Obr. 82.

### **Článek 1: Automatický výpočet v rámci SW**

Pokud je prováděn výpočet proudění ve vzduchové vrstvě pomocí programu využívajícího metody konečných prvků, pak není třeba zadávat součinitel přestupu tepla na povrchích v dutině. Program si jej dopočítá sám dle vztahů, na jejichž principech funguje. Tato metoda je nejpřesnější a lze si vygenerovat lokální hodnoty součinitele přestupu tepla v jakémkoliv místě konstrukce.

### **Článek 2: Vlastní výpočet**

V počítačových programech, kde je potřeba zadat součinitel přestupu tepla, je nejpřesnější variantou provedení vlastního doplňkového výpočtu. K tomu účelu se používají korelační vztahy zmíněné v této práci, nebo uvedené v literatuře [44].

### **Článek 3: Integrovaný výpočet v rámci SW**

Součástí některých výpočetních softwarů bývá k dispozici pomocný výpočet pro součinitel přestupu tepla, a to v závislosti na rychlosti proudění okolního vzduchu.

### **Článek 4: Dle technických norem**

Pro účely tepelně technických výpočtů jsou v normě ČSN 73 0540-3 stanoveny návrhové hodnoty odporu při přestupu tepla (Tab. 28), jež v sobě zahrnují již složku přestupu prouděním  $h_c$  a sáláním  $h_r$  (125). [68] Hodnoty jsou kategorizovány dle směru tepelného toku, ročního období, a zda-li se jedná o vnitřní nebo vnější povrch konstrukce. Ve větraných vzduchových vrstvách je uvažován odpor při přestupu tepla shodný s odporem na vnitřní straně konstrukce. [32]

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (125)$$

Zatímco v českých odborných textech a normách se vyskytuje zejména souhrnný odpor při přestupu tepla  $R_s$  v  $\text{m}^2\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  (125), v zahraniční literatuře je užíváno výhradně

součinitele přestupu tepla prouděním  $h_c$  ve  $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ , který přímo charakterizuje přestup tepla v přechodových vrstvách na rozhraní konstrukce a vzduchu, popsanych výše v této kapitole. Přestup tepla sáláním se řeší samostatným výpočtem, kterému je více věnováno v kapitole 4.2.

Původní evropská norma EN ISO 13791 uváděla výpočtové hodnoty součinitele přestupu tepla prouděním, viz Tab. 28. Hodnotu pro exteriérový povrch bylo doporučeno získat následujícím výpočtem [36]:

$$h_{c,e} = 4 + 4 \cdot v \quad (126)$$

kde  $v$  je rychlost proudění vzduchu poblíž hodnocené konstrukce a závisí na klimatických datech dané lokality. Nejsou-li žádaná data k dispozici, doporučuje se použít rychlost vzduchu  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu byl rovněž v této normě dán směrem tepelného toku, hodnoty jsou zachovány i dle nové metodiky [37]. Hodnoty jsou dány pro teplotu v interiéru  $20^\circ\text{C}$  a v exteriéru  $10^\circ\text{C}$ .

Tab. 28 Hodnoty přestupových součinitelů v letním období dle normy ČSN 73 0540-3, EN ISO 13791, ČSN EN ISO 13792 a ČSN EN ISO 13789.

| Směr     |   | ČSN 73 0540-3<br>$1/R_{si}, 1/R_{se}$<br>[ $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ ] | ČSN EN ISO 13972<br>$h_i, h_e$ [ $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ ] | ČSN EN ISO 13971<br>$h_{ci}, h_{ce}$ [ $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ ] | ČSN EN ISO 13789<br>$h_{ci}, h_{ce}$ [ $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ ] |
|----------|---|---|---|---|---|
| interiér | → | 7,7   | 8,0   | 2,5   | 2,5   |
|          | ↑ | 10,0  |   | 5,0   | 5,0   |
|          | ↓ | 5,9   |   | 0,7   | 0,7   |
| exteriér |   | 25,0  | 13,5  | 8,0 ( $v=1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )                     | 20 ( $v=4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )                      |

V evropské normě ČSN EN ISO 13792 bylo uvedeno, že pro proudění ve větrané vzduchové vrstvě se užívá součinitel přestupu tepla prouděním  $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

### Část 8: Typ proudění

Pro některé úlohy jsou vyžadovány doplňující výpočty před samotným zadáním hlavního výpočtu. Tak je tomu například u podrobného výpočtu větrané vzduchové vrstvy, kdy je

nutné definovat jaký druh proudění je zde očekáván. Následně je tomuto rozhodnutí uzpůsoben výběr vzorců, podle kterých bude hlavní výpočet veden. Charakter proudění ve vzduchové vrstvě vymezené dvěma paralelními deskovými plášti závisí na několika parametrech, které následně určí, zda bude ve vzduchové vrstvě docházet k laminárnímu či turbulentnímu proudění. Hlavním parametrem, který nejvýrazněji ovlivňuje typ proudění, je délka vzduchové vrstvy  $y$ . Dalšími parametry, ovlivňujícími proudění, ale již ne tak významně, jsou hustota tepelného toku  $q''$ , kterým je ohříván vzduch v dutině a sklon vzduchové vrstvy od svislice  $\phi$ . U přirozeného neboli volného proudění je přechod z laminárního na turbulentní charakter lokalizován třemi bezrozměrnými veličinami: Rayleighovým číslem, Prandtlovým číslem a Grashofovým číslem. Tohoto postupu nelze užít u nuceného či kombinovaného proudění, které se vyskytuje na venkovním povrchu střešního pláště, musí být přistoupeno k řešení pomocí Reynoldsova a Prandtlova čísla.

V případě konstantní teploty roviny nastává přechod z laminárního na turbulentní proudění okolo hodnoty Grashofova čísla  $10^9$  [44], které je podílem Rayleighova a Prandtlova čísla.

$$Ra_y = Gr_y \cdot Pr \quad (127)$$

$$Gr_y \sim 10^9 \quad (128)$$

V případě větraných střešních pláštů je však potřeba přistoupit k jiné podmínce. Protože se jedná o případ proudění podél desky s rovnoměrnou hustotou tepelného toku, nikoliv konstantní teplotou povrchu, nastává přechod z laminárního na turbulentní proudění okolo hodnoty Rayleighova čísla  $10^{13}$  [44].

$$Ra_{*y} \sim 10^{13} \quad (129)$$

Prandtlovo číslo je podobnostní číslo, které vyjadřuje vlastnosti proudících tekutin. Udává poměr viskozity a rychlosti přenosu tepla vedením tekutinou (130) [40]. Tekutiny s  $Pr \ll 1$  jsou takové, u nichž je přenos tepla vedením efektivnější než prouděním, jsou to například kovy v tekutém skupenství. Naopak je tomu u tekutin s  $Pr \gg 1$ , kde je významnější přenos tepla prouděním než vedením, například motorový olej. Pro vzduch

se hodnoty pohybují v závislosti na jeho teplotě okolo hodnoty 0,71 a přenos tepla oběma zmíněnými způsoby je v rovnováze.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{\lambda/(c_p \cdot \rho)} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (130)$$

kde  $\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ],  $\alpha$  je součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ],  $\mu$  je dynamická viskozita [ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $\rho$  je hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $c_p$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] a  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ].

Nusseltovo číslo udává poměr přenosu tepla prouděním a vedením v mezní vrstvě [44]. Na základě empirických znalostí byly vytvořeny korelace Nusseltova čísla pro jednotlivé typy a případy proudění, aby pak následně bylo možné dopočítat součinitel přestupu tepla. Průběh Nusseltova čísla není pro konstrukci konstantní, ale vyvíjí po délce. S rostoucí vzdáleností od počátku po směru proudění má Nusseltovo číslo rostoucí charakter. To samé platí i pro Rayleighovo číslo. Pro zjednodušení výpočtů se užívá především průměrná hodnota  $\overline{Nu}$ . Blíže se této problematice věnuje kapitola 4.4.

$$\frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h\Delta T}{\frac{\lambda}{L}\Delta T} = \frac{h \cdot L}{\lambda} = Nu \quad (131)$$

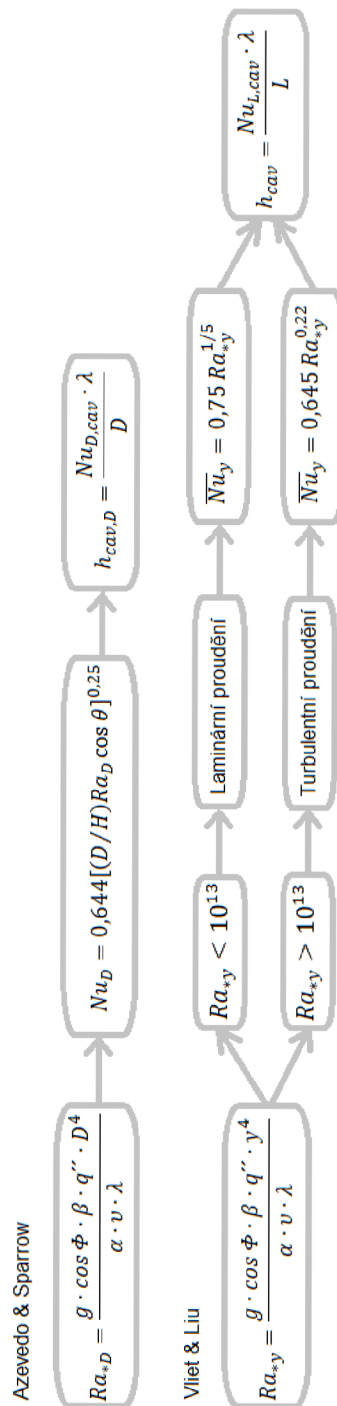
odtud

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (132)$$

kde  $L$  je charakteristická délka [m].

### *Část 9: Vřazené odpory, spáry horního pláště*

V dynamické simulaci místnosti existuje možnost zadat umístění větrací mřížky, a to procentem otevřené plochy. Stejným způsobem lze aplikovat i u MKP. Laťování lze pouze zadat v modelování překážek v dutině (MKP). Spáry v krytině lze uvažovat zadáním hodnoty propustnosti horního pláště, pouze u některých programů MKP, v dynamické simulaci se tato možnost nenabízí.



Obr. 82 Diagram výpočetního postupu pro stanovení součinitele přestupu tepla ve větrané vzduchové vrstvě, kde probíhá přirozené proudění



#### 5.4 Návrh detailu hřebene podporující proudění vzduchu v dutině – „hřebenová větrací tvarovka“

Na základě simulací a měření provedených v rámci této disertační práce, byla hodnocena jednotlivá konstrukční opatření doporučovaná pro podporu pasivního chlazení podkroví, jež byla aplikována na lehký šikmý střešní plášť. Jak výsledky ukazují, větraná vzduchová dutina mezi horním a dolním pláštěm je dobrou alternativou a může přinést znatelné snížení teploty na vnitřním líci střešního pláště, tedy i teploty vzduchu v interiéru, viz kapitola 5.2.3. To však platí za předpokladu, že bude vzduch v dutině proudit, a tím z dutiny unášet přebytečné tepelné zisky. Současné řešení detailu hřebene (Obr. 86, Obr. 88), neumožňuje odvádění teplého vzduchu, které se hromadí pod krytinou. Třemi hlavními typy hřebenových větracích pásů jsou: plastový pás s kartáčem (Obr. 83); celohliníkový pás s perforací (Obr. 84) a hliníkový pás s integrovanou tkaninou (Obr. 85). Ani jeden z těchto tří typů pásů nezabezpečí dostatečné odvětrání v oblasti hřebene. Ačkoliv plocha střešní roviny tvořená skládanou krytinou není těsná, spáry nejsou natolik široké, aby umožnily dostatečný pohyb vzduchu. Pro tyto účely se vsazují do střešní plochy větrací tašky, které také neumožní dostatečné odvětrání. V normě [29] je uvedeno doporučení pro velikost plochy přiváděcích a odváděcích otvorů v závislosti na ploše střechy a jejím sklonu, potažmo délce střešní roviny. Toto doporučení není dosažitelné běžným konstrukčním řešením oblasti hřebene, tj. aplikací hřebenového větracího pásu a hřebenáčů. Současně se opomíjí normové doporučení na navýšení plochy větracích otvorů v odváděcí části o 10 % oproti přiváděcím otvorům. Současné typy hřebenových větracích pásů mají malé procento otevřené plochy a napojení hřebenáčů na krytinu pomocí lemování je příliš těsné. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k návrhu nového konstrukčního řešení detailu hřebene pro šikmé dvouplášťové střechy. Byla navržena tzv. „hřebenová větrací tvarovka“, která v sobě spojuje funkci krycí i větrací.

Při návrhu hřebenové větrací tvarovky byl brán zřetel na současné řešení detailu hřebene. Cílem bylo nejen podpořit větrání, ale také aby se nový návrh co nejvíce podobal klasickému řešení tvarem i velikostí, a aby opticky nepůsobil na střeše příliš dominantně. Proto by také bylo vhodné volit vždy stejné barevné provedení, jako má střešní krytina.

Mezi výhody hřebenové větrací tvarovky patří především, že:

- představuje nesrovnatelně menší odpor pro proudění vzduchu ven z dutiny;
- umožní liniové větrání po celé délce hřebene;
- spojuje více prvků do jediného výrobku;
- je aplikovatelná na stávající střešní konstrukce.

Konstrukce hřebenové větrací tvarovky (Obr. 87, Obr. 89) sestává ze stříšky zaobleného tvaru umožňující snadný odvod srážek, z bočnic tvořených větracími lamelami a lemováním pro utěsnění prostoru mezi hřebenem a krytinou. Lamely jsou na vnitřní straně opatřeny nosem bránícím odstříkující vodě vnikat do prostoru hřebene, viz detail na Obr. 89. Z vnitřní strany lamel je rovněž integrovaná síťka proti hmyzu s velkými oky a jemnou mřížkou. V podélném směru jsou lamely spojeny příčlemi pro zvýšení jejich prostorové tuhosti, viz Obr. 90. Tvarovka je uchycena k hřebenovému pásku pomocí zámečků, hřebenový pásek je vynášen krokevními držáky. Hřebenový pásek přebírá funkci hřebenové latě, jeho subtilní rozměry dovolují snazší proudění v hřebeni. Jednotlivé tvarovky jsou mezi sebou spojovány na zámek s vloženým těsněním.

Materiálové řešení tvarovky se zvažovalo v provedení z plechu i plastu. Nakonec bylo přistoupeno k variantě z plastu, zejména kvůli tepelné roztažnosti kovových prvků. Ve spodní části tvarovky je po celé její délce nakaširovaný skládaný hliníkový pás pro vytvoření přiléhajícího napojení na krytinu. Tento druh spoje umožní dostatečně těsné napojení tvarovky na střešní rovinu, které odolá pronikání srážek do větrané dutiny.

Prostor mezi jednotlivými lamelami umožňuje volný pohyb vzduchu, ale zároveň brání vniknutí ptactva, nebo např. kun. Volný prostor mezi lamelami je navržen na šířku 12 mm. Proti hmyzu je navíc tvarovka opatřena sítkou s velikostí ok 4 mm. Současně lamely chrání mezistřešní prostor proti atmosférickým srážkám, k čemuž přispívá i sklon lamel a jejich zakončení nosem, viz detail na Obr. 89. Je rovněž uvažováno se ztužením lamel pomocí příčel po vzdálenosti 20 cm (Obr. 91). Každá druhá příčel navazuje na ztužidlo stříšky (Obr. 91) pro zajištění větší prostorové tuhosti. Středem stříšky se táhne po celé její délce z vnitřní strany břit, který je vždy v místě ztužidla stříšky opatřen integrovaným kovovým zámečkem. Pomocí zámečků se tvarovka nacvakává do hřebenového pásku.

Tvarovka je navržena o délce jeden metr, aby se s ní pohodlně manipulovalo v jedné osobě. Je možné ji zkrátit na potřebnou délku zaříznutím. Ukončení hřebene ve štítech se bude řešit systémovým prvkem – zátkou.

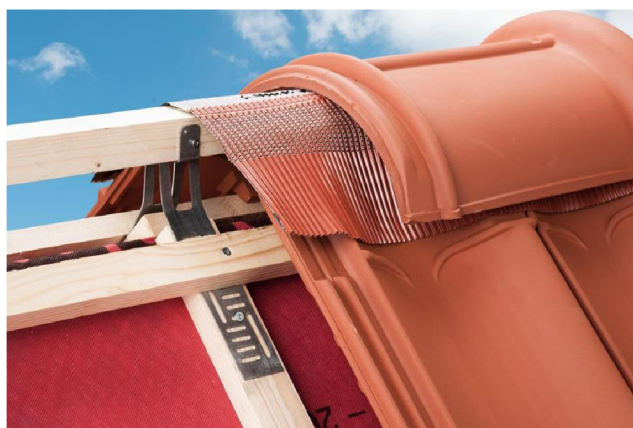
Je uvažováno s více variantami barevného provedení pro možnost barevného sladění s krytinou. Mělo by se vyrábět minimálně ve třech barvách – světle červená, tmavě červená a černá.

Navrhovaná hřebenová větrací tvarovka poskytuje dostatečně velké otvory pro umožnění volného výdechu teplého vzduchu z prostoru pod rozehřátou střešní krytinou. Rovněž hřebenová lať byla nahrazena hřebenovým páskem, pro snadnější pohyb vzduchu v oblasti hřebene. Na Obr. 89 je červenými šipkami naznačen pohyb vzduchu v dutině a dále skrze hřebenovou tvarovku ven z konstrukce. Při současném řešení hřebene, kde napojení hřebenáče na větrací pás je příliš těsné, vzduch nemůže volně opouštět vzduchovou dutinu a větrání vázne. V řezu na Obr. 88 je vyznačena červenými šipkami předpokládaná trasa proudění vzduchu, ve skutečnosti k němu dochází jen ve velmi omezené míře. Současné řešení hřebene je pravděpodobně vhodné pouze pro zajištění odvádění vlhkost ze skladby. Pokud má větraná vzduchová vrstva sloužit také pro redukcí tepelných zisků, pak je potřeba přistoupit k radikálnějšímu řešení. Hřebenová větrací tvarovka je vhodnou alternativou.

Další velkou výhodou hřebenové větrací tvarovky je její aplikovatelnost na stávající dvouplášťové střešní konstrukce. Tímto jednoduchým konstrukčním opatřením, které nevyžaduje velký zásah do střešního pláště, je možné výrazně zvýšit účinnost stávající větrané vzduchové vrstvy. Toto opatření vyniká i rychlou a snadnou proveditelností.



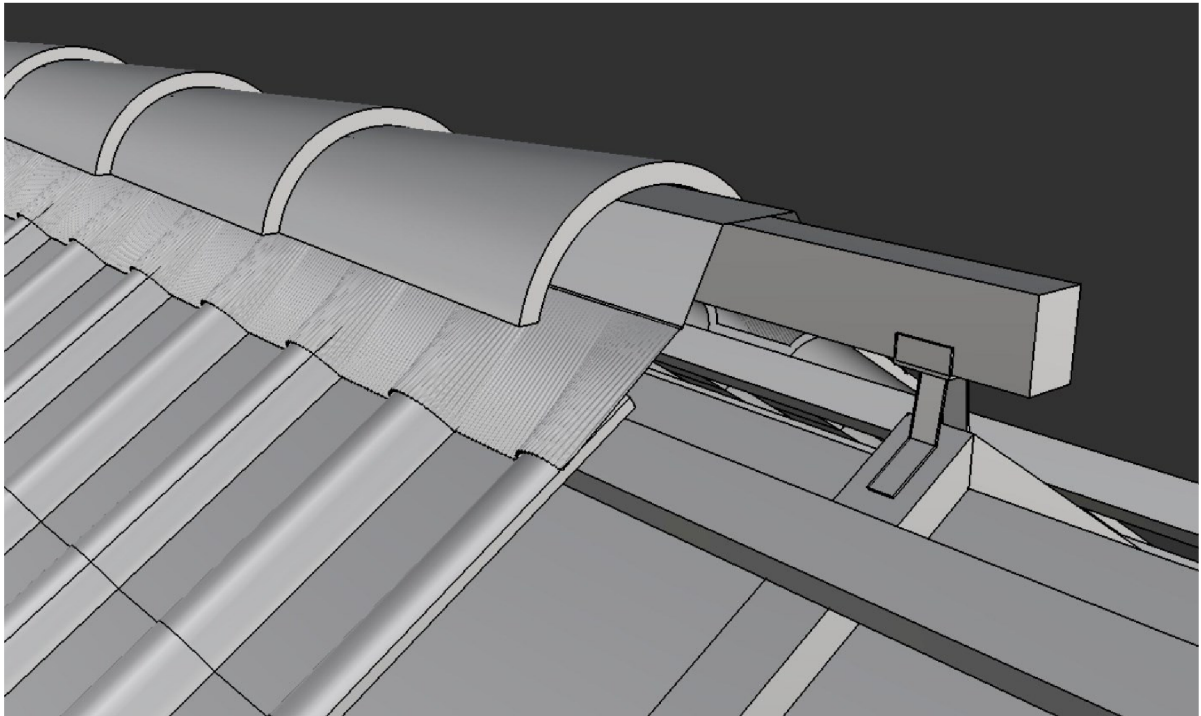
*Obr. 83 Hřebenový větrací pás s kartáčem [69]*



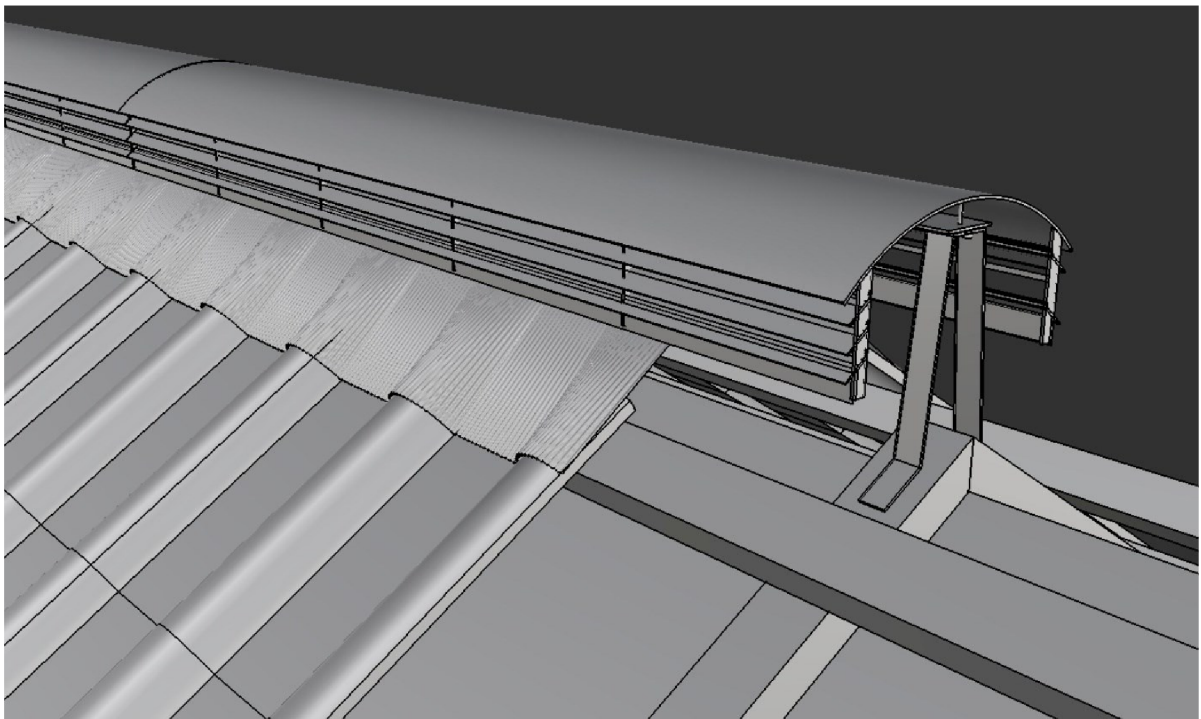
*Obr. 84 Hřebenový větrací pás celohliníkový s perforací [70]*



*Obr. 85 Hřebenový větrací pás hliníkový s integrovanou tkaninou [71]*

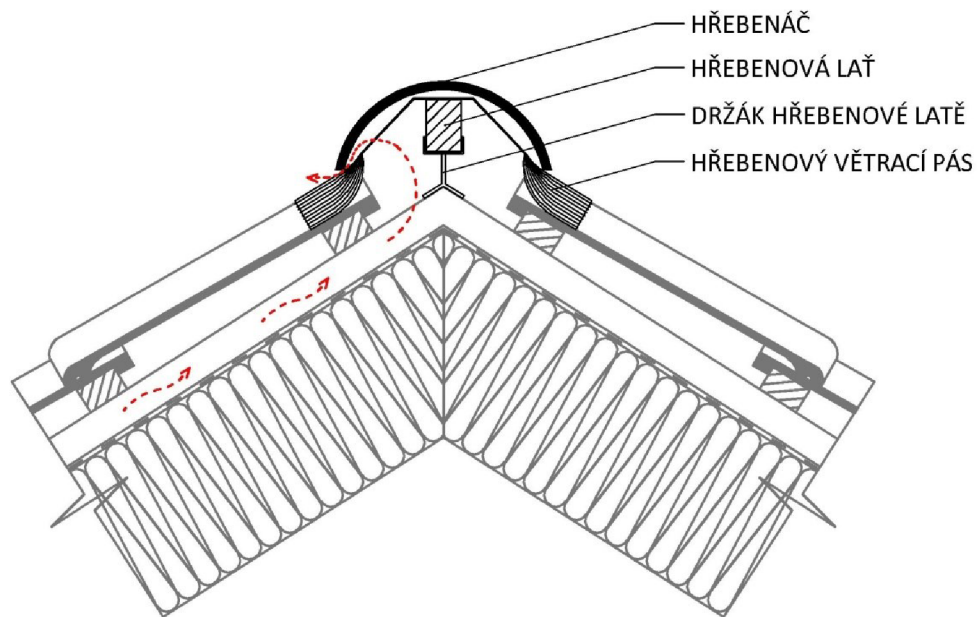


*Obr. 86 Současné řešení detailu střešního hřebene ve 3D*

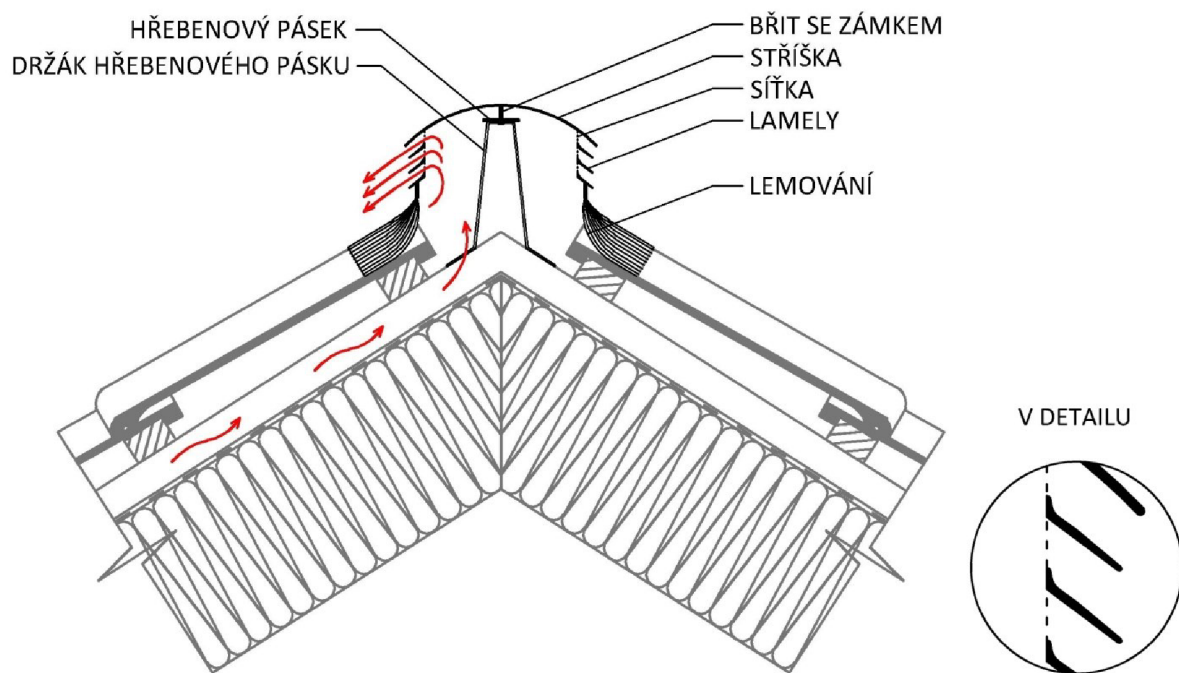


*Obr. 87 Nové řešení detailu střešního hřebene pomocí „hřebenové větrací tvarovky“ ve 3D*

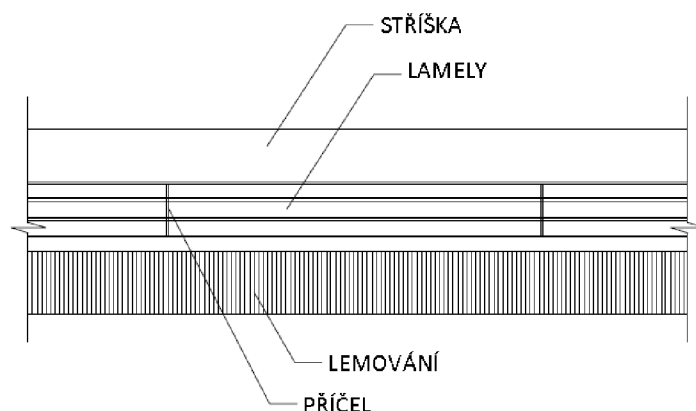




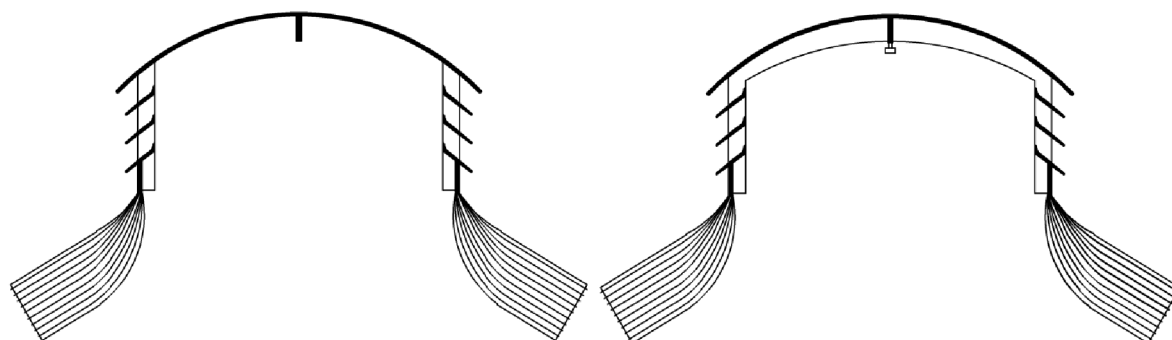
Obr. 88 Současné řešení detailu střešního hřebene



Obr. 89 Nové řešení detailu střešního hřebene pomocí „hřebenové větrací tvarovky“



Obr. 90 „Hřebenová větrací tvarovka“ – boční pohled



Obr. 91 „Hřebenová větrací tvarovka“ : vlevo řez v místě příčlí; vpravo řez v místě ztužidla stříšky

Nově navržená hřebenová větrací tvarovka nabízí systémové řešení pro oblast hřebene dvouplášťové střešní konstrukce. Je aplikovatelná na všechny typy skládané střešní krytiny. Oproti současnému řešení tohoto detailu dokáže odvádět teplý vzduch z prostoru pod krytinou. Lemování, jež je součástí tvarovky, zabezpečuje plynulost napojení na krytinu. Tělo hřebenové větrací tvarovky je o něco užší než klasický hřebenáč, protože lemování je napojeno přímo na bočnici tvarovky a její konstrukční výška je nepatrně vyšší oproti běžné variantě. Celkový tvar a rozměr nového hřebene je podobný současnému řešení detailu, tudíž jejich záměnou nedojde k estetickému narušení střešní konstrukce.



## 6 Závěr

V poslední době se přehřívání podkrovních místností stává aktuálním tématem, díky zvyšujícím se teplotám během letního období. Během posledních let padaly teplotní rekordy, co se týče maximálních teplot i délky teplého období v dnech za sebou. Naprostá většina podkrovních místností rodinných domů je zastřešena lehkým střešním pláštěm, který současně tvoří významnou část plochy konstrukcí ohraničujících místnost. O lehkých konstrukcích je známo, že nejsou schopny po delší dobu odolávat vysokým teplotám a brzy dojde k jejich ohřátí. Z těchto důvodů bylo zvoleno ústředním tématem této disertační práce **detaillní zkoumání šíření tepla ve střešním plášti** a ve větrané vzduchové dutině, a to na pláštích splňujících hodnotu součinitele prostupu tepla doporučenou **pro pasivní budovy**.

### 6.1 Materiálové řešení a konstrukční opatření

Byly provedeny studie pro **vyhodnocení míry vlivu doporučovaných konstrukčních opatření pro snížení tepelných zisků střešním pláštěm**. Těmi jsou zejména:

- barva a povrchové vlastnosti krytiny;
- tepelná akumulace střešního pláště (tepelné izolace a podhledu);
- reflexní povrchy;
- větraná vzduchová vrstva.

Na základě těchto studií bylo provedeno **vyhodnocení, jakou měrou jsou daná opatření schopna redukovat tepelné zisky**. Vliv každého opatření byl zkoumán samostatně, proto tedy první tři zmíněné možnosti (barva krytiny, tepelná akumulace a reflexní povrchy) byly podrobeny zkoumání na nevětraném střešním plášti. Větrané vzduchové vrstvě bylo věnováno více prostoru kvůli obsáhlosti problematiky a byla hodnocena samostatně. Velmi významným faktorem je barva krytiny, volbou světlého povrchu krytiny lze významně snížit tepelné zisky střešním pláštěm. Rovněž navýšení tepelné kapacity střešního pláště zdatelně napomáhá redukci tepelných zisků. Přičemž není nutné vkládat do skladby samostatnou tepelně akumulaci vrstvu, ale postačí obměnit materiálové řešení tepelného izolantu a stropního podhledu. Navýšení tepelné

kapacity střešního pláště se také pozitivně projeví snížením kolísání teploty mezi dnem a nocí na líci stropního podhledu. Naproti tomu aplikace reflexních povrchů v dutině nepřináší redukci tepelných zisků, respektive má zanedbatelný vliv.

## 6.2 Proudění vzduchu v dutině

Podrobnějšímu zkoumání byla podrobena větraná vzduchová vrstva, kde **bylo sledováno teplotní a rychlostní pole a vyčísleny součinitelé přestupu tepla** pro různé dimenze dutiny. Dále **byl sledován vliv reflexních povrchů** na charakter proudění v dutině a **byla vyhodnocena účinnost větrané vzduchové vrstvy** s reflexními povrchy a bez nich. Bylo zjištěno, že pokud jsou v dutině povrchy s vysokou emisivitou (klasické materiály), pak se významná část tepla šíří sáláním z horního pláště na spodní, čímž mají oba povrchy poměrně vysokou teplotu. Podél těchto povrchů nastává přirozené proudění a teplo je oběma proudy unášeno z dutiny. Pokud jsou v dutině povrchy nízkoemisivní (s vysokou odrazivostí), pak je sálavá složka minimalizována a teplo se nepřenáší na spodní plášť radiací. To zapříčiní vyšší teplotu horního pláště oproti předchozí variantě a spodní plášť má přibližně teplotu okolního prostředí. Teplo z horního pláště je opět odnášeno přirozeným prouděním ven z dutiny. V obou případech, u klasických i reflexních povrchů, je větranou dutinou odneseno přibližně stejné množství tepla.

Provedením **celkové energetické bilance** podkrovní místnosti byly porovnány dvě varianty střešního pláště – jednoplášťová konstrukce a větraná dvouplášťová konstrukce. **Vliv větrané vzduchové vrstvy je jednoznačně pozitivní a má významný vliv na redukci tepelných zisků.**

Následně byl obecně diskutován vliv krycích mřížek na proudění. Byl vysledován jistý nepoměr mezi otevřenou plochou mřížek a tlakovým spádem. Proto **byl dále zkoumán vliv tvaru otvorů a jiných parametrů mřížky na proudění.**

## 6.3 Metodika výpočtu

Během zpracovávání problematiky šíření tepla a proudění ve střešních pláštích, bylo shromážděno mnoho informací z různých zdrojů, které nejsou nikde uceleně publikovány

v samostatné publikaci. Proto byla zařazena samostatná kapitola, kde jsou tyto poznatky uspořádány do manuálu pro výpočet – **standard metodiky přesného výpočtu**. Ten může sloužit studentům, doktorandům či odborné veřejnosti pro snadnou a rychlou orientaci v dané problematice. Jsou zde diskutovány parametry a veličiny vstupující do výpočtů, a to v závislosti na přesnosti výpočtu. Především je zde věnována pozornost problematice součinitele přestupu tepla a porovnáno několik způsobů jeho výpočtu. Poměrně velkou neznámou ve výpočtech bývá hodnota zdánlivé teploty oblohy, proto v této práci byla pozornost soustředěna i na ni. Je zde uvedeno, na jakých parametrech závisí, a také je prezentováno několik korelačních vztahů pro její výpočet.

#### 6.4 Návrh nového konstrukčního opatření

Stěžejním cílem bylo **nalezení dalšího konstrukčního řešení pro snižování tepelných zisků**. Toto opatření mělo vycházet z „typické střešní skladby“, tak aby záměnou či doplněním nějakého materiálu, nebo konstrukčního prvku, byla zvýšena schopnost střešního pláště redukovat tepelné zisky. Zároveň toto opatření nemělo být finančně příliš náročné, tak aby bylo dostupné pro širokou veřejnost. Výpočty dokazují, že větraná vzduchová vrstva má vysoký potenciál odvést značné množství tepla z prostoru pod krytinou. K tomuto předpokladu může dojít pouze tehdy, je-li dutina mezi horním a spodním pláštěm dostatečně větraná. Současné standardní řešení detailu hřebene za využití větracího pásu hřebene a hřebenáčů neposkytuje dostatečnou výměnu vzduchu, a teplo se hromadí pod krytinou a prostupuje dále do konstrukce. Na základě poznatků získaných z dílčích studií, jež jsou součástí této práce, bylo navrženo **inovativní řešení oblasti hřebene dvouplášťové střechy**. Navržená „**hřebenová větrací tvarovka**“ významně zvýší proudění v dutině a umožní liniové odvádění teplého vzduchu v oblasti hřebene. Tento způsob spojuje plnohodnotné systémové řešení oblasti hřebene a vyřešení problému s nedostatečným odvětráním vzduchové vrstvy.

Závěrem lze říct, že byly splněny všechny cíle vytyčené na začátku práce. Během řešení hlavních témat se zároveň objevila i jiná zajímavá témata, týkající se dané problematiky, ale na jejichž zpracování už v této práci nebyl prostor. Proto je jim věnována alespoň následující závěrečná kapitola.

## 7 Přínosy a možnosti dalšího výzkumu

Přehřívání podkrovních místností v letním období je téma, ke kterému se odborná i laická veřejnost vrací opakovaně každou sezónu. Tendence posledních let ukazuje na postupné zvyšování teplot a prodlužování dílčích teplých období. Běžné stavební řešení podkrovních místností rodinných a bytových domů využívá konstrukci lehkého střešního pláště. Je obecně známo, že budovy s lehkým obvodovým pláštěm se potýkají s požadavky na tepelnou stabilitu. Jedním z hlavních přínosů této práce pro praxi je nalezení vhodného konstrukčního opatření, vedoucího k redukci tepelných zisků. Odvětráním oblasti hřebene vede k řádnému větrání vzduchové dutiny a tepelné zisky postupující od krytiny směrem do interiéru mohou být z velké části odvedeny prouděním. Dalším přínosem pro praxi je provedená analýza jednotlivých variant konstrukčních opatření doporučovaných pro redukci tepelných zisků. Na základě dílčích výsledků uvedených v této práci potenciální stavebník vidí, jaký vliv mohou mít doporučované opatření na budovu a může se tak snadněji rozhodnout, jestli některé z nich aplikuje na své stavbě. Zároveň tato práce může posloužit projektantům k podrobnějšímu seznámení se s problematikou přehřívání podkrovních místností. Následně toto mohou zohlednit ve svých návrzích, tak aby vznikaly budovy s kvalitnějším vnitřním prostředím a s větší tepelnou pohodou. Současně je tato práce impulzem pro techniky a vývojáře pro vývoj nových konstrukčních výrobků podporujících redukci tepelných zisků skrze střešní plášť.

Kromě přínosů pro praxi má tato práce i své přínosy pro další rozvoj vědy v tomto oboru. Jeden z nich spadá do problematiky proudění a týká se krycích mřížek větracích otvorů. Byl nalezen nepoměr mezi otevřenou plochou mřížek a tlakovým spádem. To vedlo k podrobnější analýze mřížek na základě tvaru jejich otvorů, šířky mříží, apod. Tato oblast má také potenciál pro další výzkum. V této práci je shromážděno mnoho teorie týkající se přirozeného proudění ve vzduchových vrstvách a šíření tepla ve střešních pláštích. Může tedy sloužit jako zdroj informací pro studenty, doktorandy, začínající výzkumníky či energetické specialisty, kteří se zde mohou dočíst podrobnosti o této problematice. To se stalo podnětem pro sestavení standardu metodiky přesného výpočtu šíření tepla obvodovým pláštěm. Jsou zde také uvedeny postupy, na základě kterých vybrat vhodné výpočtové vztahy.

Tato disertační práce má přínos zejména pro:

- stavebníky, kteří zvažují užití některého konstrukčního opatření pro redukcii tepelných zisků procházejících obálkou budovy – míra vlivu jednotlivých opatření;
- projektanty, pedagogy, studenty – konstrukční doporučení pro redukcii teplených zisků a zvýšení efektivity větrání vzduchové vrstvy;
- studenty, doktorandy, začínající výzkumníky, energetické specialisty, kteří mají zájem využít přesnějších metod pro výpočet šíření tepla větraným střešním pláštěm; sjednocený postup zajistí rychlou orientaci v dané problematice a je nápomocen při výběru vhodných výpočetních vztahů;
- vědce a výzkumníky – přínos v problematice šíření tepla mezi dvěma plášti.

Problematika lehkých střešních pláštů z hlediska letního období je bezesporu natolik široká, aby se našlo mnoho dalších dílčích témat k řešení. A také je zpracovávána mnoha výzkumníky po celém světě. To čím se již příliš nezabývají, je teplený odpor dolního pláště, přičemž tato hodnota výrazně ovlivňuje způsob šíření tepla pláštěm. Tato práce řešila veškeré výpočty a měření na pláštích odpovídajících doporučeným hodnotám pro nízkoenergetické a pasivní budovy, čímž se liší od ostatních prací zabývajících se též tímto tématem. Nebyl zde prostor řešit veškeré aspekty střešních pláštů a v rámci zjednodušení modelů již nebyly uvažovány. Jedná se například o **vliv spár** mezi jednotlivými střešními taškami skládané krytiny na proudění v dutině. Dalším tématem je **vliv laťování** na charakter proudění v dutině, případně návrh latí, které budou umožňovat plynulejší pohyb vzduchu. Další málo probádanou oblastí je **vliv vřazených odporů** na proudění v dutině. Toto téma bylo již otevřeno v této práci, kdy byly obecně posuzovány krycí mřížky a jejich vliv na proudící vzduch. Byla nalezena souvislost s tvarem otvorů a zbývá jejich ověření pro nízké rychlosti do  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tato témata jsou velmi přínosná a mnoho výzkumníků se jimi zatím nezabývá.

Doporučovanými tématy pro další výzkum a vývoj by mohly být:

- vliv spár ve skládané krytině na proudění vzduchu v dutině dvouplášťové střechy;
- vliv laťování na charakter proudění vzduchu v dutině;
- vliv krycích mřížek větracích otvorů na proudění vzduchu v dutině.

## Bibliografie

- [1] J. Krňanský, „Moderní konstrukce zateplení podkroví,“ v *Izolace*, 2010.
- [2] S. Lee, S. H. Park, M. S. Yeo a K. W. Kim, „An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof,“ *Building and Environment*, č. 44, pp. 1431-1439, 2009.
- [3] B. Brangeon, P. Joubert a A. Bastide, „Influence of the dynamic boundary conditions on natural convection in an asymmetrically heated channel,“ *International Journal of Thermal Sciences*, č. 95, pp. 64-72, 2015.
- [4] L. Susanti, H. Homma, H. Matsumoto, Y. Suzuki a M. Shimizu, „A laboratory experiment on natural ventilation through a roof cavity for reduction of solar heat gain,“ *Energy and Buildings*, č. 40, pp. 2196-2206, 2008.
- [5] S. Roels a M. Deurinck, „The effect of a reflective underlay on the global thermal behaviour of pitched roofs,“ *Building and Environment*, č. 46, pp. 134-143, 2011.
- [6] P. H. Biwole, M. Woloszyn a C. Pompeo, „Heat transfer in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time,“ *Energy and Buildings*, č. 40, pp. 1487-1497, 2008.
- [7] W. Puangsombut, J. Hirunlabh, J. Khedari, B. Zeghmati a M. Win, „Enhancement of natural ventilation rate and attic heat gain reduction of roof solar collector using radiant barrier,“ *Building and Environment*, č. 42, pp. 2218-2226, 2007.
- [8] C.-M. Lai, J. Y. Huang a J. S. Chiou, „Optimal spacing for double-skin roofs,“ *Building and Environment*, č. 43, pp. 1749-1754, 2008.
- [9] P.-C. Chang, C.-M. Chiang a C.-M. Lai, „Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RSB (Radiant Barrier System),“ *Energy and Buildings*, č. 40, pp. 140-147, 2008.
- [10] A. Dimoudi, A. Androutsopoulos a S. Lykoudis, „Summer performance of a ventilated

- roof component," *Energy and Buildings*, č. 38, pp. 610-617, 2006.
- [11] A. Gagliano, F. Patania, F. Nocera, A. Ferlito a A. Galesi, „Thermal performance of ventilated roofs during summer period," *Energy and Buildings*, č. 49, pp. 611-618, 2012.
- [12] J. C. DeBlois, M. M. Bilec a L. A. Schaefer, „Design and zonal building energy modeling of a roof integrated solar chimney," *Renewable Energy*, č. 52, pp. 241-250, 2013.
- [13] G. Villi, W. Pasut a M. De Carli, „CFD modelling and thermal performance analysis of a wooden ventilated roof structure," *Building Simulation*, č. 2, pp. 215-228, 2009.
- [14] S. Tong a H. Li, „An efficient model development and experimental study for the heat transfer in naturally ventilated inclined roofs," *Building and Environment*, č. 81, pp. 296-308, 2014.
- [15] C. Suárez, P. Joubert, J. Molina a F. Sánchez, „Heat transfer and mass flow correlations for ventilated facades," *Energy and Buildings*, č. 43, pp. 3696-3703, 2011.
- [16] L. Azevedo a E. Sparrow, „Natural convection in open-ended inclined channels," *Journal of Heat Transfer*, č. 107, pp. 893-901, 1985.
- [17] ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [18] Cool Roof Rating Council, [Citace: 9.4.2017] Dostupné z: <http://coolroofs.org/>.
- [19] S. Klímová, *Vliv obalových konstrukcí na teplotní stav interiérů střešních nástaveb*, disertační práce, VUT v Brně, 2007.
- [20] M. Medina, „A Comprehensive Review of Radiant Barrier Research Including Laboratory and Field Measurements," v *ASHRAE Transactions*, Chicago, 2012.
- [21] F. Miranville, A. H. Fakra, S. Guichard, J.-P. Praene a D. Bigot, „Evaluation of the



- thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from field measurements," *Energy and Buildings*, č. 48, pp. 79-90, 2012.
- [22] D. Ababsa a S. Bougoul, „Numerical Study of Natural Ventilation through a Roof Cavity for Reduction of Solar Heat gain," *Energy Procedia*, č. 18, pp. 974-978, 2012.
- [23] S. Svobodová a L. Matějka, „Maximum Temperatures of Roof Tiles during the Summer Period," *Advanced Materials Research*, č. 1041, pp. 303-306, 2014.
- [24] A. R. Gentle, J. L. Aguilar a G. B. Smith, „Optimized cool roofs: Integrating albedo and thermal emittance with R-value," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, č. 95, pp. 3207-3215, 2011.
- [25] J. Yu, L. Tian, C. Yang, X. Xu a J. Wang, „Optimum insulation thickness of residential roof with respect to solar-air degree-hours in hot summer and cold winter zone of China," *Energy and Buildings*, č. 43, pp. 2304-2313, 2011.
- [26] P. C. Tabares-Velasco a J. Srebric, „A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions," *Building and Environment*, č. 49, pp. 310-323, 2012.
- [27] A. Pasupathy a R. Velraj, „Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management," *Energy and Buildings*, č. 40, p. 193-203, 2008.
- [28] M. C. Yew, N. H. Ramli Sulong, W. T. Chong, S. C. Poh, B. C. Ang a K. H. Tan, „Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction," *Energy Conversion and Management*, č. 75, p. 241-248, 2013.
- [29] ČSN 73 1901 *Navrhování střech – Základní ustanovení*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

- [30] Ing. Karel Sedláček Ph.D., Brno. [Rozhovor]. březen 2014.
- [31] ČSN 73 0540-1 *Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [32] ČSN 73 0540-3 *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [33] ČSN 73 0540-4 *Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [34] ČSN EN ISO 13792 *Tepelné chování budov – Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení – Zjednodušené metody*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [35] ČSN EN ISO 52017-1 *Energetická náročnost budov – Citelné a latentní tepelné zatížení a vnitřní teploty – Část 1: Obecné postupy výpočtu*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [36] ČSN EN ISO 13791 *Tepelné chování budov – Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení – Základní kritéria pro validační postupy*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [37] ČSN EN ISO 13789 *Tepelné chování budov - Měrné tepelné toky prostupem tepla a větráním - Výpočtová metoda*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [38] ČSN EN ISO 13786 *Tepelné chování stavebních dílců - Dynamické tepelné charakteristiky - Výpočtové metody*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [39] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergmann a A. S. Lavine, *Foundations of heat transfer*, 6. vydání, Singapur: John Wiley & sons, 2012. ISBN 978-1-118-37957-8.

- [40] J. H. Lienhard IV a J. H. Lienhard V, *A heat transfer textbook*, 3. vydání, Cambridge, Massachusetts: Phlogiston Press, 2003. ISBN 09-7138-352-9.
- [41] M. Halahyja, *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie*, Bratislava: Alfa, 1985.
- [42] J. Vaverka, F. Mrlík a J. Chybík, *Stavební fyzika 2, Stavební tepelná technika*, Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1649-1.
- [43] prof. Josua Meyer, *University of Pretoria, Jihoafrická republika*, [Citace: 12.6.2015], „YouTube kanál: Josua Meyer“.
- [44] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, 2. vydání, New York: John Wiley & Sons, 1995. ISBN 04-7157-972-6.
- [45] Heat-Tech, [Citace: 10.12.2013]. Dostupné z: <http://heater.heat-tech.biz/>.
- [46] i.r. Thomas Jacob Haartsen, *Nijmegen, Nizozemsko*. [Rozhovor]. květen 2015.
- [47] prof. Sylvie Lorente, *Toulouse, Francie*. [Rozhovor]. listopad 2015.
- [48] A. Bar-Cohen a W. M. Rohsenow, „Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled, Parallel Plates,“ *Journal of Heat Transfer*, č. 106, pp. 116-123, 1984.
- [49] B. Morrone, A. Campo a O. Manca, „Optimum plate separation in vertical parallel-plate channels for natural convective flows: incorporation of larger spaces at the channel extremes,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, č. 40(5), p. 993–1000, 1997.
- [50] S. Svobodová a L. Matějka, „Material of thermal insulation affects heat gains in the summer period,“ *Applied Mechanics and Materials*, č. 861, pp. 221-228, 2016.
- [51] *ASTM E892-87 Standard Tables for Terrestrial Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 for a 37° Tilted Surface*, American Society for Testing and Materials, 1987.

- [52] D. Zuth, P. Matyáš a S. Svobodová, „Sběr teplotních údajů při použití jednodeskového počítače,“ *Automa*, č. 1, pp. 48-50, 2015.
- [53] S. Svobodová, „Experimentální testování krycích mřížek větracích otvorů na ventilátorové dráze,“ v *Juniorstav 2015*, Brno.
- [54] H. K. Ahn, T. J. Sauer, T. L. Richard a T. D. Glandville, „Determination of thermal properties of composting bulking materials,“ *Bioresource Technology*, č. 100, pp. 3974-3981, 2009.
- [55] High Performance Innovations for Buildings and Urban Environment, [Citace: 8.4.2015]. Dostupné z: <http://www.abolinco.com/>.
- [56] W. C. Swinbank, „Long-wave radiation from clear skies,“ *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, č. 89, pp. 339-348, 1963.
- [57] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman a A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7. vydání, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 04-7050-197-9.
- [58] M. Aubinet, „Longwave sky radiation parametrization,“ *Solar Energy*, č. 53, pp. 147-154, 1994.
- [59] W. Brutsaert, *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*, 2. vydání, Boston: Kluwer Publishers, 1984. ISBN 90-2771-247-6.
- [60] P. Berdahl a M. Martin, „Emissivity of clear skies,“ *Solar Energy*, č. 32, pp. 663-666, 1984.
- [61] J. L. Monteith a M. H. Unsworth, *Principles of Environmental Physics*, 2.vydání, Londýn: Edward Arnold, 1990. ISBN 07-1312-981-6.
- [62] S. Algarni a D. Nutter, „Survey of Sky Effective Temperature Models Applicable to Building Envelope Radiant Heat Transfer,“ v *ASHRAE Transactions*, Chicago, 2015.

- [63] G. S. Campbell a J. M. Norman, *An Introduction to Environmental Biophysics*, 2. vydání, New York: Springer, 1998. ISBN 03-8794-937-2.
- [64] U. Eicker a A. Dalibard, „Photovoltaic thermal collectors for night radiative cooling for buildings,“ *Solar Energy*, č. 85, pp. 1322-1335, 2011.
- [65] S. Svobodová, „Teplota oblohy při výpočtu tepelné bilance,“ v *JuniorStav*, Brno, 2016.
- [66] University of Texas, [Citace: 16.5.2014]. Dostupné z: <http://www.cae.utexas.edu>.
- [67] J. O. Smith, Determination of the convective heat transfer coefficients from the surface of buildings within urban street canyons, disertační práce, University of Bath, 2010.
- [68] ČSN EN ISO 6946 *Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [69] [Citace: 16.6.2019]. Dostupné z: „<https://www.nonstopstavebniny.cz/>“.
- [70] [Citace: 16.6.2019]. Dostupné z: „<https://wienerberger.nl/>“.
- [71] [Citace: 16.6.2019]. Dostupné z: „<http://www.kloeber.be/>“.
- [72] S. Svobodová, S. Lorente a M. Moisson, „Heat distribution and air flow in an inclined ventilated roof of a passive house in a summer period“ [koncept]
- [73] S. Svobodová, E. Šagát a L. Matějka, „Numerical analysis of the influence of ventilation grille hole geometry on the air flow in ventilated building structures“ [koncept]

## Seznam vlastní literatury

Svobodová S, Matějka L, Material of Thermal Insulation affects Heat Gains in the Summer Period, odborný recenzovaný časopis, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Durnten-Zurich, Švýcarsko, září 2016, ISSN 1662-7482

Zuth D, Matyáš P, Svobodová S, Sběr teplotních údajů při použití jednodeskového počítače, odborný recenzovaný časopis, Automa, FCC Public, leden 2015, ISSN 1210-9592

Svobodová S, Experimentální testování krycích mřížek větracích otvorů na ventilátorové dráze, doktorská konference Juniorstav 2015, Brno, leden 2015, ISBN 978-80-214-5091-2

Svobodová S, Matějka L, Maximum Temperatures of Roof Tiles during the Summer Period, odborný recenzovaný časopis, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Durnten-Zurich, Švýcarsko, září 2014, ISSN 1662-8985

Svobodová S, Lorente S, Moisson M, Heat distribution and air flow in an inclined ventilated roof of a passive house in a summer period [koncept]

Svobodová S, Šagát E, Matějka L, Numerical analysis of the influence of ventilation grille hole geometry on the air flow in ventilated building structures [koncept]

Svobodová S, Jacobs P, Mack A, Natural convection above a closed pot: Comparison of gas and induction cooking [koncept]

Svobodová S, Hnací síly přirozené ventilace, konference Stavební fyzika v pozemním stavitelství: Teorie a praxe, Brno, duben 2014, ISBN 978-80-214-4926-8

Svobodová S, Dvouplášťové šikmé střechy – tepelný odpor horního pláště, doktorská konference Juniorstav 2014, Brno, leden 2014, ISBN 978-80-214-4851-3

Svobodová S, Vliv polohy akumulční vrstvy na letní tepelnou stabilitu, mezinárodní konference STRUCTURA 2013, Ostrava, listopad 2013, ISBN 978-80-248-3236-4

Svobodová S, Vliv sálání s oblohou při posuzování větraného střešního pláště, mezinárodní konference CzechSTAV 2013, Hradec Králové, říjen 2013, ISBN 978-80-905243-8-5

Svobodová S, Vliv materiálu tepelné izolace střech na vnitřní teplotu vzduchu v letním období, doktorská konference Juniorstav 2013, Brno, únor 2013, ISBN 978-80-214-4670-0

Svobodová S, Dvouplášťové střechy s mírným spádem do 20°, mezinárodní konference CzechSTAV 2012, Hradec Králové, říjen 2012, ISBN 978-80-905243-1-6



## Seznam použitých veličin

- $A_e$  amplituda venkovní teploty [K]  
 $A_{is}$  amplituda vnitřní povrchové teploty [K]  
 $a_x$  zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]  
 $b$  tepelná jímavost [ $W^2 s \cdot m^{-4} K^{-2}$ ]  
 $b$  Wienova konstanta [ $\mu m K$ ] (kapitola 4.1.3)  
 $C$  tepelná kapacita [ $J \cdot K^{-1}$ ]  
 $c$  měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$ ]  
 $c_1$  první konstanta Planckova zákona [ $W \cdot m^2$ ]  
 $c_2$  druhá konstanta Planckova zákona [ $m \cdot K$ ]  
 $c_A$  plošná tepelná kapacita [ $J \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $c_{m,j}$  měrná tepelná kapacita  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [ $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$ ]  
 $c_p$  měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [ $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$ ]  
 $C_{tile}$  tepelná kapacita krytiny [ $J \cdot K^{-1}$ ]  
 $c_V$  objemová tepelná kapacita [ $J \cdot m^{-3} K^{-1}$ ]  
 $Ca$  efekt oblačnosti [-]  
 $CC$  faktor oblačnosti [-]  
 $D$  tepelná setrvačnost konstrukce [-] (kapitola 4.3)  
 $D$  vzdálenost horního a dolního pláště [m]  
 $d$  tloušťka materiálu [m]  
 $D_H$  hydraulický průměr [m]  
 $d_{m,j}$  tloušťka  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [m]  
 $D_{opt}$  optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy [m]  
 $E$  celková zářivá energie dopadající na těleso [J]  
 $e$  intenzita vyzařování reálného tělesa [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $E_a$  energie pohlcená tělesem [J]  
 $e_b$  intenzita vyzařování černého tělesa [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $E_r$  energie odražená od povrchu tělesa [J]  
 $E_t$  energie prošlá skrz tělesem [J]  
 $f$  součinitel smykového tření [-]

$F_{sky}$  faktor osálení mezi povrchem konstrukce a oblohou [-]  
 $F_x$  síla působící ve směru osy  $x$  [N]  
 $g$  tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]  
 $grad T$  teplotní gradient [ $K \cdot m^{-1}$ ]  
 $Gr$  Grashofovo číslo [-]  
 $Gr_H$  Grashofovo číslo pro délku dutiny  $H$  [-]  
 $H$  délka větrané vzduchové dutiny [m]  
 $h$  součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $\Delta h$  změna entalpie [ $J \cdot kg^{-1}$ ]  
 $H_b$  integrální intenzita vyzařování černého tělesa [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $h_c$  součinitel přestupu tepla prouděním [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{c,e}$  součinitel přestupu tepla prouděním pro exteriérový povrch [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{cav}$  součinitel přestupu tepla v dutině [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{cav,D}$  součinitel přestupu tepla v dutině, počítáno na základě tloušťky dutiny  $D$  [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{ci}$  součinitel přestupu tepla prouděním v interiéru [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{ce}$  součinitel přestupu tepla prouděním v exteriéru [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_e$  součinitel přestupu tepla v exteriéru [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_i$  součinitel přestupu tepla v interiéru [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{in}$  měrná entalpie na vstupu [ $J \cdot kg^{-1}$ ]  
 $h_{int}$  součinitel přestupu tepla na povrchu stropu [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{se}$  součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_r$  součinitele přestupu tepla sáláním [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $h_{out}$  měrná entalpie na výstupu [ $J \cdot kg^{-1}$ ]  
 $i$  thermal inertia [ $J \cdot m^{-2} K^{-1} s^{-1/2}$ ]  
 $I_l$  intenzita dlouhovlnného záření černého tělesa o teplotě  $T_{air}$  [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $I_T$  intenzita přímého a difuzního slunečního záření [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $i_\lambda$  spektrální intenzita vyzařování [ $W \cdot m^{-3}$ ]  
 $i_{\lambda b}$  spektrální intenzita vyzařování černého tělesa [ $W \cdot m^{-3}$ ]  
 $K_t$  index čistoty oblohy [-]  
 $K_0$  index atmosferické čistoty [-]

$L$  délka střechy od okapu ke hřebeni [m]  
 $L$  charakteristická délka [m]  
 $m$  hmotnost [kg]  
 $\dot{m}$  hmotnostní průtok vzduchu [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $Nu$  Nusseltovo číslo [-]  
 $\overline{Nu}_D$  průměrné Nusseltovo číslo pro přirozeně větranou dutinu tloušťky  $D$  [-]  
 $Nu_{D,cav}$  Nusseltovo číslo pro přirozeně větranou dutinu tloušťky  $D$  [-]  
 $Nu_{L,e}$  Nusseltovo číslo vnějšího povrchu pro charakteristickou délku konstrukce [-]  
 $Nu_{L,cav}$  Nusseltovo číslo povrchu dutiny pro charakteristickou délku konstrukce [-]  
 $\overline{Nu}_y$  průměrné Nusseltovo číslo pro charakteristickou délku konstrukce [-]  
 $\Delta p$  tlakový rozdíl [Pa]  
 $\Delta P$  tlaková diference [Pa]  
 $\Delta P_f$  tlaková ztráta třením [Pa]  
 $p_v$  parciální tlak vodní páry [kPa]  
 $P_v$  parciální tlak vodní páry [Pa]  
 $Pr$  Prandtlovo číslo [-]  
 $Q$  teplo [J]  
 $q$  hustota tepelného toku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $q$  dynamický tlak v potrubí [Pa] (kapitola 5.2.4)  
 $q''$  hustota tepelného toku horním pláštěm [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Q_{absi\_channel}$  energie absorbovaná z vnějšího prostředí [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Q_{absi\_tile}$  energie z vnějšího prostředí absorbovaná povrchem [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Q_{abso\_tile}$  energie absorbovaná vnějším povrchem střešního pláště [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Q_{cav}$  teplo odnášené vzduchovým proudem v dutině [J]  
 $Q_{como\_channel}$  energie absorbovaná/ vydávaná povrchem prouděním v dutině a sáláním s ostatními povrchy [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Q_{como\_tile}$  energie vydávaná vnějším povrchem střešního pláště [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Q_{comi\_room}$  energie vydávaná/absorbovaná povrchem prouděním a sáláním s ostatními povrchy [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$Q_{comi\_tile}$  energie vydávaná/absorbovaná povrchem prouděním v dutině a sáláním s ostatními povrchy [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $q_{cond}$  hustota tepelného toku kondukcí [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $q_{conv}$  hustota tepelného toku konvekcí [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $Q_{cv}$  konvekční složka tepla [W]  
 $q_{int}$  hustota tepelného toku sáláním ze stropu do místnosti [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $q_{lr}$  hustota tepelného toku směrem k obloze [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $q_{lr,cav}$  hustota tepelného toku sáláním mezi dvěma povrchy v dutině [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $Q_{rad}$  radiační složka tepla [W]  
 $q_{sol}$  hustota tepelného toku od slunce [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $R$  tepelný odpor [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_{cb}$  tepelný odpor podhledu [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_i$  odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_{ins}$  tepelný odpor tepelné izolace [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_s$  souhrnný odpor při přestupu tepla [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_{se}$  odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_{si}$  odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_{tile}$  tepelný odpor krytiny [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_{tot}$  celkový tepelný odpor [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]  
 $Ra$  Rayleighovo číslo [-]  
 $Ra^*_{D}$  Rayleighovo číslo pro tloušťku dutiny pro stěnu s konstantním tepelným tokem [-]  
 $Ra_D$  Rayleighovo číslo pro tloušťku dutiny pro stěnu s konstantní teplotou [-]  
 $Ra_y$  Rayleighovo číslo pro charakteristickou délku konstrukce [-]  
 $Ra^*_{y}$  Rayleighovo číslo pro charakteristickou délku konstrukce pro stěnu s konstantním tepelným tokem [-]  
 $Re$  Reynoldsovo číslo [-]  
 $Re_D$  Reynoldsovo číslo počítané z hydraulického průměru [-]  
 $Re_L$  Reynoldsovo číslo pro délku konstrukce L [-]  
 $S$  plocha [ $m^2$ ]  
 $s_j$  tepelná pohltivost  $j$ -té vrstvy [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]

$S_m$  plocha vnitřního povrchu  $m$ -té konstrukce [ $m^2$ ]  
 $T$  teplota [K]  
 $T$  termodynamická teplota černého tělesa [K] (kapitola 4.1.3)  
 $t$  čas [s]  
 $T_1-T_8$  teploty příslušných povrchů [K]  
 $T_A$  teplota vzduch vstupujícího do dutiny v dolní části [K]  
 $T_B$  teplota vzduchu opouštějícího dutinu v horní části střechy [-]  
 $T_{clear\_sky}$  zdánlivá teplota čisté oblohy [K]  
 $T_{dp}$  teplota rosného bodu [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_{in}$  teplota venkovního vzduchu vstupujícího do větrané dutiny [K]  
 $T_s$  teplota povrchu černého tělesa [K] (kapitola 4.1.3)  
 $T_s$  teplota povrchu [K]  
 $T_{int}$  teplota vzduchu v interiéru [K]  
 $T_{ext}$  teplota venkovního vzduchu [K]  
 $T_m$  střední termodynamická teplota [K]  
 $T_{sky}$  zdánlivá teplota oblohy [K]  
 $T_{sol-air}$  rovnocenná sluneční teplota [K]  
 $T_{\infty}$  teplota okolního vzduchu [K]  
 $U$  součinitel prostupu tepla příslušné konstrukce [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $u$  průměrná rychlost proudění [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
 $u, v$  směrové složky vektoru rychlosti  
 $U_c$  je celkový součinitel prostupu tepla [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $U_j$  tepelná pohltivost povrchu  $j$ -té vrstvy [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ]  
 $v$  rychlost proudění [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
 $W$  tepelná energie akumulovaná uvnitř konstrukcí [J] (kapitola 2.1.1)  
 $W$  šířka větraného průřezu [m]  
 $y$  vzdálenost od přívaděcího otvoru [m]  
 $x, y, z$  souřadnice trojrozměrného prostoru  
 $\sum R_{m,j,m}$  součet tepelných odporů vnitřních vrstev až do poloviny  $m$ -té k-ce [ $m^2 K \cdot W^{-1}$ ]

$\alpha$  součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]  
 $\alpha_{sol}$  solární pohltivost [-]  
 $\beta$  teplotní součinitel objemové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ]  
 $\gamma$  sklon střechy od vodorovné roviny [ $^\circ$ ]  
 $\delta$  tloušťka mezní vrstvy [m]  
 $\delta_T$  tloušťka tepelné mezní vrstvy [m]  
 $\delta m$  hmotnost kontrolního objemu [kg]  
 $\varepsilon$  emisivita [-]  
 $\varepsilon(T)$  totální hemisférická emisivita [-]  
 $\varepsilon_1 - \varepsilon_5$  emisivity příslušných povrchů [-]  
 $\varepsilon_{clouds}$  emisivita zatažené oblohy [-]  
 $\varepsilon_{clear}$  emisivita čisté oblohy [-]  
 $\varepsilon_{IR}$  emisivita v infračerveném spektru [-]  
 $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  spektrální hemisférická emisivita [-]  
 $\theta_{ai,max}$  nejvyšší denní teplota vzduchu v místnosti [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $\theta_{ai,max,N}$  požadovaná hodnota nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $\theta_{m,j,m}$  průměrná teplota  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [K]  
 $\lambda$  součinitelem tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]  
 $\lambda$  vlnová délka [m] (kapitola4.1.3)  
 $\Lambda$  tepelná propustnost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]  
 $\mu$  faktor difuzního odporu [-]  
 $\mu$  dynamická viskozita [ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $\nu$  kinematická viskozita [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]  
 $\nu$  teplotní útlum [-]  
 $\rho$  objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $\rho$  odrazivost [-] (kapitola4.1.3)  
 $\rho_{m,j}$  objemová hmotnost  $j$ -té vrstvy  $m$ -té konstrukce [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $\rho_{sol}$  odrazivost pro sluneční spektrum [-]  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$ ]  
 $\tau$  propustnost [-] (kapitola4.1.3)

$\tau$  časový interval jednoho dne [s]  
 $\tau_0$  časové zpoždění (časový posun) [h]  
 $\tau_{Asi}$  doba výskytu maximální teploty na vnitřním povrchu [h]  
 $\tau_{Asi}$  doba výskytu maximální venkovní teploty [h]  
 $\tau_{sol}$  solární propustnost [-]  
 $\tau_w$  smykové (tečné) napětí [Pa]  
 $\gamma$  Poissonova konstanta [-]  
 $\Phi$  tepelný tok [W]  
 $\phi$  sklon horního pláště od svislice [°]  
 $\psi$  fázový posun teplotního kmitu [h]

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1 Schéma typické lehké střešní skladby.....   | 17 |
| Obr. 2 Okrajové podmínky pro ustálený a neustálený teplotní stav .....   | 25 |
| Obr. 3 Tvar mezní vrstvy v tekutině proudí podél plochy: (a) teplejší, (b) chladnější než okolí [44] .....   | 29 |
| Obr. 4 Zatřídění tepelného záření dle intervalu vlnové délky [43].....   | 31 |
| Obr. 5 Rozložení dopadající zářivé energie na pevné těleso do dvou složek .....  | 33 |
| Obr. 6 Distribuce spektrální intenzity vyzařování: a) černého tělesa o různých teplotách, b) černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče o stejné teplotě [45].....                              | 34 |
| Obr. 7 Grafické znázornění fázového posunutí teplotního kmitu a teplotního útlumu .....  | 44 |
| Obr. 8 Schéma větraného střešního pláště .....   | 45 |
| Obr. 9 Přirozené proudění podél plochy o vyšší teplotě než okolní prostředí [43] .....   | 47 |
| Obr. 10 Vliv charakteru vyhřívání stěny na tvar tepelné mezní vrstvy: a) izotermní konstrukce, b) konstrukce s rovnoměrným tepelným tokem [44] .....   | 50 |
| Obr. 11 Větraná vzduchová vrstva mezi dvěma vyhřívány mi konstrukcemi: a) vzdálenost konstrukcí $D > 2 \delta T$ ; b) vzdálenost konstrukcí $D \leq 2 \delta T$ ; c) teplotní profil v dutině [44] ..... | 51 |
| Obr. 12 Vývin mezních vrstev ve větrané dutině [39].....   | 51 |
| Obr. 13 RC model střešního pláště.....   | 54 |
| Obr. 14 Distribuce tepla ve střešním plášti .....  | 57 |
| Obr. 15 Výpočetní doména s vyznačením okrajových podmínek.....   | 59 |



|  |    |
|--|----|
| Obr. 16 Vývoj tvaru vzduchové domény: (a) obdélníková; (b) se zahrnutím venkovního prostoru před a za větranou vzduchovou vrstvou; (c) s větší oblastí za výdechovým otvorem; (d) umístění izolační vzduchové kapsy.....   | 59 |
| Obr. 17 Nusseltovo číslo: Bez vlivu sálání mezi povrchy v dutině.....  | 61 |
| Obr. 18 Nusseltovo číslo: S vlivem sálání mezi povrchy v dutině.....   | 61 |
| Obr. 19 Výpočetní model: (a) celkový pohled; (b) jednotlivé vrstvy střešního pláště [50]   | 62 |
| Obr. 20 Geometrie podkrovní místnosti pro dynamickou simulaci v TRNSYSu.....   | 65 |
| Obr. 21 Rozdělení větrané dutiny do dvanácti segmentů.....   | 66 |
| Obr. 22 Jeden ze dvou modelů střešního pláště.....   | 70 |
| Obr. 23 Schéma terasy s umístěním modelů.....  | 72 |
| Obr. 24 Digitální snímač teploty Dallas DS 18B20 a sběrnice.....   | 73 |
| Obr. 25 Ventilátorová dráha ve VZLÚ v Praze, detail osazení mřížky v záklopu [53].....   | 74 |
| Obr. 26 Teplotní profil střešního pláště a části přilehlého interiéru v časech od počátku simulace 0h, 1h, 3h, 6h, 10h, 18h, 30h, 34h, 126h, 130h 164h (cca 1 týden), 702h (29 dní a 6h), 706h (29 dní a 10h) a 714h (29dní a 18h), stupnice jsou uvedeny v Kelvinech..... | 79 |
| Obr. 27 Průběh povrchových teplot ve střešním plášti pasivní budovy, materiálové řešení s minerální vatou a sádrokartonem v týdenním horizontu.....  | 80 |
| Obr. 28 Průběh povrchových teplot ve střešním plášti pasivní budovy, materiálové řešení s minerální vatou a sádrokartonem v měsíčním horizontu.....  | 80 |
| Obr. 29 Vliv materiálu tepelné izolace: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní.....  | 82 |
| Obr. 30 Vliv materiálu tepelné izolace: Tepelné toky na líci stropního podhledu v periodě 7 dní.....   | 82 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 31 Vliv materiálu podhledu: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní .....                                    | 84 |
| Obr. 32 Vliv materiálu podhledu: Tepelné toky na líci stropního podhledu v periodě 7 dní<br>.....                            | 84 |
| Obr. 33 Vliv kombinace materiálů tepelné izolace a podhledu: Teploty na líci stropního<br>podhledu v periodě 7 dní.....      | 86 |
| Obr. 34 Vliv kombinace materiálů tepelné izolace a podhledu: Tepelné toky na líci<br>stropního podhledu v periodě 7 dní..... | 86 |
| Obr. 35 Vliv reflexních povrchů: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní .....                                    | 88 |
| Obr. 36 Vliv reflexních povrchů: Tepelné toky na líci stropního podhledu v periodě 7 dní<br>.....                            | 88 |
| Obr. 37 Ukázka zanesení reflexní fólie nečistotami .....   | 89 |
| Obr. 38 Vliv barvy krytiny: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní .....   | 90 |
| Obr. 39 Vliv barvy krytiny: Tepelné toky na líci stropního podhledu v periodě 7 dní .....                                    | 91 |
| Obr. 40 Poloha teplotních snímačů ve střešní skladbě .....   | 92 |
| Obr. 41 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole A (SDK + šedá fólie).....  | 93 |
| Obr. 42 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole B (SDK + reflexní fólie) .....                                     | 93 |
| Obr. 43 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole C (lisovaná sláma + šedá fólie)<br>.....                           | 94 |
| Obr. 44 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole D (lisovaná sláma + reflexní<br>fólie).....                        | 94 |
| Obr. 45 Intenzita přímého slunečního záření v období 14. 7. -21. 7. 2014.....  | 95 |
| Obr. 46 Průběhy teplot v modelech střešního pláště v poloze 2.....   | 95 |
| Obr. 47 Intenzita přímého slunečního záření pro den 4. 9. 2014 .....   | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| Obr. 48 Teplotní průběhy ve všech polích modelů střešních skladeb pro den 4. 9. 2014 ..  | 97  |
| Obr. 49 Vliv variace tloušťky tepelné izolace na teplotu líce stropního podhledu – teploty .....   | 99  |
| Obr. 50 Vliv variace tloušťky tepelné izolace na teplotu líce stropního podhledu – tepelné toky.....   | 99  |
| Obr. 51 Vliv součinitele tepelné vodivosti na teplotu líce stropního podhledu – teploty  | 100 |
| Obr. 52 Vliv součinitele tepelné vodivosti na teplotu líce stropního podhledu – tepelné toky.....  | 101 |
| Obr. 53 Vliv objemové tepelné kapacity na teplotu líce stropního podhledu – teploty ...  | 102 |
| Obr. 54 Vliv objemové tepelné kapacity na teplotu líce stropního podhledu – tepelné toky .....   | 102 |
| Obr. 55 Teplotní a rychlostní profily ve větrané dutině s emisivitou povrchů $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ ; na svislé ose je vynesena teplota v Kelvinech, na vodorovné ose šířka dutiny, na levě straně je povrch horního pláště, na pravé straně je povrch spodního pláště .....   | 108 |
| Obr. 56 Teplotní a rychlostní profily ve větrané dutině s velmi nízkou emisivitou povrchů (bez vlivu radiační složky) ; na svislé ose je vynesena teplota v Kelvinech, na vodorovné ose šířka dutiny, na levě straně je povrch horního pláště, na pravé straně je povrch spodního pláště ..... | 111 |
| Obr. 57 Rozložení teplot ve střešním plášti – nízká emisivita povrchů ve větrané dutině (bez vlivu radiační složky) .....  | 112 |
| Obr. 58 Rozložení teplot ve střešním plášti – vysoká emisivita povrchů ve větrané dutině $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ .....  | 112 |
| Obr. 59 Distribuce tepla ve střešní konstrukci .....   | 113 |
| Obr. 60 Uvažovaný kontrolní objem ve vzduchové vrstvě (vyznačený šrafovou) .....   | 113 |

|   |     |
|---|-----|
| Obr. 61 Účinnost větrané vzduchové vrstvy .....   | 114 |
| Obr. 62 Teplota stropního podhledu ve variantě teplené izolace z minerální vaty –<br>porovnání hodnot ze simulace z COMSOLu a TRNSYSu .....                         | 116 |
| Obr. 63 Teplota stropního podhledu ve variantě teplené izolace z dřevovláknů –<br>porovnání hodnot ze simulace z COMSOLu a TRNSYSu.....                             | 116 |
| Obr. 64 Teplota stropního podhledu ve variantě větraného a nevětraného střešního pláště<br>s tepelnou izolací z minerální vaty, hodnoty ze simulace v TRNSYSu ..... | 117 |
| Obr. 65 Teplota stropního podhledu ve variantě větraného a nevětraného střešního pláště<br>s tepelnou izolací z dřevovláknů, hodnoty ze simulace v TRNSYSu.....     | 117 |
| Obr. 66 Schéma střešního pláště s tepelnými energiemi působícími na jednotlivých<br>povrchích .....   | 118 |
| Obr. 67 Teplo procházející do interiéru střešním pláštěm v době denního teplotního<br>maxima.....   | 120 |
| Obr. 68 Geometrie CFD modelu .....  | 124 |
| Obr. 69 Celkový tlak 20 mm před mřížkami .....  | 125 |
| Obr. 70 Detail uzlového bodu mřížek 2c a 3a .....   | 126 |
| Obr. 71 Prototypy mřížek.....   | 127 |
| Obr. 72 Poměr tlaku v potrubí pro mřížky vztažený k tlaku v potrubí bez mřížky .....  | 129 |
| Obr. 73 Poměr tlaku v potrubí a dynamického tlaku na otvoru bez mřížky .....  | 130 |
| Obr. 74 Postup tepelně technického výpočtu střešního pláště či podkrovní místnosti....  | 134 |
| Obr. 75 Metodický postup přípravy výpočtového modelu šikmého střešního pláště .....   | 135 |
| Obr. 76 Schematické znázornění tepelných toků na povrchu střešního pláště .....   | 139 |

|   |     |
|---|-----|
| Obr. 77 Závislost dosažené maximální povrchové teploty krytiny během letního dne na solární pohltivosti u vzorků různých typů střešních krytin.....   | 143 |
| Obr. 78 Rychlostní mezní vrstva při povrchu konstrukce: a) oslabení rychlostního profilu v tloušťce mezní vrstvy; b) průběh mezní vrstvy po délce z laminárního na turbulentní proudění v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla [40]..... | 144 |
| Obr. 79 Součinitel přestupu tepla pro horní plášť – nízká emisivita povrchů v dutině....  | 148 |
| Obr. 80 Součinitel přestupu tepla pro horní plášť – emisivita povrchů v dutině $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ .....   | 149 |
| Obr. 81 Součinitel přestupu tepla pro spodní plášť – emisivita povrchů v dutině $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$ .....  | 149 |
| Obr. 82 Diagram výpočetního postupu pro stanovení součinitele přestupu tepla ve větrané vzduchové vrstvě, kde probíhá přirozené proudění .....  | 154 |
| Obr. 83 Hřebenový větrací pás s kartáčem [69] .....   | 158 |
| Obr. 84 Hřebenový větrací pás celohliníkový s perforací [70] .....  | 158 |
| Obr. 85 Hřebenový větrací pás hliníkový s integrovanou tkaninou [71] .....  | 158 |
| Obr. 86 Současné řešení detailu střešního hřebene ve 3D .....   | 159 |
| Obr. 87 Nové řešení detailu střešního hřebene pomocí „hřebenové větrací tvarovky“ ve 3D .....   | 159 |
| Obr. 88 Současné řešení detailu střešního hřebene.....  | 160 |
| Obr. 89 Nové řešení detailu střešního hřebene pomocí „hřebenové větrací tvarovky“ ...   | 160 |
| Obr. 90 „Hřebenová větrací tvarovka“ – boční pohled.....  | 161 |
| Obr. 91 „Hřebenová větrací tvarovka“ : vlevo řez v místě příčlí; vpravo řez v místě ztužidla stříšky.....   | 161 |

## Seznam tabulek

|   |     |
|---|-----|
| Tab. 1 Tepelně technické charakteristiky vybraných stavebních materiálů důležité pro určení tepelné setrvačnosti budovy .....       | 10  |
| Tab. 2 Orientační hodnoty objemové tepelné kapacity vybraných stavebních materiálů..  | 11  |
| Tab. 3 Doporučené tloušťky větrané vzduchové vrstvy a velikosti větracích otvorů [29].  | 19  |
| Tab. 4 Optimální tloušťka větrané dutiny v závislosti na typu vyhřívání pláště [39] .....   | 52  |
| Tab. 5 Materiálové charakteristiky modelu. ....   | 60  |
| Tab. 6 Střešní skladba a přilehlé podkroví – materiálové charakteristiky a dimenze.....   | 63  |
| Tab. 7 Skladby konstrukcí podkrovní místnosti v modelu pro dynamickou simulaci .....  | 66  |
| Tab. 8 Materiálové a povrchové vlastnosti měřených střešních tašek [23] .....   | 67  |
| Tab. 9 Maximální teploty střešních tašek a okrajové podmínky [23] .....   | 68  |
| Tab. 10 Materiálové řešení doplňkové hydroizolační vrstvy a podhledu .....  | 71  |
| Tab. 11 Charakteristiky stavebních materiálů použitých na modelech střešních pláště ...   | 72  |
| Tab. 12 Vzorčky testovaných mřížek a jejich tlakový spád [53] .....   | 75  |
| Tab. 13 Tepelná izolace – materiálové charakteristiky a dimenze <sup>1</sup> .....  | 81  |
| Tab. 14 Tepelná izolace – vlastnosti materiálů.....   | 82  |
| Tab. 15 Stropní podhled – materiálové charakteristiky a dimenze .....   | 83  |
| Tab. 16 Stropní podhled – vlastnosti materiálů .....  | 85  |
| Tab. 17 Tepelná bilance střešního pláště.....   | 114 |
| Tab. 18 Tepelná bilance na površích střešního pláště větrané a nevětrané varianty v provedení tepelné izolace z minerální vaty..... | 119 |

|  |     |
|--|-----|
| Tab. 19 Tepelná bilance na površích střešního pláště větrané a nevětrané varianty v provedení tepelné izolace z dřevovlákná.....         | 120 |
| Tab. 20 Tlak před mřížkou vztažený k jednotce pevných částí mřížky.....  | 121 |
| Tab. 21 Geometrie navržených větracích mřížek s otevřenou plochou 58 % .....   | 123 |
| Tab. 22 Výsledky z měření tlaků na prototypch mřížek na ventilátorové dráze ve VZLÚ .....  | 128 |
| Tab. 23 Výhody a nevýhody MKP a dynamické simulace .....   | 136 |
| Tab. 24 Přehled nejčastějších analýz výsledků z MKP a dynamické simulace .....   | 136 |
| Tab. 25 Vybrané korelační vztahy pro teplotu oblohy a její emisivitu [63], [64], [65] .....  | 140 |
| Tab. 26 Hodnoty sluneční pohltivosti venkovních neprůsvitných konstrukcí [36] .....  | 144 |
| Tab. 27 Hodnoty Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla pro model větraného střešního pláště definovaného v kapitole 4.6.1.....    | 148 |
| Tab. 28 Hodnoty přestupových součinitelů v letním období dle normy ČSN 73 0540-3, EN ISO 13791, ČSN EN ISO 13792 a ČSN EN ISO 13789..... | 151 |

## Poděkování

doc. Ing. Liboru Matějkovi, CSc., PhD., MBA, docentovi Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební VUT, za odborné rady a připomínky;

doc. RNDr. Pavlu Rovnaníkovi, Ph.D., zástupci vedoucího Ústavu Chemie Fakulty stavební VUT, za provedení laboratorního měření odrazivosti vzorků krytiny;

doc. Ing. Janě Korytářové, Ph.D., vedoucí Ústavu stavební ekonomiky a řízení Fakulty stavební VUT, za propůjčení terasy k provádění měření na modelech střešních pláštů;

Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. odbornému asistentovi Ústavu aplikované informatiky Fakulty strojní VUT, za pomoc a spolupráci při návrhu systému měření a záznamu dat na modelech střešních pláštů včetně osazení snímačů a sestavení měřicího zařízení;

Mgr. Davidu Zachovi, Ph.D. a Výzkumnému a zkušebnímu leteckému ústavu, a.s., za provádění měření krycích mřížek na ventilátorové dráze speciálně sestavené pro tento účel.

Ústavu vodního hospodářství krajiny VUT za poskytnutí meteorologických dat z meteostanice umístěné v areálu univerzity;

Ing. Tomáši Petříčkovi, Ph.D., odbornému asistentovi Ústavu pozemního stavitelství VUT, za zapůjčení vzorků střešních tašek;

panu Milanu Prokešovi, technicko-hospodářskému pracovníkovi z Ústavu pozemního stavitelství, za pomoc při výrobě dřevěné kostry modelů střešních pláštů.

Dále bych chtěla poděkovat firmám, které mi poskytly materiál na modely střešních pláštů, konkrétně Ekopanely stropní podhledy, Tondach střešní tašky, Juta tepelnou izolaci, pojistné hydroizolace a parozábranu.





**Tato práce vznikla  
v rámci velké infrastruktury  
Aerodynamických tunelů**



Velká infrastruktura Aerodynamické tunely  
je součástí projektu  
LM2011016 / Aerodynamické tunely  
za finanční podpory MŠMT v rámci aktivity  
Projekty velkých infrastruktur pro VaVal