



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

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Sylvia Svobodová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

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

BRNO 2019

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Přehled o současném stavu problematiky střešních pláštů z hlediska redukce letních tepelných zisků.....	2
2.1	Existující konstrukční opatření bránící přehřívání podstřeší.....	3
2.2	Požadavky na vnitřní prostředí.....	3
2.3	Typická střešní skladba realizovaná v ČR.....	3
2.4	Parametry větrané vzduchové vrstvy.....	4
3	Cíle.....	5
4	Teorie a metody zpracování.....	6
4.1	Tepelná mezní vrstva.....	6
4.2	Optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy.....	7
4.3	Model větraného střešního pláště v softwaru COMSOL.....	8
4.4	Model nevětraného střešního pláště v softwaru COMSOL.....	10
4.5	Dynamická simulace podkrovní místnosti.....	11
4.6	Maximální teploty vybraných druhů krytin.....	11
4.7	Experimentální měření teploty na modelech střešních pláštů.....	13
4.8	Testování krycích mřížek na ventilátorové dráze.....	14
5	Výsledky.....	14
5.1	Analýza hlavních faktorů ovlivňujících šíření tepla ve střešním plášti v letním období ..	14
5.1.1	Materiál tepelné izolace.....	15
5.1.2	Materiál stropního podhledu.....	16
5.1.3	Kombinace materiálového řešení tepelné izolace a podhledu.....	17
5.1.4	Reflexní povrchy.....	18
5.1.5	Barva krytiny.....	19
5.1.6	Experimentální ověření účinnosti vybraných variant.....	19
5.2	Vlivy konstrukčního řešení na proudění ve větrané vzduchové vrstvě.....	22
5.2.1	Vliv sálání mezi horním a dolním pláštěm na proudění v dutině.....	22
5.2.2	Tepelná bilance větraného střešního pláště oproti nevětrané variantě.....	25
5.2.3	Krycí mřížky větracích otvorů.....	26
5.3	Sjednocený postup při výpočtu šíření tepla střešním pláštěm.....	29
5.4	Návrh detailu hřebene podporující proudění vzduchu v dutině – „hřebenová větrací tvarovka“.....	31
6	Přínosy a závěr.....	32
7	Bibliografie.....	34

1 Úvod

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. Je nutné podotknout, že hlavním zdrojem tepelných zisků v podkroví bývají střešní okna, ta ale mohou být stíněna, nebo řešena jinak – vikýřem, apod. V této práci je pozornost soustředěna pouze na prostup tepla střešním pláštěm.

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

Problematickou 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 [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Druhá skupina prací prezentuje výsledky získané výpočetní cestou z CFD simulace nebo matematického modelu [10], [11], [12], [13]. 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 [6], [13], [14], 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 dosáhnou 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 vyhříványými měděnými deskami ve vodním prostředí dokázali vizualizovat proudění a vytvořili korelační vztah pro Nusseltovo číslo pro proudění v dutinách [15], 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 Reunionu 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 kvalitu vnitřního prostředí

budov se specializuje výzkumná skupina pod vedením prof. Arnolda Janssense na Gentské univerzitě v Belgii.

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 [16], 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 dle obecně známých principů – navržením vrstvy s **tepelně akumulací schopností** ve skladbě; aplikací **reflexní podstřešní fólie**; zahrnutím **větrané vzduchové vrstvy**; volbou střešní **krytiny** s vhodnými **povrchovými vlastnostmi**; realizací vegetační střechy a aplikací materiálu se změnou skupenství.

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.

$$\theta_{ai,max} \leq \theta_{ai,max,N} \quad (1)$$

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].

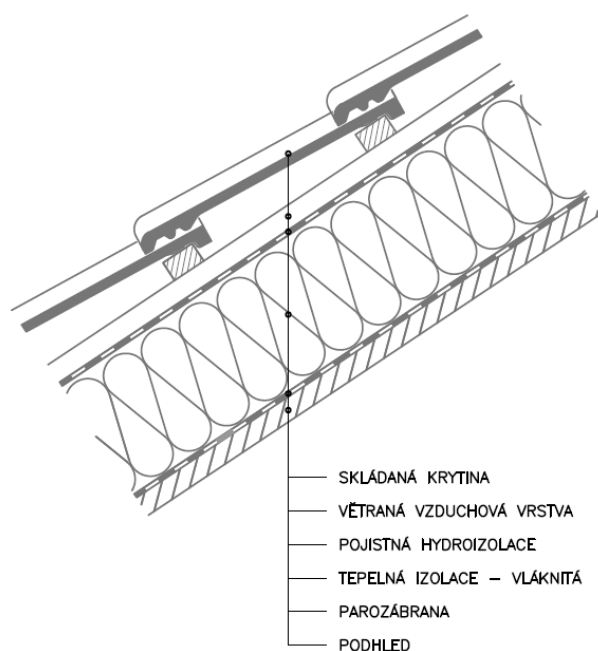
Pro nevýrobní budovy je ustanovena normová hodnota $\theta_{ai,max,N} = 27$ °C. U obytných budov je možné připustit překročení požadované hodnoty nejvíce o 2 °C na souvislou dobu nejvíce 2 hodin během normového dne, pokud s tím investor souhlasí. [16]

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 plášťů na daném území. Nejběžnějším konstrukčním řešením šikmých střešních plášťů v České republice na rodinných a bytových domech je dřevěný krov s tepelnou izolací umístěnou mezi a pod krokvy a se skládanou střešní krytinou. Tloušťka větrané vzduchové vrstvy by měla odpovídat normovému doporučení v Tab. 1. V tomto typu souvrství bývá volena měkká tepelná izolace většinou z minerálních vláken. Podhled bývá tvořený nejčastěji sádkokartónem, OSB deskami nebo dřevěnými palubovými prkny.

Převážná většina těchto střešních plášťů má problémy s přehříváním přilehlých podkrovních místností. Přehřívání interiéru je způsobeno především nízkou akumulací schopností této lehké skladby a nedostatečným větráním vzduchové vrstvy. Konstrukce s plošnou hmotností do 100 kg·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 [17].



Obr. 1 Schéma typické lehké střešní skladby

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 přívodních a odváděcích otvorů (Tab. 1). 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.

Tab. 1 Doporučené tloušťky větrané vzduchové vrstvy a velikosti větracích otvorů [17]

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

Dále je v této normě [17] 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. Důvodem tohoto doporučení má být 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 pláštů již dutina není dotována teplem z interiéru, a proto by větrání měla podpořit větší tloušťka vzduchové vrstvy. Bylo však dokázáno měřeními i výpočty, že větší tloušťka vzduchové vrstvy v této situaci nepříspěje k proudění a je uvažováno s vyškrtnutím tohoto doporučení v příští změně normy.

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. [17]

3 Cíle

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 redukcii 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 [18] a proudícím vzduchem je nejvyšší teplotní gradient z celé střešní skladby, tudíž potenciální způsob jak odvést největší množství tepelné energie ze střešní konstrukce.

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 akumuláční 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.

4 Teorie a metody zpracování

4.1 Tepelná mezní vrstva

Uvnitř větrané vzduchové dutiny na povrchu horního a spodního střešního pláště dochází k formování **tepelné mezní vrstvy** o tloušťce δ_T . V této tenké vzduchové vrstvě je teplo sdíleno vedením i prouděním [19], [20], teplota zde dosahuje vyšších hodnot než vzduch v mezeře a nastává přirozené proudění v této mezní vrstvě.

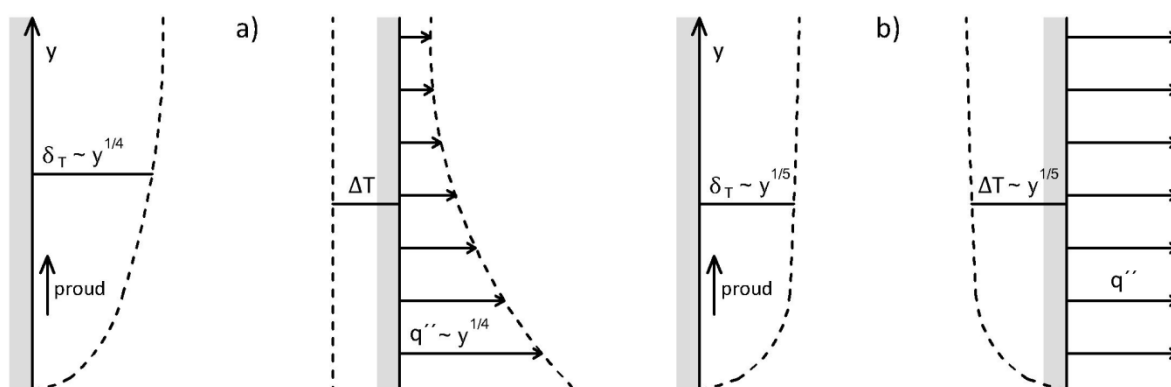
Průběh tepelné mezní vrstvy po výšce stěny se obecně liší v závislosti na **charakteru vyhřívání stěny**. Má-li stěna dostatečnou tloušťku a tepelnou vodivost na to, aby její teplota zůstala po délce dutiny konstantní, přestože je jí odebíráno teplo proudícím vzduchem, pak se jedná o případ s **konstantní teplotou povrchu**. Tloušťka δ_T je poměrná k $y^{1/4}$, kde y je poloha bodu po délce větrané vrstvy, viz Obr. 2a.

$$\delta_T \sim y \cdot Ra_y^{-1/4} \quad (2)$$

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

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

kde g je tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], ϕ je sklon horního pláště od svislice [°], β je součinitel teplotní objemové roztažnosti vzduchu [K^{-1}], T_s je teplota povrchu [K], T_∞ je teplota okolního vzduchu [K], y je délka vzduchové vrstvy [m], α je součinitel teplotní vodivosti vzduchu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] a ν je kinematická viskozita vzduchu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].



Obr. 2 Vliv charakteru vyhřívání stěny na tvar tepelné mezní vrstvy: a) izotermní konstrukce, b) konstrukce s rovnoměrným tepelným tokem [20]

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 δ_T poměrný k $y^{1/5}$, znázorněno na Obr. 2b.

$$\delta_T \sim y \cdot Ra_{*y}^{-1/5} \quad (4)$$

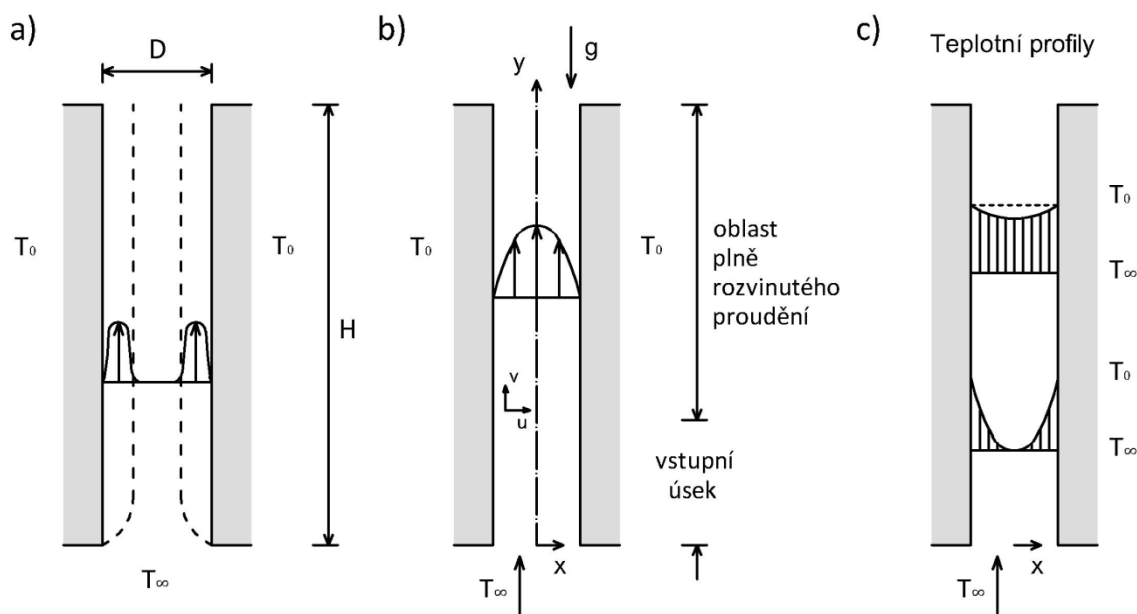
Vztah pro výpočet Rayleigho čísla pro stěnu s konstantním tepelným tokem je následující:

$$Ra_{*y} = \frac{g \cdot \cos \Phi \cdot \beta \cdot q'' \cdot y^4}{\alpha \cdot \nu \cdot \lambda} \quad (5)$$

kde g je tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$], ϕ je sklon horního pláště od svislice [$^\circ$], β je součinitel teplotní objemové roztažnosti vzduchu [K^{-1}], q'' je hustota tepelného toku horním pláštěm [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], y je délka vzduchové vrstvy [m], α je součinitel teplotní vodivosti vzduchu [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$], ν je kinematická viskozita vzduchu [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] a λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Nastává-li v dutině turbulentní proudění, je dosaženo lepší korelace bez uvažování sklonu ($\cos \phi$).

4.2 Optimální tloušťka větrané vzduchové vrstvy

Rychlostní profil ve svislé přirozeně větrané dutině se odvíjí od vzdálenosti dvou ohraničujících konstrukcí [20]. Je-li vzdálenost dvou paralelních vyhřívaných stěn D příliš velká, tj. $D > 2\cdot\delta_T$, probíhá proudění podél každé plochy samostatně v tloušťce δ_T a existence druhé konstrukce na průběh proudu nemá vliv, viz Obr. 3a. Jsou-li stěny u sebe blíže, ve vzdálenosti $D \leq 2\cdot\delta_T$, spojí se obě mezní vrstvy do jediného proudu (Obr. 3 b). V tomto případě dochází k využití celé tloušťky dutiny, už se zde nevyskytují dva samostatné proudy oddělené vrstvou chladnějšího vzduchu. Proudění vzduchu v dutině je **nejefektivnější** právě při vzdálenosti ploch $2\cdot\delta_T$. Dalším přibližováním stěn se již snižuje efektivita větrání.



Obr. 3 Větraná vzduchová vrstva mezi dvěma vyhřívanými konstrukcemi: a) vzdálenost konstrukcí $D > 2\delta_T$; b) vzdálenost konstrukcí $D \leq 2\delta_T$; c) teplotní profil v dutině [20]

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

$$Ra_D = \frac{g \cdot \cos \Phi \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (6)$$

a pro povrch s konstantním tepelným tokem:

$$Ra_{*D} = \frac{g \cdot \cos \Phi \cdot \beta \cdot q'' \cdot D^4}{\alpha \cdot \nu \cdot \lambda} \quad (7)$$

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 [19], [21] uvedených v Tab. 2.

Tab. 2 Optimální tloušťka větrané dutiny v závislosti na typu vyhřívání pláště [19]

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

Nebo lze užít pro vyčíslení optimální tloušťky dutiny vztahu Morroea et al (8), kterým lze určit optimální poměr tloušťky vzduchové vrstvy a délky dutiny $(D/H)_{opt}$ [22].

$$(D/H)_{opt} = 4,57(Gr_H)^{-0,192} \quad (8)$$

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

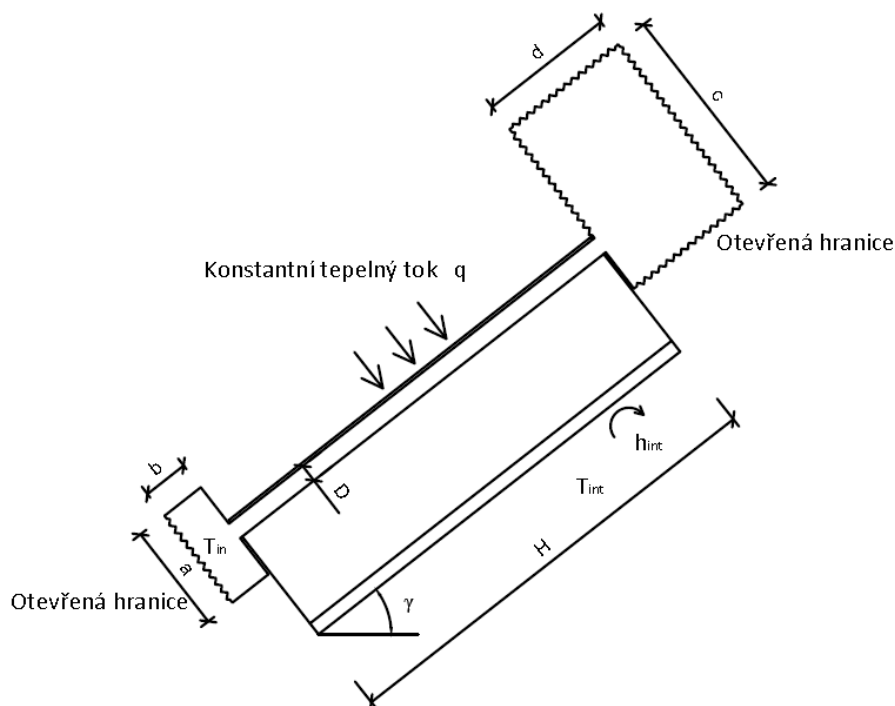
V závislosti na typu vyhřívání horního a dolního pláště se určí nejvhodnější vztah. V případě dvouplášťových střešních konstrukcí je horní plášť vyhříván konstantním tepelným tokem po délce pláště. Dolní plášť lze též definovat jako povrch s konstantním tepelným tokem. V případě reflexních povrchů ve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

4.3 Model větraného střešního pláště v softwaru COMSOL

Pro simulaci šíření tepla v dvouplášťové střeše byl vytvořen model segmentu střešního pláště (Obr. 4). Zvolena byla metoda CFD simulace ve výpočetním programu COMSOL Multiphysics. Byla hodnocena účinnost větrané vzduchové vrstvy. Dále byl hodnocen vliv reflexních povrchů v dutině na teplotní a rychlostní pole ve vzduchové vrstvě a na distribuci tepla ve střešním plášti [28]. 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.

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 γ byl zvolen 38° .



Obr. 4 Výpočetní doména s vyznačením okrajových podmínek

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 $8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Vliv větru nebyl uvažován, jelikož jsou sledovány veličiny související s přirozeným prouděním.

Tab. 3 Materiálové charakteristiky modelu.

	Tloušťka vrstvy d [m]	Souč. tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Objemová hmotnost ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Měrná tepelná kapacita 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

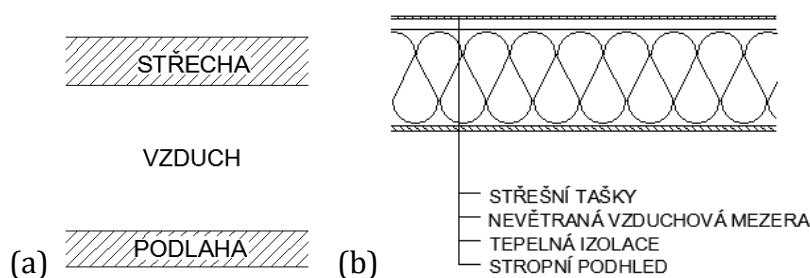
* Vlastnosti vzduchu, jako je součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost, měrná tepelná kapacita a dynamická viskozita jsou teplotně závislé.

Horní plášť je tvořen pálenou keramickou krytinou přírodní světle červené barvy. Dolní plášť je tvořen vláknitou tepelnou izolací a podhledem ze dvou vrstev sádrokartonu. Součinitel prostupu tepla odpovídá 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. 3. Byly řešeny dvě varianty povrchových úprav ve větrané dutině – s velmi nízkou hodnotou emisivity (přestup tepla v dutině řešen čistě konvekcí a složka radiace je eliminována) a povrchy s emisivitou $\varepsilon = 0,94$.

K validaci výpočetního modelu byla použita práce Azeveda a Sparrowa [15], která přinesla převrat v problematice přirozeného proudění v nakloněné dutině a je dodnes citována v odborné literatuře. V obou případech, s vlivem sálání i bez vlivu sálání mezi povrchy, byla nalezena dobrá shoda a model byl uznán za platný.

4.4 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. Do geometrie modelu je zahrnuta kromě samotného střešního pláště i přilehlá část podkroví včetně podlahy (Obr. 5a). Střešní plášť je tvořený krytinou, nevětranou vzduchovou vrstvou, tepelnou izolací a podhledem (Obr. 5b). Teplota vnitřního vzduchu je ovlivněna pouze prostupem tepla skrze střešní plášť. Jelikož je vnitřní vzduch vyhříván přilehlým střešním pláštěm, tedy tepelný tok je shora dolů, složka konvekce ve vzduchu v místnosti může být zanedbána [19]. Teplota vzduchu je po výšce stratifikována. V rámci této simulace bylo prověřeno šest druhů tepelné izolace – minerální vata, EPS, XPS, PUR, dřevovláknitá izolace a celulózová vata. Stropní podhled byl obměněn též v šesti variantách – sádrokartón, dvě vrstvy sádrokartónu, OSB, dřevěné palubky, panely z lisované slámy a jílové desky.



Obr. 5 Výpočetní model: (a) celkový pohled; (b) jednotlivé vrstvy střešního pláště [23]

Venkovní okrajové podmínky jsou zadány rovnocennou sluneční teplotou. Na základě měřených hodnot byla sestavena harmonicky oscilující časově závislá funkce (9). 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.

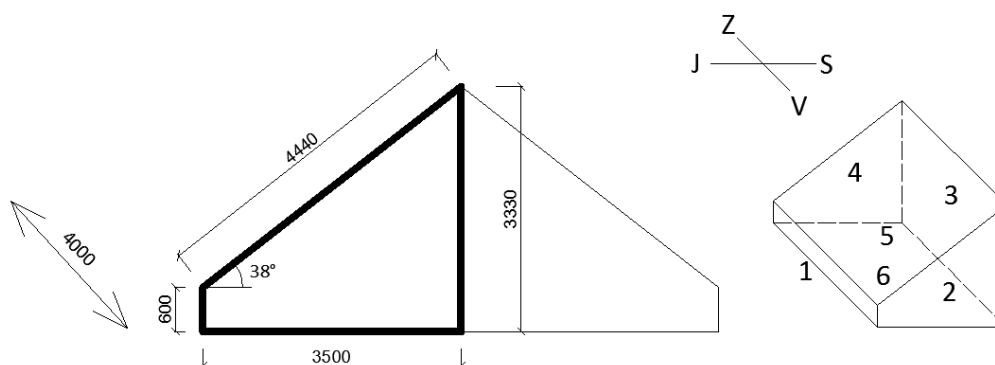
$$t_{sol-air} = 313 + 23 \sin \frac{2\pi t}{24} \quad (9)$$

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 dřevovlákn. Obě varianty přinesly obdobné výsledky, viz Obr. 22.

4.5 Dynamická simulace podkrovní místnosti

Pro simulaci tepelné bilance podkrovní místnosti bylo využito programu TRNSYS. Celkově byly zvoleny čtyři varianty, lehká střešní skladba s tepelnou izolací z minerální vaty respektive z dřevovlákn, obě ve větraném a nevětraném provedení. Tato dynamická simulace vznikla během tříměsíční zahraniční stáže (09/2016 – 12/2016) na Ghent University v Belgii pod vedením profesora Arnolda Jannsennse.

Návrh geometrie modelu (Obr. 6) vychází z běžných rozměrů malé podkrovní místnosti a splňuje veškeré požadavky pro obytnou místnost nacházející se v podkroví. Střešní rovina je orientována jižním směrem a její sklon činí 38° . Model podkrovní místnosti záměrně neobsahuje žádné okno, aby bylo možné uvažovat s vlivem šíření tepla pouze neprůhlednými konstrukcemi. Skladby obalových konstrukcí splňují doporučené hodnoty pro pasivní domy [16].



Obr. 6 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, 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 (4.4).

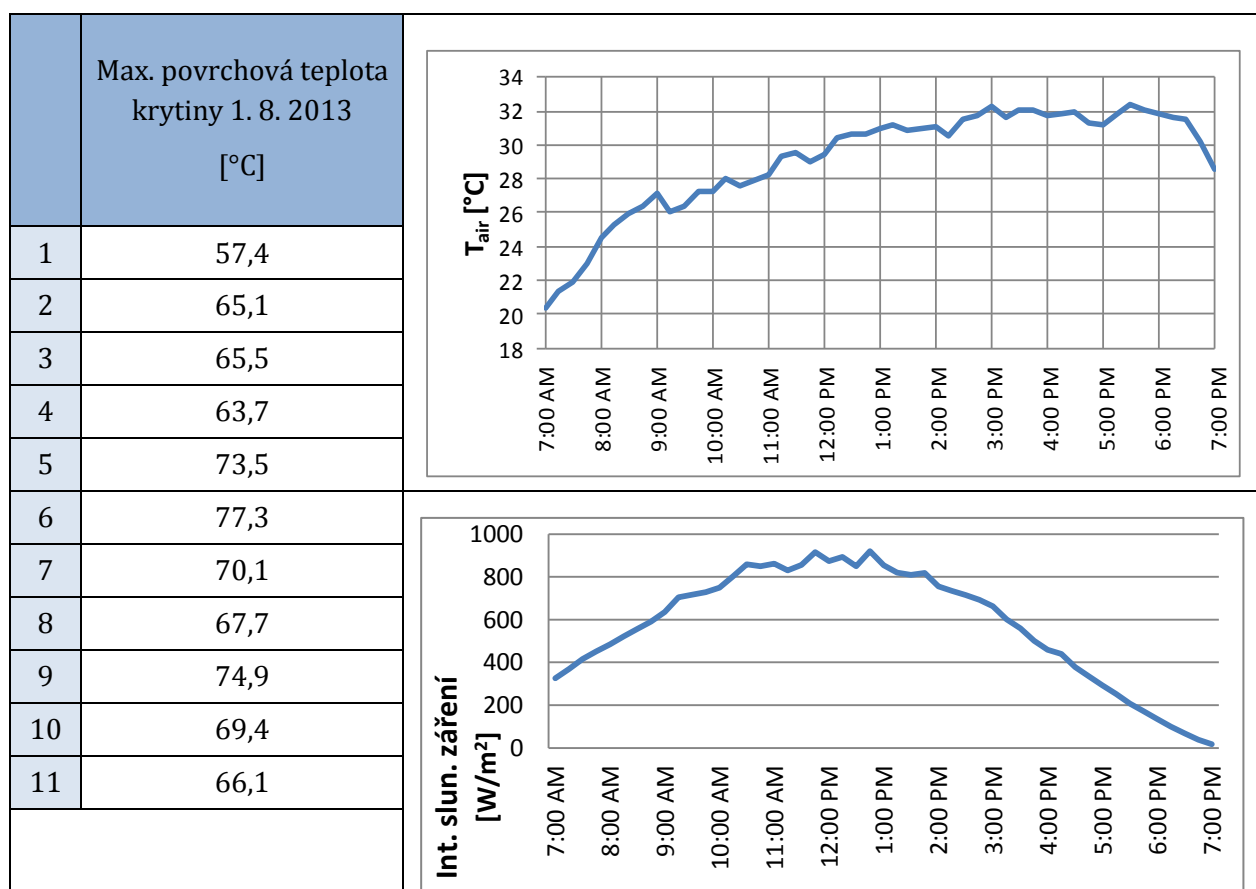
4.6 Maximální teploty vybraných druhů krytin

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, titanizinková, břidlice a plastová (Tab. 4). Cílem měření bylo zjistit, jakých maximálních teplot mohou dosáhnout a jak velké teplotní rozdíly jsou mezi jednotlivými taškami (Tab. 5). Pro hodnocení byl vybrán den 1. srpna, kdy teploty vzduchu dosahovaly vysokých hodnot, a obloha byla jasná. Teplotní čidla byla umístěna ze spodní strany krytiny. Okrajové podmínky jsou uvedeny v grafu v (Tab. 5).

Tab. 4 Materiálové a povrchové vlastnosti měřených střešních tašek [18]

Vz.	Materiál	Povrch	Textura	Barva	Odraživost ρ_{sol} [-]	Pohltivost α_{sol} [-]	Emisivita ϵ_{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. 5 Maximální teploty střešních tašek a okrajové podmínky [18]



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 [24]. Emisivita byla odvozena z technických tabulek [25]. Vyhodnocení maximálních teplot krytin v závislosti na barvě je publikováno samostatně [18].

4.7 Experimentální měření teploty na modelech střešních pláštů



Obr. 7 Model střešního pláště

Pro účely experimentálního měření šíření tepla v lehkých střešních pláštích během letního období byly vyhotoveny dva modely šikmé střechy, každý o dvou polích. Návrh střešní skladby vycházel z nejčastěji realizovaného řešení zastřešení rodinných domů v České republice, tzv. „typické střešní skladby“. 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. 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. 6. 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. $U = 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Tab. 6 Materiálové řešení doplňkové hydroizolační vrstvy a podhledu

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

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. Pro snímání teploty byly využity digitální teplotní snímače Dallas DS18B20. Snímače byly propojeny přes sběrnici s mikropočítačem Raspberry Pi, který pomocí speciálně naprogramovaného softwaru pro tento účel zpracovával a ukládal teplotní data. Podrobnější informace jsou uvedeny v publikaci [26]. 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.

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. Tento projekt využíval podpory 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.

4.8 Testování krycích mřížek na ventilátorové dráze

V rámci porovnávání různých typů krycích mřížek větracích otvorů bylo provedeno experimentální měření na ventilátorové dráze (Obr. 8) ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu (VZLÚ) v Praze [27]. Ventilátorová dráha byla tvořena 7m tunelem o průměru 0,6 m. Na jednom konci byl umístěn ventilátor ovládaný frekvenčním měničem a na druhém konci panel s výřezem pro osazení testovaných mřížek (Obr. 8). 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 s otvory různých tvarů i velikostí a s různou otevřenou plochou byly měřeny tlaky proudícího vzduchu. Vzorky byly vybrány tak, aby byly zastoupeny různé tvary otvorů – kruhové, podélné i čtvercové a různé procento otevřené plochy.



Obr. 8 Ventilátorová dráha ve VZLÚ v Praze, detail osazení mřížky v záklopu [27]

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 byla umístěna v těsné blízkosti mřížky z venkovní strany, ve vzdálenosti 20 mm od mřížky.

5 Výsledky

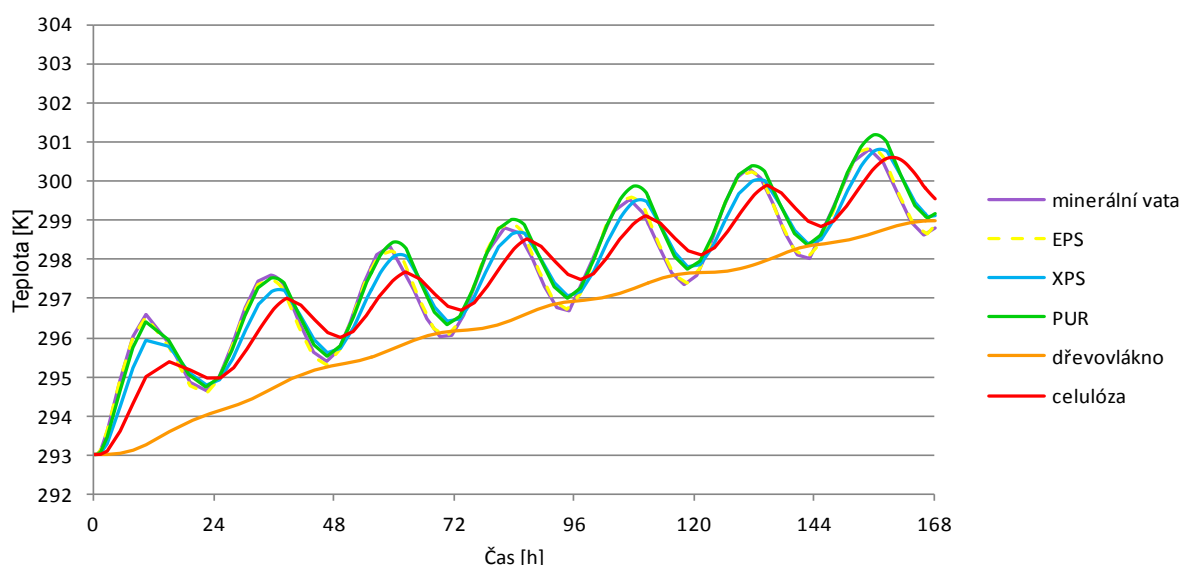
5.1 Analýza hlavních faktorů ovlivňujících šíření tepla ve střešním plášti v letním období

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. Na něm byl zkoumán vliv jednotlivých konstrukčních opatření doporučených pro redukci tepelných zisků

– navýšení plošné tepelné kapacity tepelné izolace; navýšení plošné tepelné kapacity stropního podhledu; kombinace obou opatření; vliv reflexních povrchů a vliv barvy krytiny. Geometrie modelu, okrajové podmínky a podrobnosti výpočtu jsou uvedeny v kapitole 4.4. Následně bylo provedeno dlouhodobé měření na modelech střešních pláštů uvažující s vybranými konstrukčními opatřeními.

5.1.1 Materiál tepelné izolace

Tepelná izolace v „typické střešní skladbě“ bývá tvořena minerální vatou, což nemá příznivý vliv na letní tepelnou stabilitu místností v podkroví. Proto byly prověřeny i jiné materiálové varianty tepelné izolace – EPS, XPS, PUR, dřevovláknno a foukaná celulóza.



Obr. 9 Vliv materiálu tepelné izolace: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní

Tab. 7 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 [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]	$3.36 \cdot 10^4$	$3.18 \cdot 10^4$	$6.18 \cdot 10^4$	$5.25 \cdot 10^4$	$31.50 \cdot 10^4$	$10.00 \cdot 10^4$
plošná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]	840	763	1360	1050	8505	2500

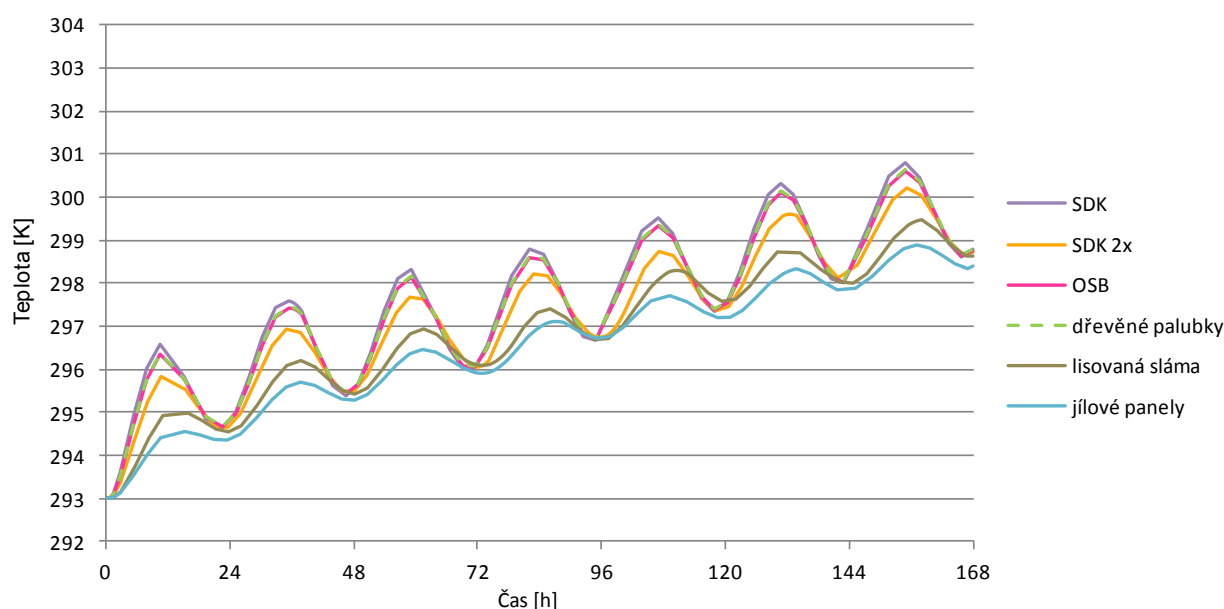
Výsledky simulace (Obr. 9) ukazují, že varianty s minerální vatou, EPS a PUR dosahují téměř shodných teplot na spodním líci střešního pláště. Nepatrně nižších hodnot během dne dosahuje varianta s XPS. Stejný teplotní průběh lze považovat za důsledek podobných hodnot plošné tepelné kapacity těchto čtyř materiálů. 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 $3 \text{ }^\circ\text{C}$), 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.

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. Hodnoty objemové a plošné tepelné kapacity uvádí Tab. 7.

5.1.2 Materiál stropního podhledu

K vytvoření stropního podhledu šikmé střešní konstrukce se nejčastěji používá sádrokarton. Lze však využít i jiné materiály, z nichž některé mají mnohem vyšší tepelně akumulční schopnost. Ve všech variantách počítačové simulace je tepelná izolace tvořena minerální vatou. Jako alternativy podhledu byly vybrány – sádrokartón ve dvou vrstvách, OSB, dřevěné palubky, panely z lisované slámy a jílové panely. Hodnoty plošné tepelné kapacity uvádí Tab. 8.



Obr. 10 Vliv materiálu podhledu: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní

Nejvyšší teploty byly zaznamenány u třech variant současně – s podhledem tvořeným jednou vrstvou sádrokartónu, s OSB deskou a s dřevěnými palubkami. 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.

Při porovnání plošné tepelné kapacity použitých podhledů (Tab. 8) 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 redukci tepelných zisků hodnotám plošné tepelné kapacity. Jílové panely, které dosáhly s přehledem největšího teplotního útlumu, mají téměř 7x větší plošnou tepelnou kapacitu oproti sádrokartonu.

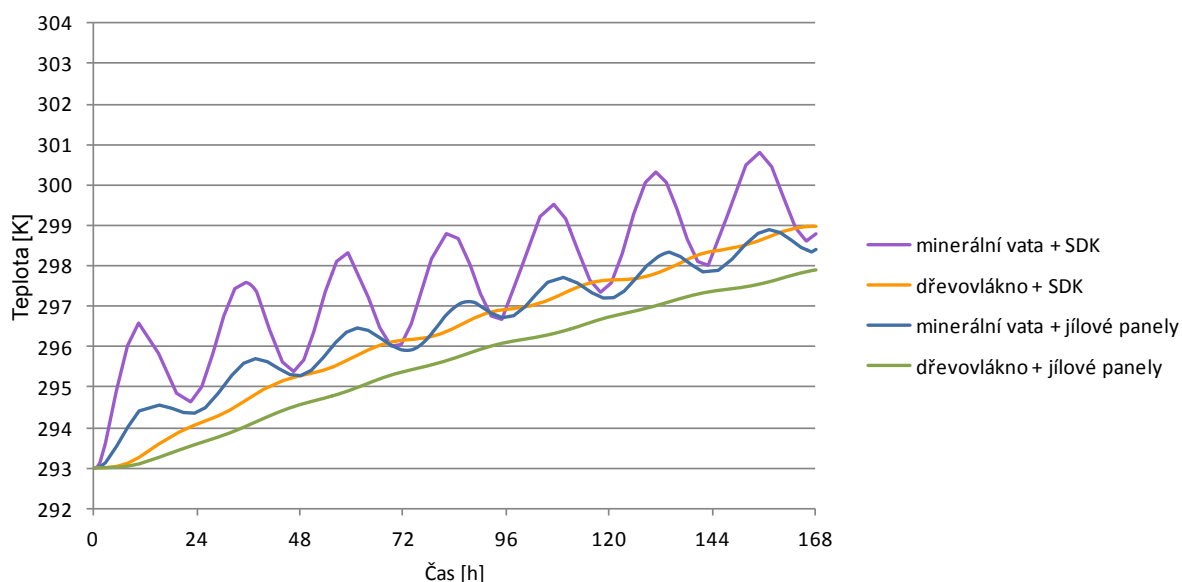
Tab. 8 Stropní pohled – vlastnosti materiálů

	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 [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$]	$79,5 \cdot 10^4$	$79,5 \cdot 10^4$	$97,8 \cdot 10^4$	$100,4 \cdot 10^4$	$61,8 \cdot 10^4$	$319,2 \cdot 10^4$
plošná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$]	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.

5.1.3 Kombinace materiálového řešení tepelné izolace a podhledu

V předchozích kapitolách byl zkoumán vliv zvýšení tepelně akumulční schopnosti tepelné izolace a stropního podhledu na tepelné zisky skrze střešní plášť. Ze všech materiálových variant tepelné izolační vrstvy vykazovala největší teplotní útlum dřevovláknitá izolace. Byla pozorována teplotní redukce až $3\text{ }^\circ\text{C}$ oproti minerální vatě. Při porovnání stropních podhledů dosáhly největšího teplotního útlumu jílové desky, oproti variantě se sádrokartónem činila teplotní redukce až $2\text{ }^\circ\text{C}$. V následující simulaci bylo ověřeno tepelně technické chování skladby při kombinaci dřevovláknité izolace a podhledu z jílových desek.



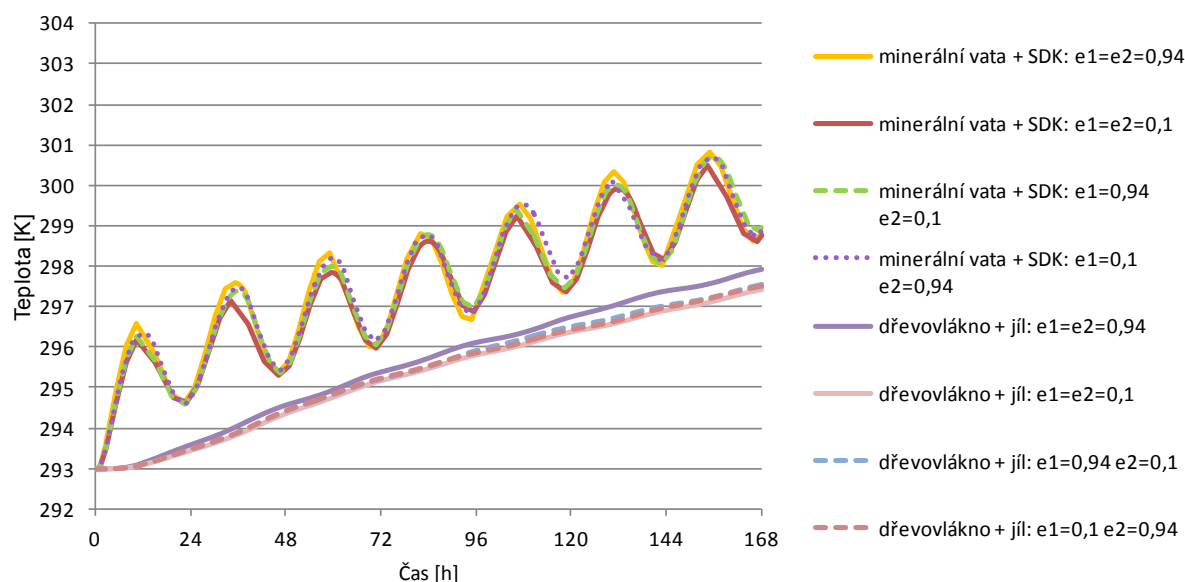
Obr. 11 Vliv kombinace materiálů tepelné izolace a podhledu: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní

V grafu na Obr. 11 je uvedeno srovnání všech kombinací izolace (minerální vata a dřevovlákneno) a podhledu (sádrokartón a jílové panely). 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 sádkartonovým 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 dát přednost variantě s dřevovláknitou izolací. Nejlepšího výsledku je každopádně dosaženo kombinací dřevovláknité tepelné izolace a podhledu z jílových panelů, kde redukce činí 3,5 °C oproti variantě bez konstrukčních opatření. Dokonce i během sedmého dne teplého období je teplotní útlum stejně výrazný.

5.1.4 Reflexní povrchy

Několik výzkumů potvrdilo redukcii tepelných zisků přes obvodový plášť vlivem umístění reflexní fólie do skladby. Proto bylo navrženo několik variant umístění reflexního povrchu – na spodním líci krytiny ($\epsilon_1 = 0,1$; $\epsilon_2 = 0,94$), na horním povrchu tepelné izolace ($\epsilon_1 = 0,94$; $\epsilon_2 = 0,1$) a na obou pozicích ($\epsilon_1 = 0,1$; $\epsilon_2 = 0,1$). Kromě klasického provedení skladby z minerální vaty a sádkartónu 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. 12.

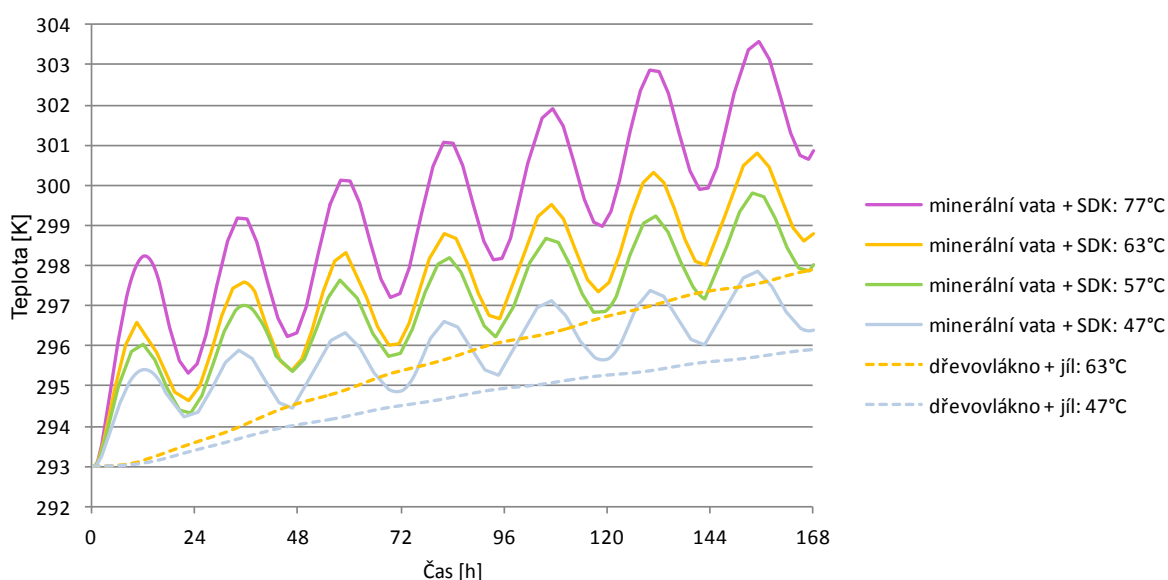


Obr. 12 Vliv reflexních povrchů: Teploty na líci stropního podhledu v periodě 7 dní

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. Tendence vývoje teplot na stropním povrchu naznačuje, že aplikace reflexních povrchů by mělo význam při teplém období delším než 1 týden. U skladby s klasickými materiály umístění reflexního povrchu nehraje 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 5.2.1.

5.1.5 Barva krytiny

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. [18] 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 uvedené v předchozích kapitolách byly zpracovány pro rovnocennou sluneční teplotu s maximy dosahujícími 63 °C, což odpovídá páleným taškám střední barvy. 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 [18] , tj. 57 °C, lze teplotu redukovat o další 1 °C. Další teplotní redukce lze docílit použitím střešní krytiny s vysokou odrazivostí, např. v bílé barvě. 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. 13), 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.



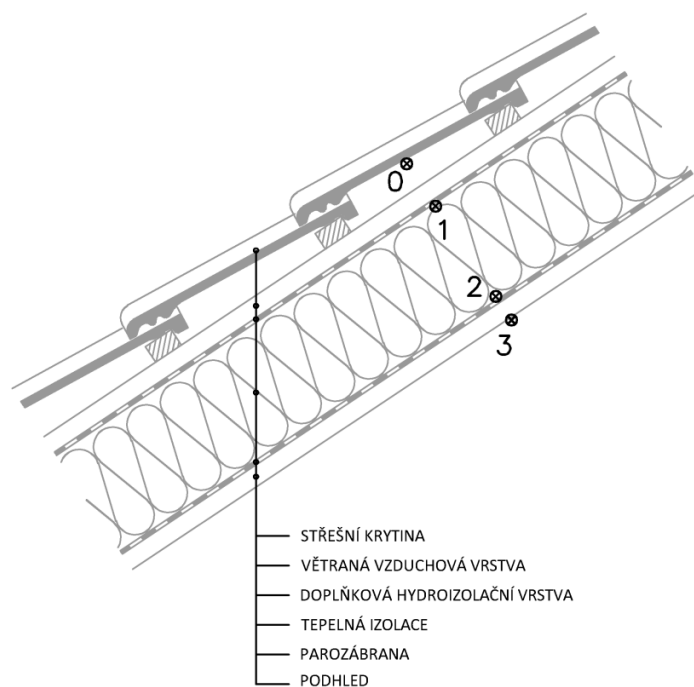
Obr. 13 Vliv barvy krytiny: Teploty na líci stropního pohledu v periodě 7 dní

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 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 °C.

5.1.6 Experimentální ověření účinnosti vybraných variant

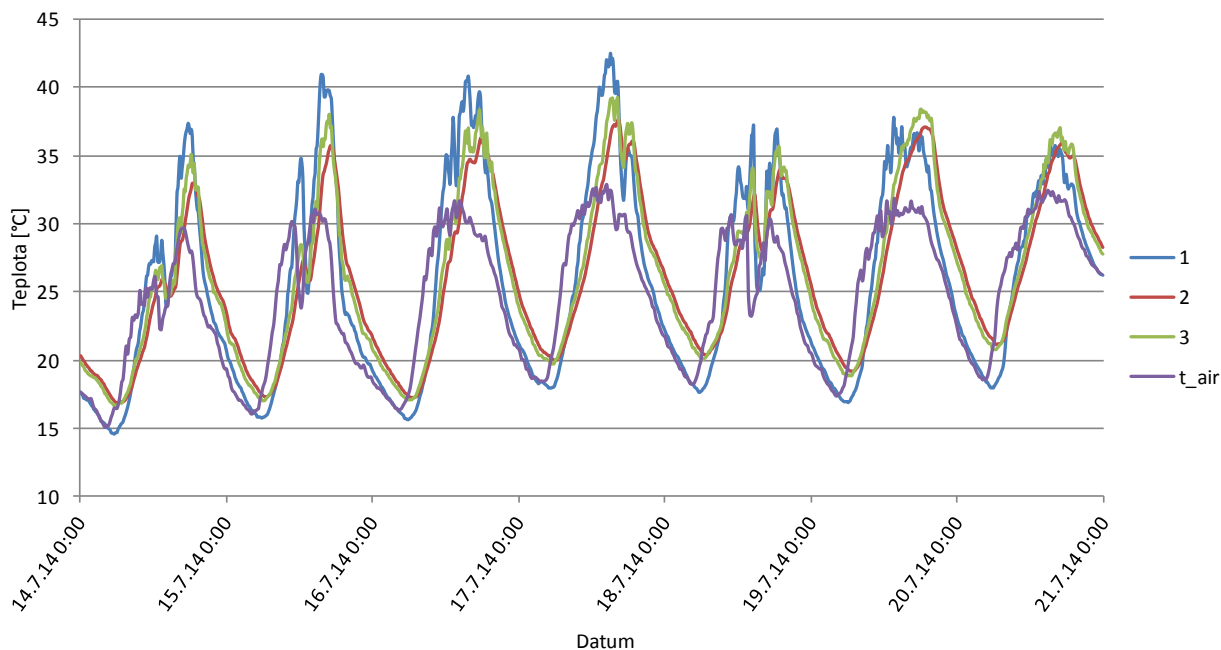
Na modelech střešních pláštů blíže popsanych v kapitole 4.7 byly měřeny teploty ve skladbě po celé letní období roku 2014. Pro vyhodnocení výsledků bylo vybráno měřené období 14.7. – 20.7. 2014, kdy klimatické podmínky nejlépe odpovídaly charakteru teplých letních dnů, tj. vysoká teplota vzduchu a slunečné počasí. Denní maxima teploty vzduchu (viz t_{air} na Obr. 15) 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⁻² (Obr. 16). Poloha teplotních snímačů je označena 1 – 3, viz Obr. 14 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. 15, kde je uveden i průběh venkovní teploty vzduchu.

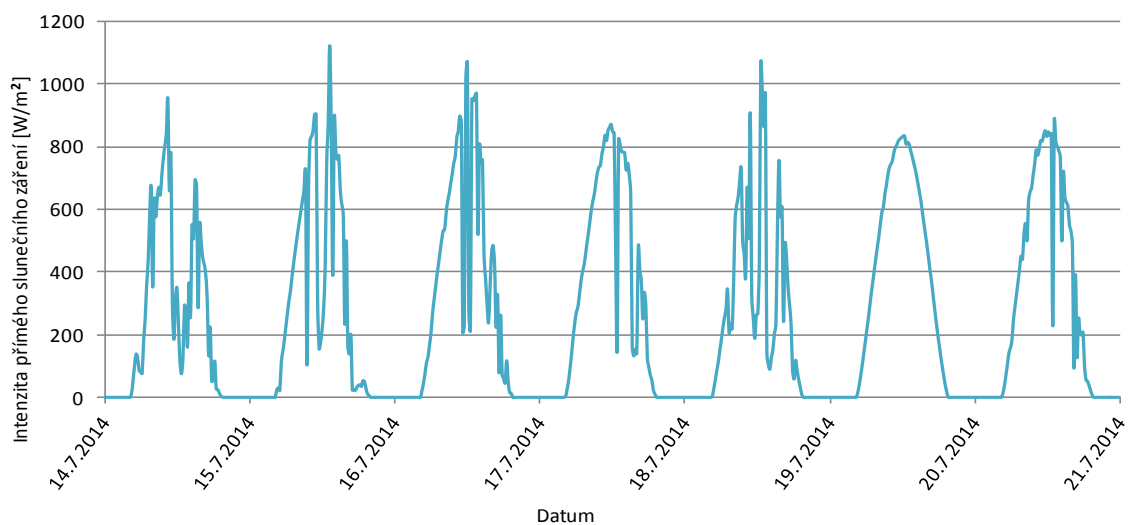


Obr. 14 Poloha teplotních snímačů ve střešní skladbě

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 Biwolle et al. [5], 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, 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. Typ podstřešní 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.

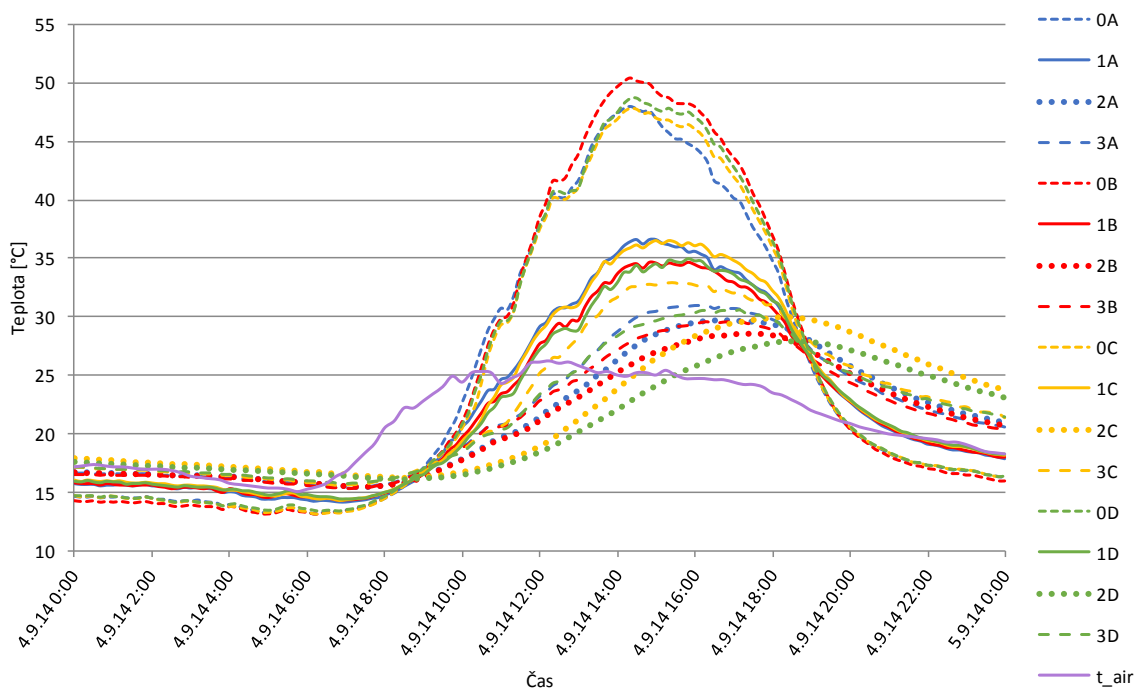


Obr. 15 Rozložení teplot v modelu střešního pláště – pole A (SDK + šedá fólie)



Obr. 16 Intenzita přímého slunečního záření v období 14. 7. -21. 7. 2014

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. Všechny skladby byly doplněny o jeden teplotní snímač na spodním líci krytiny, poloha 0 (Obr. 14). Oproti předchozímu vyhodnocení týdenního období je tentokrát zaměřena pozornost na vývoj teplot ve skladbách během denního cyklu. V Obr. 17 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.



Obr. 17 Teplotní průběhy ve všech polích modelů střešních skladeb pro den 4. 9. 2014

5.2 Vlivy konstrukčního řešení na proudění ve větrané vzduchové vrstvě

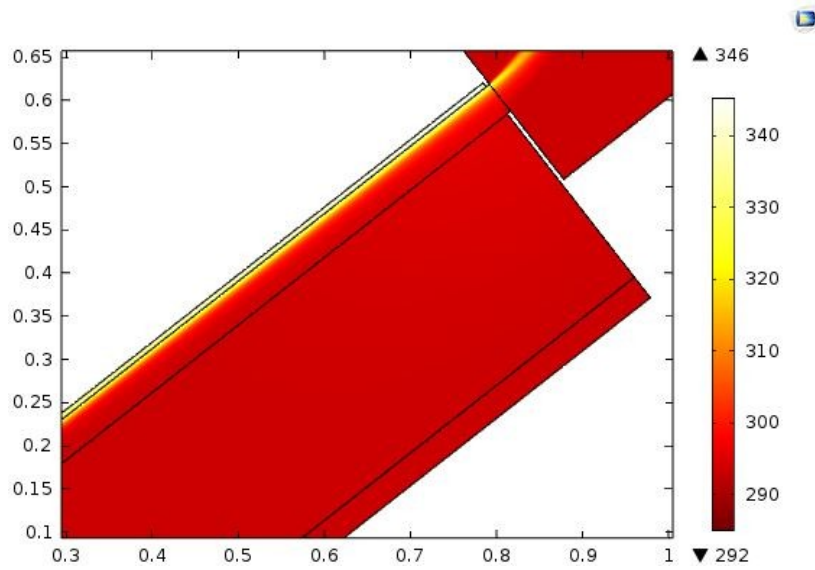
Větraná vzduchová dutina má sloužit primárně pro odvod vlhkosti ze střešní konstrukce, ale může sloužit též k odvodu přebytečného tepla. Během horkých letních dní za slunečního počasí dochází k rozehrátí krytiny až k 70 °C. Je-li prostor bezprostředně pod krytinou odvětrán, je značná část tepla odvedena pryč ze skladby, aniž by musela být akumulována ve skladbě.

5.2.1 Vliv sálání mezi horním a dolním pláštěm na proudění v dutině

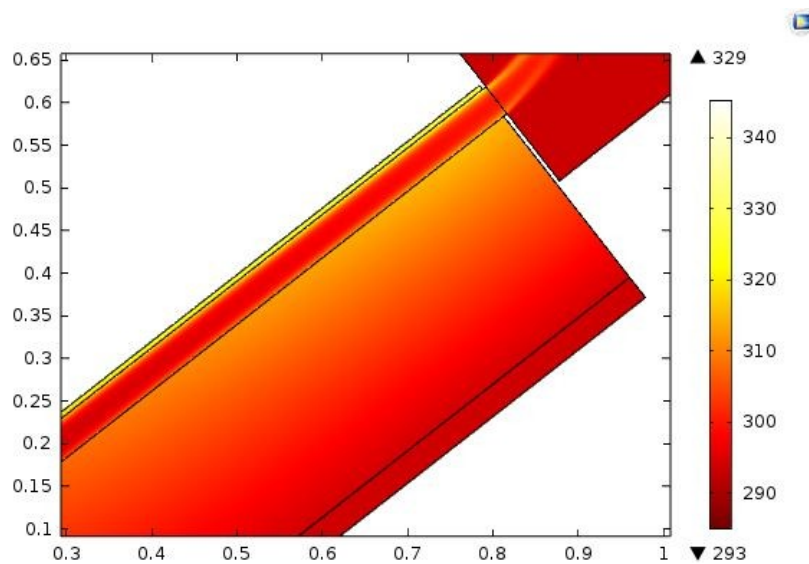
Emisivita vnitřních povrchů v mezistřešní dutině je klíčová pro přenos tepla mezi horním a dolním pláštěm. Určuje rovněž teploty těchto povrchů, což má zásadní vliv na vznik mezních vrstev, tedy vznik přirozeného proudění. V této kapitole je pozornost soustředěna na to jakým způsobem ovlivňuje složka radiace proudění vzduchu v dutině. Reflexní povrchy s velmi nízkou hodnotou emisivity transportují tak malé množství tepelné energie, že lze sálavou složku zanedbat. U běžných povrchů je uvažováno s emisivitou $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$.

Šíření tepla spodním pláštěm je graficky znázorněno v 2D rozložení teplot:

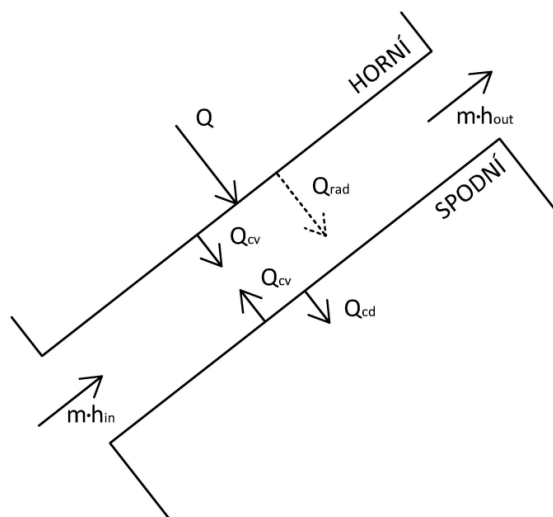
- u nízkoemisivních povrchů (Obr. 18) ve větrané dutině nedochází k přenosu tepla na spodní plášť a tepelná izolace zůstává chladná v celé své tloušťce. Tepelná mezní vrstva je pouze podél povrchu horního pláště a dosahuje vyšších teplot než u varianty s běžnými povrchy.
- u běžných povrchů s vysokou emisivitou dochází k výraznému ohřívání spodního pláště. Na Obr. 19 lze vidět prohřátou oblast tepelné izolace přiléhající k větrané vzduchové vrstvě. Tepelná mezní vrstva je přítomna podél obou povrchů.



Obr. 18 Rozložení teplot ve střešním plášti – nízká emisivita povrchů ve větrané dutině (bez sálání)

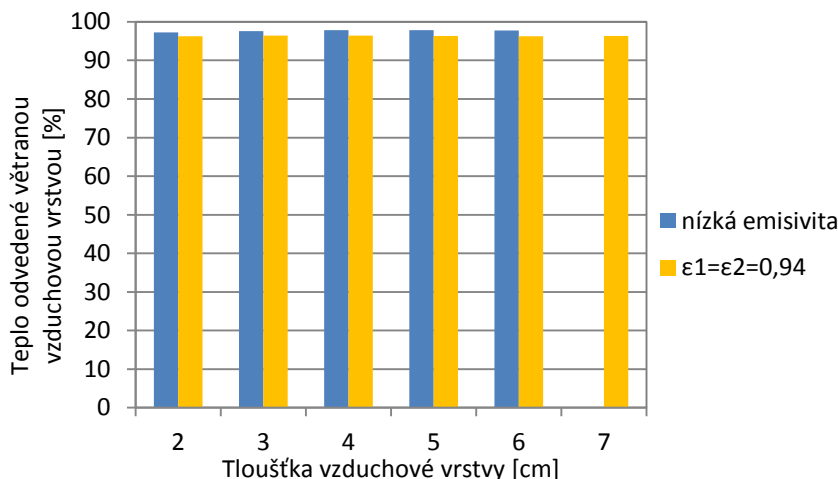


Obr. 19 Rozložení teplot ve střešním plášti – vysoká emisivita povrchů ve větrané dutině $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,94$



Obr. 20 Distribuce tepla ve střešní konstrukci

Pro obě varianty střešního pláště byla provedena tepelná bilance [28]. Na Obr. 20 je schéma se znázorněním veličin, které vystupují v tepelné bilanci. Tepelná bilance střešního pláště je provedena pro tloušťky vzduchové vrstvy 2 – 7 cm v krocích po 1 cm. Tab. 9 uvádí jednotlivé složky tepla a také procentuální podíl tepla odváděného větranou vzduchovou vrstvou k teplu přijímanému povrchem střešního pláště, tj. účinnost větrání vzduchové vrstvy.



Obr. 21 Účinnost větrané vzduchové vrstvy

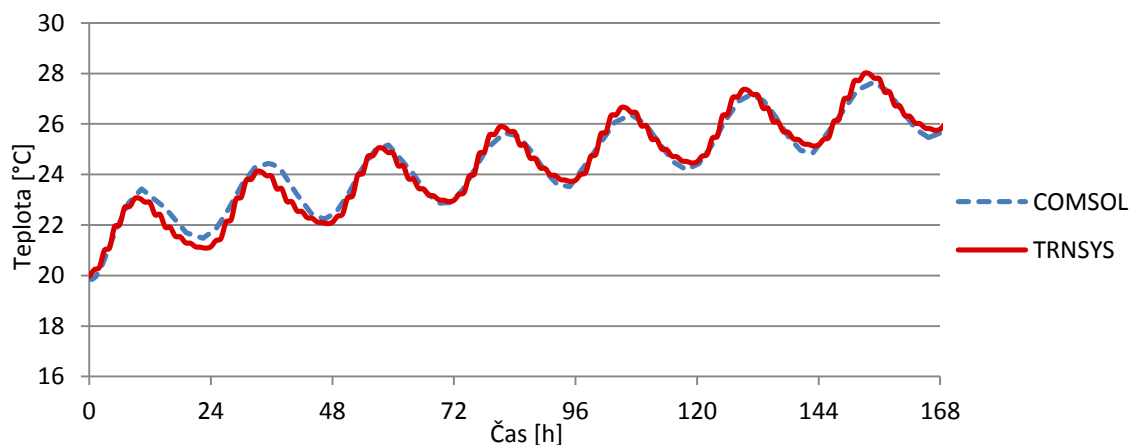
Vyhodnocení účinnosti větrání vzduchové vrstvy se zakládá na okrajových podmínkách pro ustálený teplotní stav, kdy venkovní podmínka odpovídá denním teplotním maximům a interiérová podmínka je také fixní. Za těchto podmínek je rozdíl v účinnosti v závislosti na tloušťce vzduchové vrstvy zanedbatelný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

Tab. 9 Tepelná bilance střešního pláště

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 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,94$								
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 %

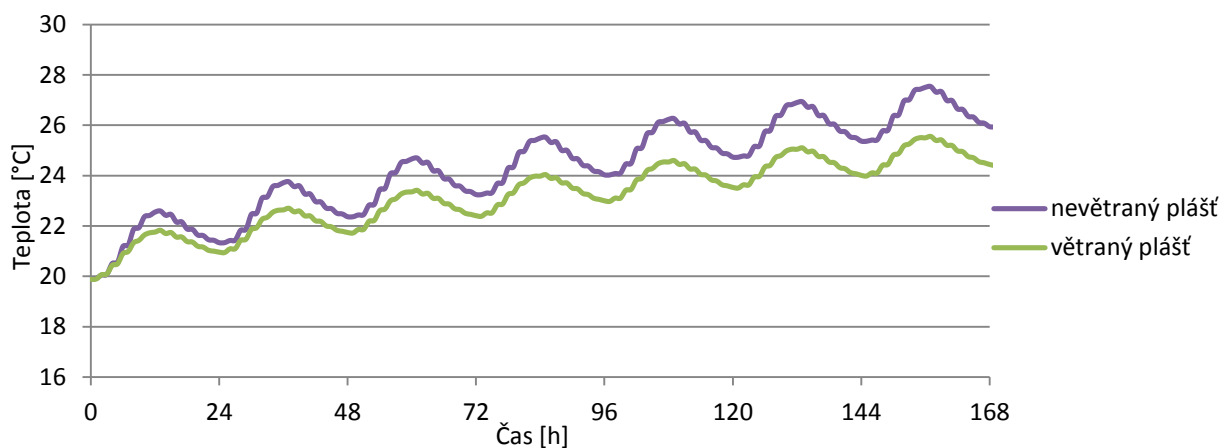
5.2.2 Tepelná bilance větraného střešního pláště oproti nevětrané variantě

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 ve výpočetním softwaru TRNSYS. Porovnáním výstupů z obou programů byla nalezena uspokojivá shoda srovnávané veličiny – teploty líce stropního pohledu. Na Obr. 22 je zachycen vývoj teploty pohledu v období 7 dnů z obou programů pro variantu střešního pláště s tepelnou izolací z minerální vaty.



Obr. 22 Teplota stropního pohledu ve variantě tepelné izolace z minerální vaty – porovnání hodnot ze simulace z COMSOLu a TRNSYSu

Stejný 3D model byl použit i pro větranou variantu střešního pláště. Byla zachována shodná skladba, pouze ve střešním plášti byla umístěna větraná dutina tloušťky 40 mm. Porovnání teplot stropního pohledu z programu TRNSYS u větrané a nevětrané varianty nabízí Obr. 23.

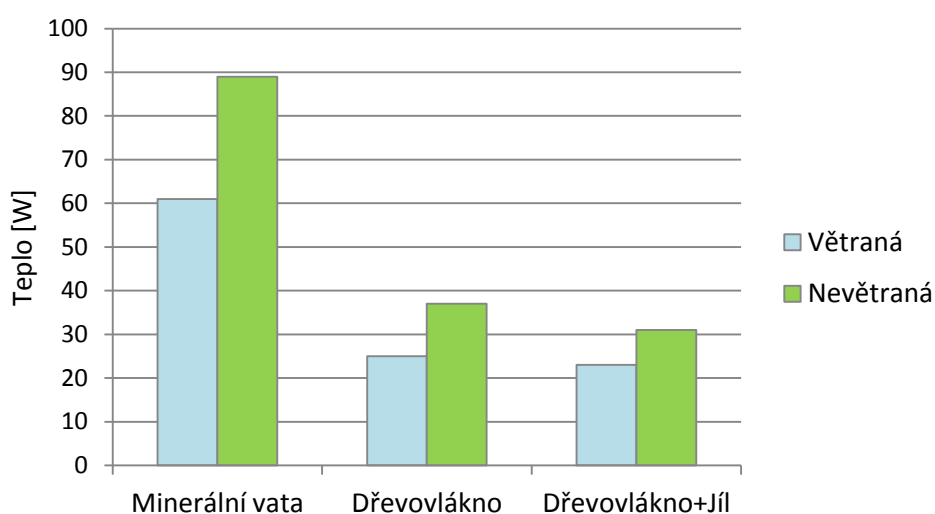


Obr. 23 Teplota stropního pohledu ve variantě větraného a nevětraného střešního pláště s tepelnou izolací z minerální vaty, hodnoty ze simulace v TRNSYSu

Již během prvního dne teplého období vykazuje dynamická simulace podkrovní místnosti nižší teploty pohledu u větrané varianty oproti nevětrané a každým dnem narůstají. Stejně porovnání bylo provedeno i pro střešní skladbu s tepelnou izolací z dřevovláknem. Rozdíl v teplotě

stropního povrchu mezi větraným a nevětraným střešním pláštěm se začíná projevovat až třetí den teplého období a postupně se zvyšuje.

Celkové porovnání tepla pronikajícího do interiéru střešním pláštěm pro všechny uvedené varianty nabízí graf v Obr. 24. 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“.



Obr. 24 Teplo procházející do interiéru střešním pláštěm v době denního teplotního maxima

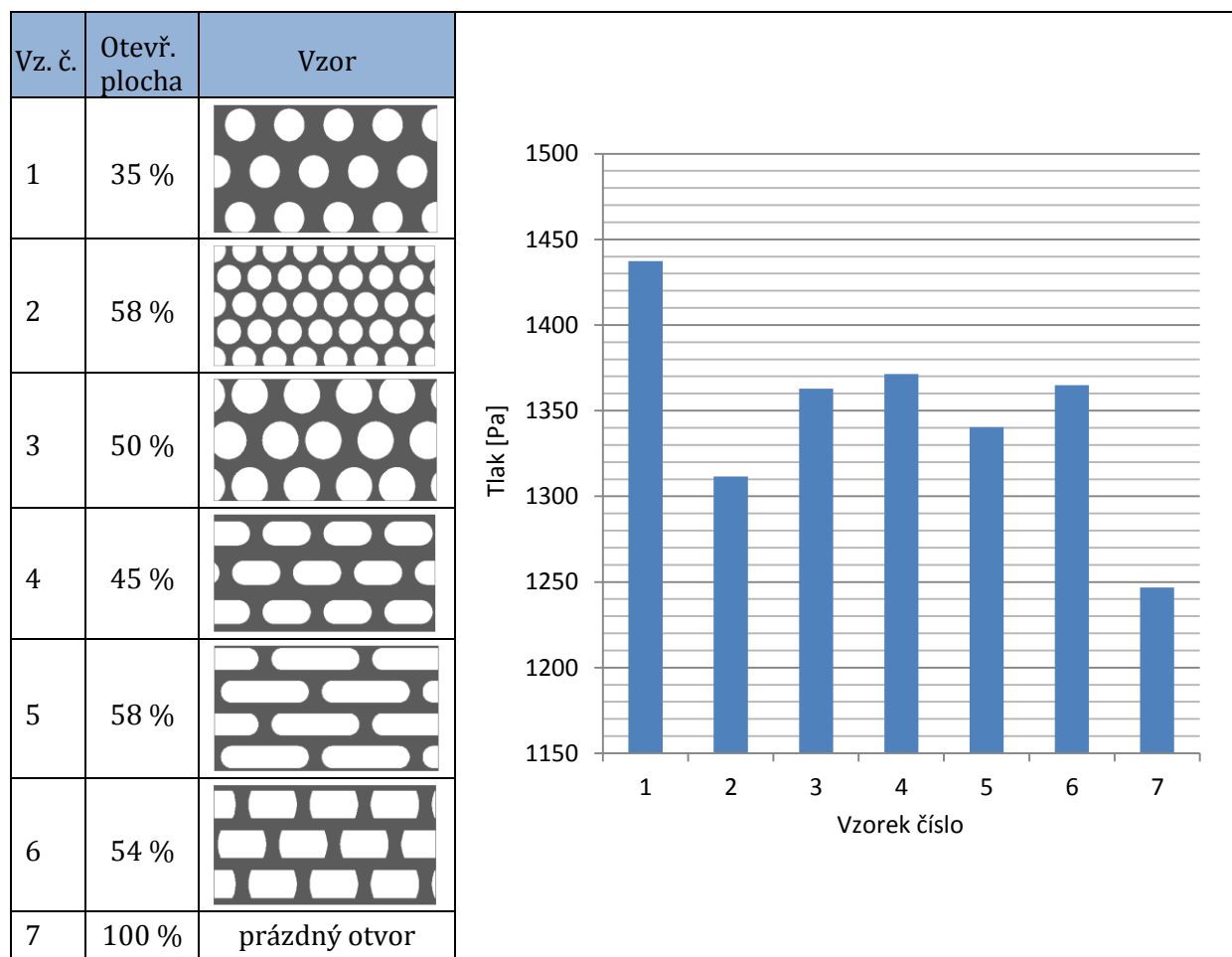
Provedením posouzení tepelné bilance větrané a nevětrané střešní konstrukce je zřejmý pozitivní vliv větrané vzduchové vrstvy na tepelné namáhání interiéru.

5.2.3 Krycí mřížky větracích otvorů

Kvůli prověření propustnosti 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. Z výsledků měření (Tab. 10) 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. Další postup zahrnoval návrh třinácti mřížek se shodnou otevřenou plochou, která u všech variant činila 58 %, viz Tab. 11. 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 mřížky. Navržené mřížky byly vymodelovány ve 3D v simulačním softwaru ANSYS TRX [29].

Tab. 10 Vzorky testovaných mřížek a jejich tlakový spád [27]

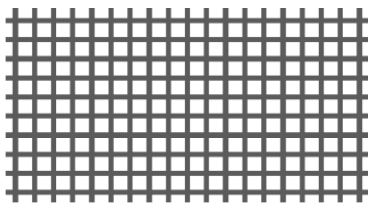


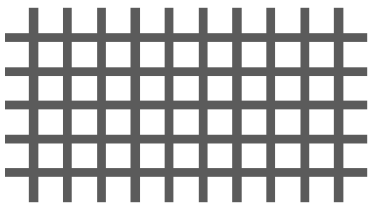
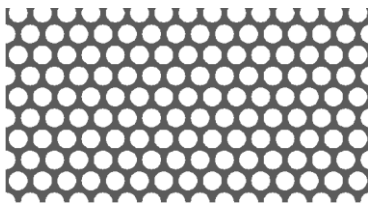
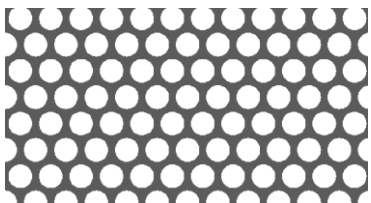
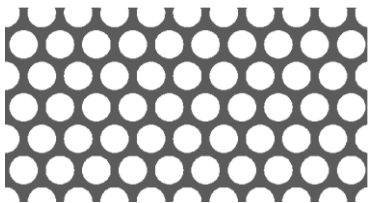
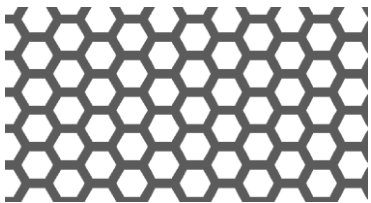
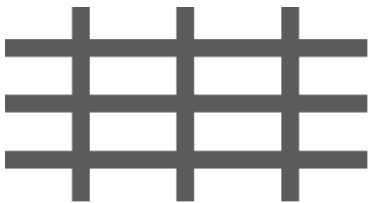
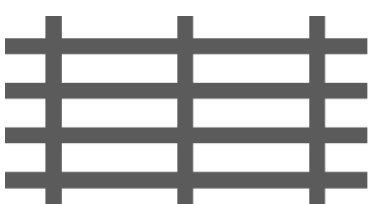

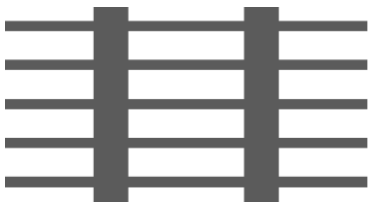
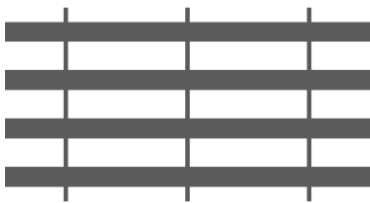


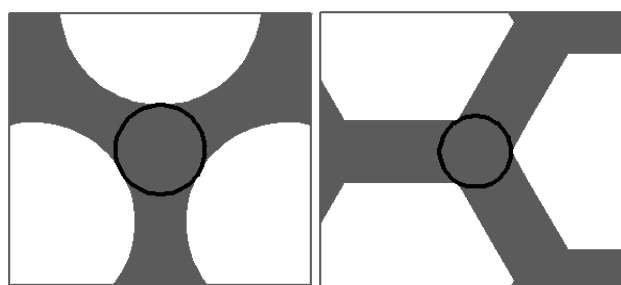
Porovnáním celkového tlaku před jednotlivými mřížkami lze odvodit, které mřížky dovolí snadnější průstup vzduchu skrze ně. V rámci několika analýz byly prověřeny jednotlivé parametry tvaru otvorů:

- vliv velikosti otvorů;
- vliv tvaru otvorů;
- vliv poměru stran obdélníkových otvorů;
- vliv nestejnosti mřížky.

Výsledky simulace ukazují znatelné rozdíly v hodnotě celkového tlaku před mřížkou. Jako nejpropustnější, představující nejmenší odpor pro proudící vzduch, je mřížka 1a (s malými čtvercovými otvory), je zde výrazně nižší tlak než u všech ostatních 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. U všech simulovaných mřížek lze pozorovat, že vzorky se subtilnějšími uzlovými body (Obr. 25) představují menší překážku pro proudící vzduch. V rámci dalšího pokračování projektu byly vyrobeny prototypy vybraných mřížek – 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. 11 Geometrie navržených větracích mřížek s otevřenou plochou 58 % [29]

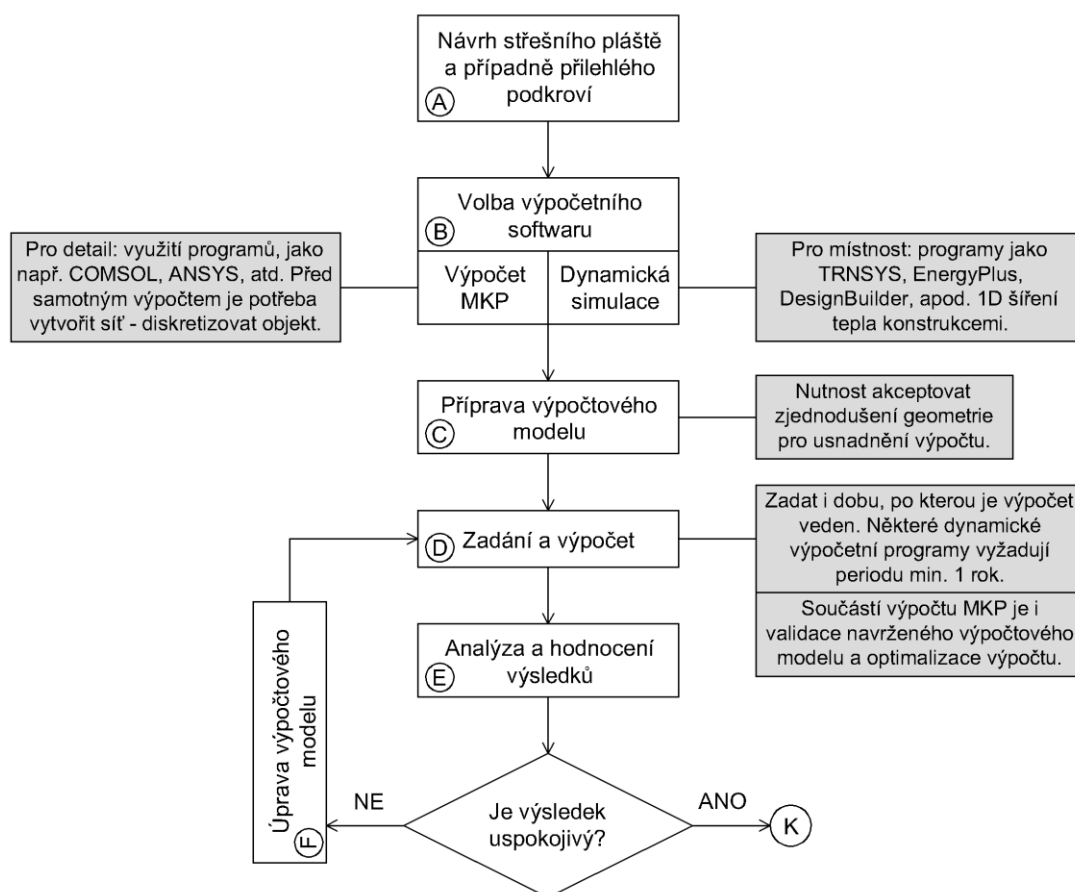
 <p>1a - oko 3 x 3 mm mříž 0,94 mm</p>	 <p>1b - oko 6 x 6 mm mříž 1,88 mm</p>	 <p>1c - oko 12 x 12 mm mříž 3,76 mm</p>
 <p>1d - oko 5,32 x 5,32 mm mříž 1,67 mm</p>	 <p>2a - oko \varnothing 4 mm mříž 1 mm</p>	 <p>2b - oko \varnothing 5 mm mříž 1,25 mm</p>
 <p>2c - oko \varnothing 6 mm mříž 1,5 mm</p>	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



Obr. 25 Detail uzlového bodu mřížek 2c a 3a [29]

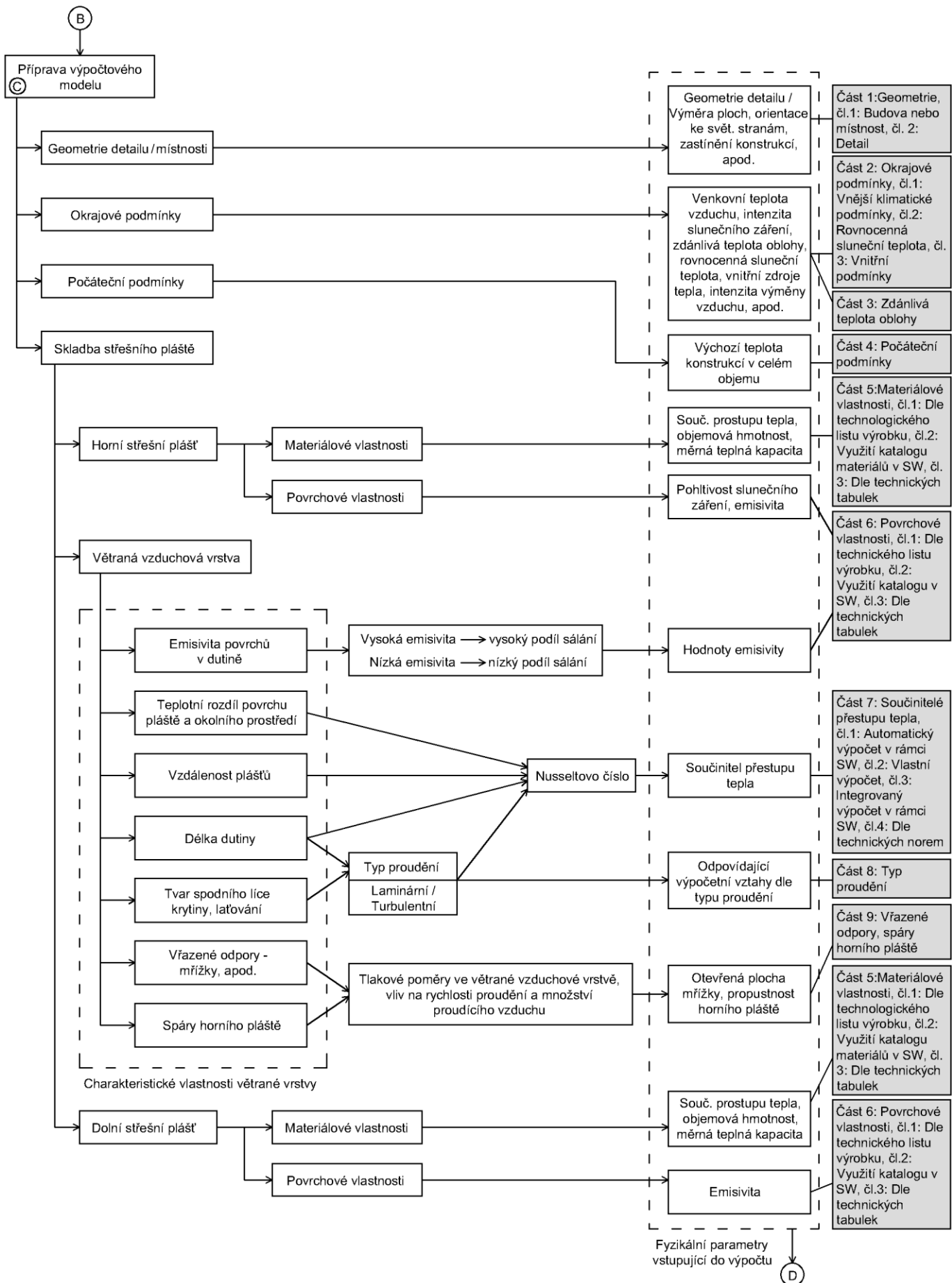
5.3 Sjedený postup při výpočtu šíření tepla střešním pláštěm

V rámci disertační práce byl navržen standard metodiky provádění přesných tepelně technických výpočtů dvouplášťových střešních konstrukcí. Snahou bylo vytvořit přehledný postup provedení tepelně technického výpočtu střešního pláště, zahrnujícího větranou vzduchovou vrstvu. Na Obr. 26 je zachycen vývojový diagram tepelně technického výpočtu pro větraný střešní plášť nebo pro podkrovní místnost s přilehlým větraným střešním pláštěm. Dle typu zvoleného softwaru probíhá příprava výpočtového modelu. Metodický postup při analýze střešního pláště a následné přípravě dat vstupujících do výpočtu uvádí Obr. 27. V pravé části diagramu (Obr. 27) je čárkovaně vyznačena oblast, kde jsou uvedeny fyzikální veličiny a informace vstupující do výpočtu, které jsou klíčové pro vytvoření funkčního výpočtového modelu. 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. 26 Postup tepelně technického výpočtu střešního pláště či podkrovní místnosti

Navrhovaný standard je pomocným nástrojem, jak se rychle v dané problematice zorientovat. Většina dostupné literatury se zabývá výpočtem doporučeným v normě. 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, s níž mohou studenti nebo začínající specialisté na tepelnou techniku a energetiku staveb snadněji zvolit vhodné postupy a vztahy pro výpočet potřebných koeficientů a veličin.



Obr. 27 Metodický postup přípravy výpočtového modelu šikmého střešního pláště

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 doporučená 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 5.2.2. To však za předpokladu, že bude vzduch v dutině proudit, a tím z dutiny unášet přebytečné tepelné zisky. Současné řešení detailu hřebene (Obr. 28) je určeno pro odvedení přebytečné vlhkosti ze skladby a neumožňuje odvádění teplého vzduchu, který se hromadí se pod krytinou. 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 „hřebenová větrací tvarovka“, která v sobě spojuje funkci krycí i větrací.

Výhodami hřebenové větrací tvarovky jsou:

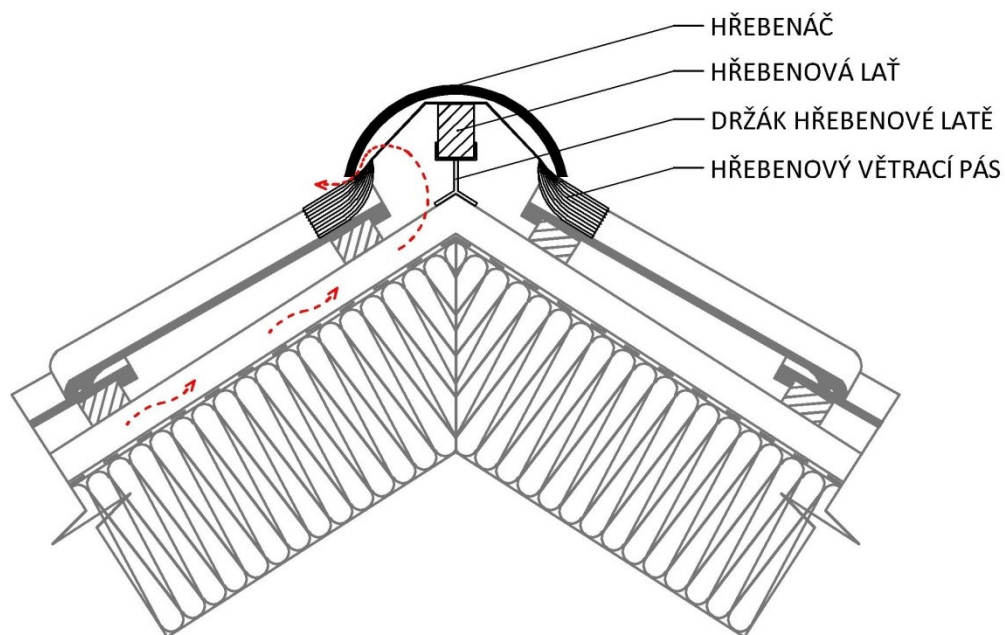
- představuje nesrovnatelně menší odpor pro proudění vzduchu ven z dutiny;
- umožní liniové větrání po celé délce hřebene;
- spojuje více prvků do jediného výrobku;
- aplikovatelné na stávající střešní konstrukce.

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 krytina.

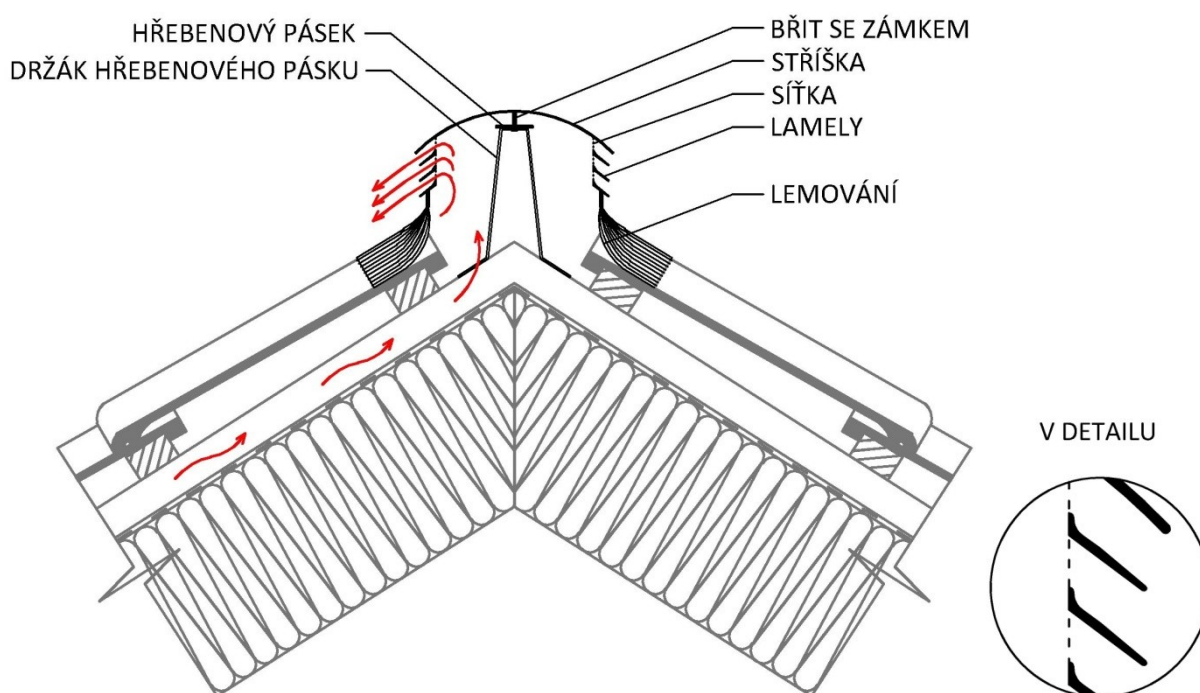
Konstrukce hřebenové větrací tvarovky (Obr. 29) sestává ze stříšky zaobleného tvaru umožňující snadný odvod srážek, z bočnic tvořených větracími lamelami a lemováním pro utěsnění prostoru mezi hřebenem a krytinou. Lamely jsou na vnitřní straně opatřeny nosem bránícím odstříkující vodě vnikat do prostoru hřebene. V podélném směru jsou lamely uchyceny k příčlím pro zvýšení jejich prostorové tuhosti. Tvarovka je vynášena držáky a hřebenovým páskem.

Prostor mezi jednotlivými lamelami umožňuje volný pohyb vzduchu, ale zároveň brání vniknutí ptactva, nebo např. kun. Současně chrání mezistřešní prostor proti atmosférickým srážkám, k čemuž přispívá i sklon lamel a jejich zakončení nosem, viz detail na Obr. 29.

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 je nepatrně vyšší. Celkový tvar a rozměr nového hřebene je podobný současnému řešení detailu, tudíž jejich záměnou nedojde k estetickému narušení střešní konstrukce.



Obr. 28 Současné řešení detailu střešního hřebene



Obr. 29 Nové řešení detailu střešního hřebene pomocí „hřebenové větrací tvarovky“

6 Přínosy a závěr

V poslední době se přehřívání podkrovních místností stává aktuálním tématem, díky zvyšujícím se teplotám během letního období. O lehkých konstrukcích je známo, že nejsou schopny po delší dobu odolávat vysokým teplotám a brzy dojde k jejich prohřátí. Ústředním tématem této disertační práce bylo zvoleno detailní zkoumání šíření tepla ve střešním plášti a ve větrané vzduchové dutině, a to na pláštích splňující hodnotu součinitele tepla doporučenou pro pasivní

budovy. Byly provedeny studie pro vyhodnocení míry vlivu doporučených konstrukčních řešení pro snížení tepelných zisků střešním pláštěm. Těmi jsou zejména:

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

Na základě těchto studií bylo provedeno vyhodnocení, jakou měrou jsou daná opatření schopna redukovat tepelné zisky. Podrobnějšímu zkoumání byla podrobena větraná vzduchová vrstva, kde bylo sledováno teplotní a rychlostní pole a vyčísleny součinitele přestupu tepla pro různé dimenze dutiny.

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 či odborné veřejnosti pro snadnou a rychlou orientaci v dané problematice.

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, bylo redukováno teplotní namáhání interiéru. Zároveň toto opatření nemělo být finančně příliš náročné, tak aby bylo dostupné pro širokou veřejnost. Na základě poznatků získaných z dílčích studií, jež jsou prezentovány v této práci, bylo navrženo inovativní řešení oblasti hřebene dvouplášťové střechy, kde současným řešením není zabezpečeno dostatečné odvětrání větrané dutiny. Navržená „hřebenová větrací tvarovka“ významně zvýší proudění v dutině, a umožní liniové odvádění teplého vzduchu v oblasti hřebene.

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;
- odbornou veřejnost – konstrukční doporučení pro zvýšení efektivity větrání vzduchové vrstvy;
- odbornou veřejnost a studenty, 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.

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. Těmi například jsou: 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.

7 Bibliografie

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] W. Puangsombut, J. Hirunlabh, J. Khedari, B. Zeghmami 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] A. Dimoudi, A. Androutsopoulos a S. Lykoudis, „Summer performance of a ventilated roof component,” *Energy and Buildings*, č. 38, pp. 610-617, 2006.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] L. Azevedo a E. Sparrow, „Natural convection in open-ended inclined channels,“ *Journal of Heat Transfer*, č. 107, pp. 893-901, 1985.
- [16] ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [17] ČSN 73 1901 *Navrhování střech – Základní ustanovení*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [18] S. Svobodová a L. Matějka, „Maximum Temperatures of Roof Tiles during the Summer Period,“ *Advanced Materials Research*, č. 1041, pp. 303-306, 2014.
- [19] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergmann a A. S. Lavine, *Foundations of heat transfer*, 6. vydání editor, Singapur: John Wiley & sons, 2012.
- [20] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, 2. vydání editor, New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] *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.
- [25] J. Vaverka, F. Mrlík a J. Chybík, *Stavební fyzika 2, Stavební tepelná technika*, Brno: VUTIUM, 2000.
- [26] D. Zuth, P. Matyáš a S. Svobodová, „Sběr teplotních údajů při použití jednodeskového počítače,“ *Automa*, č. 1, pp. 48-50, 2015.
- [27] S. Svobodová, „Experimentální testování krycích mřížek větracích otvorů na ventilátorové dráze,“ v *Juniorstav 2015*, Brno.
- [28] 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]
- [29] 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]