



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

TEPELNĚ-VLHKOSTNÍ A AKUMULAČNÍ VLASTNOSTI TĚŽKÝCH KONSTRUKCÍ ŠIKMÝCH STŘECH

HEAT-MOISTURE AND HEAT STORAGE PROPERTIES OF HEAVY STRUCTURES OF SLOPING
ROOFS

TEZE

THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Pilný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUBOR KALOUSEK, Ph.D.

BRNO 2021

KLÍČOVÁ SLOVA

Šikmá střecha, hmotný plášť, hmotná skladba šikmého střešního pláště, tepelná akumulace stavby, tepelná stabilita, přehřívání stavby, tepelně-vlhkostní chování, WUFI, DesignBuilder, numerická simulace, optimalizace návrhu skladby.

ABSTRAKT

Hmotné pláště šikmých střech jsou stále častěji zakomponovány do běžné výstavby rodinných domů, bytových domů a jiné občanské vybavenosti. Díky vzrůstajícím požadavkům na úsporu energie v podobě stále se zpřísnujících hodnot součinitelů prostupu tepla a jiných tepelně technických nároků jsou tyto konstrukce odpovědí, jak požadavků snáze dosáhnout. Dále jsou schopny ovlivnit pasivní tepelnou stabilitu interiérů a tím vyřešit nejen otázku přehřívání staveb, ale také dosáhnout energetické úspory v případě teplotní stabilizace interiéru během celého roku. Při nedostatečném pochopení těchto na tepelně-vlhkostní a akumulární chování odlišných konstrukcí však hrozí opačný efekt a nebezpečí zhoršení stavu. Je tedy nutné těmto konstrukcím lépe porozumět z hlediska chování a dopadu, který má jejich použití na stavbu samotnou. Stejně tak je žádoucí pochopit vliv změny jejich dílčích materiálových vlastností a skladby samotné na fungování tepelně-vlhkostních a akumulárních vlastností skladeb, které těmito materiály disponují.

KEYWORDS

Sloping roof, heavy cladding, heavy material composition of sloping roof cladding, heat storage of the building, thermal stability, overheating of the building, heat-moisture behaviour, WUFI, DesignBuilder, numerical simulation, optimization of the structure design.

ABSTRACT

The heavy claddings of sloping roofs are increasingly being incorporated into the common constructions of family houses, apartment buildings and other civic amenities. Thanks to the increasing demands for energy savings in the form of ever-tightening values of heat transfer coefficients and other thermal engineering requirements, these designs are the answer to how to achieve the requirements more easily. Furthermore, they are able to influence the passive thermal stability of interiors and thus solve not only the issue of overheating of buildings, but also to achieve energy savings in the case of thermal stabilization of the interior throughout the year. However, if there is a lack of understanding of these different constructions for heat-moisture and heat storage behaviour, there is a risk of the opposite effect and a risk of deterioration of interior thermal stability. Therefore, it is necessary to better understand these structures in terms of behaviour and the impact that their use has on the building itself. Also, it is desirable to understand the effect of changes in their partial material properties and of the composition itself on the functioning of heat-moisture and heat storage properties of compositions that use these materials.

OBSAH

A. ÚVOD	7
B. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	8
B.1 Definice hmotné konstrukce šikmé střechy	8
B.2 Akumulace tepelných zisků	8
B.3 Tepelná stabilita interiéru budov, hodnocení a ovlivnění	9
B.4 Konstrukce šikmých střech s hmotným pláštěm	11
B.5 Vytvoření hypotéz a cílů	12
C. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	12
D. METODIKA ZPRACOVÁNÍ PRÁCE A ETAPY	12
E. ZÁKLADNÍ SIMULACE A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	13
F.1 Základní simulace na EX_RD_1	13
F.2 Výsledky základní simulace	14
F.3 Analýza základní simulace	14
F.4 Experimentální měření a instalace měřicí soustavy	16
F.5 Sestavení simulace z dat experimentálního měření	17
F.6 Výsledky experimentálního měření a simulace	17
G. POKROČILÁ SIMULACE	18
G.1 Simulace změny materiálu nosné hmotné konstrukce	19
G.2 Výsledky změny materiálu nosné hmotné konstrukce	19
G.3 Simulace vlivu orientace konstrukce vůči světovým stranám	20
G.4 Výsledky vlivu orientace konstrukce vůči světovým stranám	20
G.5 Simulace stavebních úprav skladby experimentálního objektu	21
G.6 Výsledky stavebních úprav skladby experimentálního objektu	22
H. ZÁVĚREČNÉ SHRNUTÍ	24
H.1 Dosažení cílů	24
H.2 Stručné závěry disertační práce	24
H.3 Shrnutí a doporučení pro praxi	26
H.4 Možnosti dalšího výzkumu	31
H.5 Závěr	32
I. BIBLIOGRAFIE	33
J. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ TEZÍ	35
J.1 Seznam zkratk	35
J.2 Seznam symbolů	35

A. ÚVOD

Trendem současnosti, který je dlouhodobě patrný a stále více zvýhodňovaný i žádaný, je nárůst požadavků na zvýšení úspory energií při provozu všech objektů, tedy jak rodinných domů, tak i občanské vybavenosti. Tento požadavek je ukotven nejen v neustále se zpřísnujících českých technických normách (ČSN), ale také například ve směrnici Evropského parlamentu a Rady [1]. U doporučených hodnot součinitele prostupu tepla u pasivních budov, které jsou častěji vyhledávány a finančně zvýhodňovány pomocí nejrůznějších vládních programů, lze pozorovat značný vzrůst požadavků oproti požadovaným hodnotám. Zejména poté například u střešních konstrukcí. Pro dosažení existuje několik řešení. Patří mezi ně využití systémů zateplení vyznačujících se vynikajícími tepelněizolačními vlastnostmi a jejich zhotovením v daleko větších tloušťkách. Zde narážíme na problém. Nevýhodou některých pasivních budov je při nepochopení vnitřního provozu přehřívání interiéru, které je umocněno právě velice kvalitními teplosměnnými konstrukcemi a dále neprůvzdušností obálky ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$) [2]. To vede k požadavek stabilizace vnitřního prostředí ve smyslu dosažení optimálních a pro uživatele přívětivých teplot. Možností stabilizace je mnoho. Nejjednodušším principem je zvýšení násobnosti výměny vzduchu v místnosti přirozeně, tedy okny. Tato metoda je však často nevhodná a nedostatečná u pasivních objektů, kdy by bylo nutné ponechat okenní otvory otevřené téměř po celou dobu večerních hodin, a i tak bychom často nedosáhli kýženého výsledku. Tento způsob je pro uživatele značně nevhodný. Dalším způsobem je instalace vzduchotechniky. Opatření může a často také vede ke zvýšení energetické náročnosti budov. Nejvhodnějším způsobem zlepšení tepelné stability interiéru tohoto typu budov je zlepšení materiálů teplosměnných konstrukcí, zejména zvýšením měrné tepelné kapacity materiálů samých a s ním spojeným navýšením ukládané energie v materiálech. U obecně kritických podstřešních prostor se setkáváme se snahou navýšit měrnou tepelnou kapacitu u těchto konstrukcí použitím tzv. hmotných pláštů. Pláště sestávají z hmotných materiálů s vysokou objemovou hmotností, které dokážou absorbovat daleko vyšší množství energie. To vede potenciálně k riziku přehřívání vnitřních prostor a negativní dopad může být dále umocněn nepochopením použitých systémů a špatnou koncepcí vnitřního provozu. Problém a riziko s ním spojené je dále patrné zejména na jedné z nejvíce exponovaných teplosměnných ploch objektu, střešním pláští, který je vystaven značným solárním ziskům po celou denní dobu. Stále častěji při setkání s těmito konstrukcemi vyvstává otázka: „Jaké jsou skutečné tepelně-vlhkostní a akumulární vlastnosti těchto střešních?“. Otázku je nutné si dále doplnit další otázkou a sice: „Mají tyto hmotné konstrukce pozitivní, nebo negativní vliv na stabilizaci vnitřního prostředí a do jaké míry?“. Tato disertační práce se zaměřuje na zjištění skutečných vlastností těchto hmotných konstrukcí a na verifikaci výše položených hypotéz, kdy je sledován zejména nárůst energie uvnitř skladby samotné. Přestože lze poznatky práce aplikovat na různé objekty z hlediska jejich využití, jsou výsledky zjištěné v rámci kompletace zaměřeny zejména na stavby obytné. Pro počáteční ověření problematiky byl sestaven idealizovaný výpočetní experimentální model, ve kterém bylo provedeno srovnání hmotných pláštů s běžně používanými konstrukcemi a dále často opomíjený vliv orientace vůči světovým stranám. Dle výsledků bylo dále přistoupeno k realizaci full-scale experimentu na reálně stavbě, které bylo dále doplněno simulací. Pro účely práce bylo využito dvou experimentálních objektů. V obou případech se jedná o reálné pasivní domy zakončené hmotným pláštěm: RD Kuřim a RD Pohořelice. Veškeré reálně získané hodnoty pocházejí z RD Pohořelice, kde byla nainstalována experimentální měřicí soustava.

B. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

B.1 Definice hmotné konstrukce šikmé střechy

Z hlediska českého stavitelství lze rozlišovat konstrukce všech objektů dle normového zařídění dle ČSN 73 0540-2 [3] na tzv. „lehké“ a „těžké“ konstrukce. Lehké konstrukce jsou konstrukce s nízkou tepelnou setrvačností, které mají plošnou hmotnost vrstev, tedy všech částí od vnitřního líce až po vnější líc tepelněizolační vrstvy, nižší než $\rho_s \leq 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Těžké konstrukce jsou v našem případě právě zmíněné hmotné střešní pláště, které se vyznačují vyšší plošnou hmotností než $\rho_s \geq 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Současně, díky vysoké plošné hmotnosti vycházející z objemové hmotnosti, se jedná o materiály vyznačující se vysokou tepelnou setrvačností, která přímo souvisí s akumulací tepelných zisků.

V práci bude primárně používán hmotný plášť, nebo hmotná konstrukce, nebo hmotný materiál z důvodů potenciálně zavádějícího termínu těžká konstrukce.

Střechy se v současné době navrhují, v běžné praxi, pomocí souboru norem ČSN 73 1901-1-2-3 [4], [5], [6] a tepelně technicky se posuzuje dle souboru norem ČSN 73 0540 [3], [7], [8], [9] a v souladu s platnými legislativními předpisy [10], podrobněji viz dále. Termínem šikmé střechy se pro účely disertační práce myslí víceplášťová střešní konstrukce sklonu od 5–45° (v našem případě 30°) se skládanou střešní krytinou.

B.2 Akumulace tepelných zisků

Akumulace tepelných zisků, nebo také tepelná akumulace budovy, jsou pojmy, které popisují chování objektu, nebo problémy, které jsou přímo, nebo nepřímo, spojené s časově proměnlivým, neustáleným a nestacionárním tepelným tokem, který působí na konstrukce, místnosti a budovy všeobecně. Podle využívaného fyzikálně chemického procesu můžeme rozdělit tuto akumulaci tepelné energie do několika typů, jmenovitě akumulace citelného tepla – využití měrného tepla látky, akumulace latentního tepla – využití entalpie fázové změny látky, absorpce vodní páry – využití výparné entalpie vody a jiné fyzikálně chemické procesy.

Vzhledem k povaze konstrukcí a absenci materiálů s fázovou změnou (dále jen PCM) ve skladbě se práce zaměřuje na akumulaci citelného tepla právě využitím tepelné kapacity, která u hmotných konstrukcí zásadně ovlivňuje tepelnou stabilitu místnosti. Rozlišujeme následující.

Měrná tepelná kapacita značená c (1) je dána následující rovnicí.

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1)$$

Kde c – měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], dQ – teplo potřebné k ohřátí tělesa [J], m – hmotnost tělesa [kg], dT – teplota vypočítaná ze vzorce $dT = \theta_2 - \theta_1$ [$^{\circ}\text{C}$], θ_2 – konečná teplota tělesa, θ_1 – počáteční teplota tělesa.

Z výše uvedeného vztahu je tedy jasné, že měrná tepelná kapacita přímo vychází z objemové hmotnosti (2) dané následujícím vztahem.

Objemová hmotnost značená ρ je dána následujícím vztahem (2).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2)$$

Kde ρ – objemová hmotnost materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], m – hmotnost tělesa [kg], V – objem látky [m^3].

Z výše uvedených vztahů platí, že čím vyšší hmotnosti konstrukce dosáhneme, tím vyšší akumulace, jak popisují následující rovnice objemové tepelné kapacity (3) a plošné tepelné kapacity (4). Dále dochází k ovlivnění fázového posunu teplotního kmitu (5), který posouvá chladnutí konstrukce.

Objemová tepelná kapacita značená κ vyjadřuje množství tepla, které je nutné k ohřátí 1 m³ materiálu o 1 K při stálém tlaku a stálé, předem definované vlhkosti. Je dána následující rovnicí.

$$\kappa = c \cdot \rho [J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}] \quad (3)$$

Kde κ – objemová tepelná kapacita [$J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$], ρ – objemová hmotnost materiálu [$kg \cdot m^{-3}$], c – měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Plošná tepelná kapacita značená autorem této práce c_A je odvozená veličina vyjadřující množství tepla, které je nutné k ohřátí 1 m² materiálu o 1 K při stálém tlaku a stálé, předem definované vlhkosti. Je odvozena následujícím vztahem.

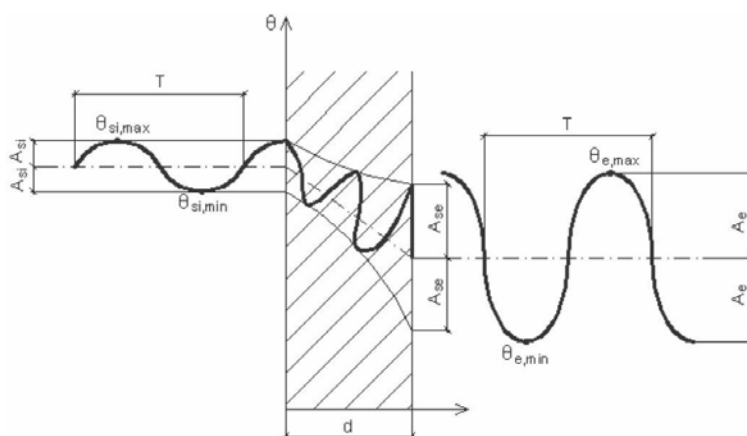
$$c_A = c \cdot \rho_s [J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}] \quad (4)$$

Kde c_A – plošná tepelná kapacita [$J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$], ρ_s – plošná hmotnost materiálu [$kg \cdot m^{-2}$].

Fázový posun teplotního kmitu značený ψ vyjadřuje časový rozdíl mezi dobou maximální teploty na vnitřním povrchu a dobou maximální teploty vnějšího vzduchu. Přesný výpočet je velmi komplikovaný a často odvozený matematicky pomocí Fourierovy transformace. České normy, konkrétně ČSN 73 0540-4 [7] uvádí následující zjednodušený vztah.

$$\psi = 2,7 \cdot \sum(R_i \cdot s_i) = 2,7 \cdot D^* [h] \quad (5)$$

Kde ψ – fázový posun teplotního kmitu [-], R_i – tepelný odpor i -té vrstvy konstrukce [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] a D^* – tepelná setrvačnost konstrukce [h].



Obr. 1 Schéma principu fungování teplotního útlumu a kmitání teploty [11]

Akumulace následně ovlivňuje tepelnou stabilitu interiéru jednotlivých místností a vliv je pozitivní i negativní. V přenesené analogii hmotných pláštů šikmých střech je hromadění energie, akumulaci, v materiálu taktéž možné brát jako pozitivní i negativní a je nutné jej pochopit, zjistit jeho vliv a naučit se s ním v rámci hmotné konstrukce a skladeb pracovat.

B.3 Tepelná stabilita interiéru budov, hodnocení a ovlivnění

Tepelná stabilita interiéru budov charakterizuje teplotní a s nimi spojené vlhkostní vlastnosti prostoru uvnitř budovy. Jako takovou jí ovlivňují všechny obalové teplosměnné

konstrukce a jejich materiál, který odděluje exteriér a interiér, nebo který odděluje daný prostor od zbytku objektu. Hodnocení se rozděluje na zimní a letní stabilitu. Určení tepelné stability vychází z podmínek tzv. tepelného komfortu neboli optimálního stavu, který člověk vnímá při pobytu v daném prostředí a který je dán legislativně přílohou č. 1 k vyhlášce č. 194/2007 Sb. [12], která určuje optimální teplotu a vlhkost v různých místnostech, zákonem č. 258/2000 Sb. [13] a dalšími. I když je optimální stav jako takový velmi často subjektivní a složený z faktorů vnitřního prostředí [14], osobních faktorů a doplňujících faktorů, lze pro jeho dosažení z hlediska vnitřního prostředí vymezit pojmy následující faktory [15]. **Teplota vzduchu** θ_{ai} [$^{\circ}\text{C}$] – také známá jako suchá teplota, což je teplota v okolí lidského těla. Je neovlivněná radiací okolních ploch. **Radiační teplota/teplota kulového teploměru** θ_g [$^{\circ}\text{C}$] – je teplota v okolí těla měřená kulovým teploměrem a zahrnující vliv současného působení teploty vzduchu, okolních ploch a rychlosti proudění vzduchu. **Operativní teplota vzduchu** θ_o [$^{\circ}\text{C}$] – je teplota uzavřeného prostoru, uvnitř kterého by sdílené teplo sáláním a prouděním odpovídalo prostředí skutečnému. **Střední teplota sálání** θ_r [$^{\circ}\text{C}$] – je rovnoměrná teplota okolních ploch. Sdílí se teplo radiací stejně, jako ve skutečném prostředí. **Relativní vlhkost vzduchu** φ_{ai} [%] – vyjadřuje stupeň nasycení vzduchu vodními parami. **Teplota mokrého teploměru** θ_{wb} [$^{\circ}\text{C}$] – také nazvaná jako psychrometrická teplota, která vyjadřuje teplotu nuceně větraného a vlhčeného teplotního čidla. **Teplota rosného bodu** θ_{dp} [$^{\circ}\text{C}$] – je teplota, při níž je vzduch nasycen a při ochlazování začíná vodní pára kondenzovat. **Rychlost proudění vzduchu** v_a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] – je parametr charakterizující pohyb vzduchu v prostoru, který je určen velikostí a vektorem. Je vyjadřována střední hodnotou za časovou jednotku. Tepelná stabilita je posuzována normou ČSN 73 0540-2 [3], kdy výpočet a hodnocení předpokládá dosažení tzv. kvazistacionárního tepelného stavu, který je charakterizován dlouhodobě se neopakujícími nestacionárními denními okrajovými podmínkami. Z hlediska nejběžnějšího způsobu výpočtu stability samotné se lze setkat s několika způsoby, včetně výše zmíněného výpočtu tzv. kritické místnosti. Konkrétně se jedná o následující metody.

Metoda vybrané (kritické) místnosti – posuzuje se samostatně pouze kritická místnost na normou stanovené datum a teplotu. Okrajové podmínky uvažovány jako normová záležitost.

Metoda všech místností – posuzují se všechny místnosti na normou stanovené datum a teplotu, kdy jsou opět okrajové podmínky uvažovány jako normová záležitost.

Dynamická metoda – posuzují se všechny místnosti po vybraný časový úsek (den/týden/měsíc/rok), kdy se sleduje průběh teplot, intenzita větrání a další. Na rozdíl od předchozích metod jsou interiérové a exteriérové okrajové podmínky nestacionární a získané měřením. Zohledňuje se oproti klasickým metodám komplexní 3D geometrie včetně všech podstatných prvků objektu. Největší výhodou oproti předešlým metodám je také zohlednění vzájemného ovlivnění jednotlivých místností mezi sebou, což vede k přesnějším výsledkům, které se při správném nastavení okrajových podmínek blíží skutečnému chování.

Dynamická metoda umožňuje daleko přesněji posoudit objektivní veličiny popisující vnitřní prostředí. Ty ovlivňuje řada faktorů, mezi něž patří okrajové podmínky a další aspekty, které primárně závisí na následujících faktorech, a sice tepelně technické vlastnosti teplosměnných konstrukcí, tepelně akumulací vlastnosti materiálů použitých v celém objektu, koncepci výměny vzduchu v interiéru, tepelném zisku přes průsvitné a neprůsvitné části obálky budovy, stínění průsvitných a neprůsvitných částí obálky budovy a koncepci vnitřního provozu a tepelných zisků od osob, zařízení a spotřebičů.

Tepelná stabilita je rozsáhlý problém postihující řadu aspektů. Existuje celá řada způsobů optimálního řešení. Z předešlého shrnutí vyplývá několik skutečností. Nejvýhodnější je, aniž bychom investovali značné finance do nuceného větrání, zmenšení podílu prosklených ploch vůči plochám podlahovým, což je však často v rozporu s požadavky investora. Další možností je stínění průsvitných a neprůsvitných částí obálky budovy. Stínění je však opětovně problematické a vyžaduje vynaložení financí, odklonění se od architektonické vize, nebo vede k nutnosti clonící technologii aktivovat po celou dobu užívání místnosti, zejména poté v letních měsících. Nejvýhodnějším způsobem, aniž bychom zásadně měnili koncepci provozu či větrání, je vylepšení neprůsvitné konstrukce a změna jejich tepelně technických a tepelně akumulčních vlastností. U pasivní výstavby se tak skutečně děje, zejména u obvodových nosných stěn, kdy je v hojné míře používáno například vápenopískového zdiva, které je subtilní a disponuje vysokou měrnou tepelnou kapacitou. Je tedy snaha takto vylepšovat i jiné konstrukce, než jsou stěny. Z tohoto hlediska nastává problém na často opomíjené a nejvíce exponované konstrukci, která má téměř po celou denní dobu přísun solárních zisků a je bez možnosti krytí, nebo jiného stínění, a sice střeše. Zatímco plochou střechu můžeme vhodným způsobem stínit, například pomocí zatravnění, nebo stabilizačním násypem, šikmé střechy takto obvykle chránit nelze, nebo pouze do určitého sklonu. Pokud fakt spojíme s využitím podkroví a také použitím hmotných materiálů, jak tomu je často u pasivních objektů, vyvstávají nové a často neřešené skutečnosti, které mají významný vliv na samotnou tepelnou stabilitu nejen jednotlivých místností, ale díky markantnosti konstrukce celého objektu.

B.4 Konstrukce šikmých střech s hmotným pláštěm

Konstrukce šikmých střech s hmotným pláštěm a střech všeobecně jsou díky svému umístění téměř neustále vystaveny solárním ziskům a jsou při řešení problematiky tepelné stability rozhodujícím faktorem, jak také ostatně potvrzuje výzkum Eugénia Rodriguese [16], [17] a dale Josého Orosy [18]. Je zřejmé, že pokud nezajistíme dostatečné provětrání konstrukce [19], musíme s energií přijímanou střechou vhodně naložit, ať již pomocí zvýšení vrstvy tepelné izolace, použitím experimentálních skladeb z materiálů s fázovou změnou (dále jen PCM [20], [21]), anebo řešením zvýšením vlastností nosné konstrukce, zejména tepelné kapacity.

Společně s faktem, že hmotné pláště šikmých střech eliminují problém s neprůvzdušností obálky, jsou zdánlivě ideálním prvkem pro pasivní budovy a pro řešení přehřívání interiéru. Navýšením měrné tepelné kapacity, tedy energie potřebné ke zvýšení teploty pláště, je však spojeno s potenciálním rizikem vyššího ukládání vlhkosti do materiálu, než je tomu například u tradičních dřevěných prvků lehkých konstrukcí obvykle používaných na šikmé střechy. Dohromady díky nárůstu fázového posunu teplotního kmitu ψ spojeném s hmotným materiálem vytváří problém rapidního a nezanedbatelného nárůstu akumulace tepelných zisků. Dochází tedy, v závislosti na ročním období a okrajových podmínkách, k potenciálně nežádoucímu efektu, který je spojen s možností vzniku poruch, tepelných mostů a možného zhoršení tepelné stability interiéru spojeném s nezanedbatelným množstvím další energie potřebné k jeho zpětné stabilizaci [22], [23].

Ačkoliv existuje řada přístupů v oblasti použití hmotných konstrukcí ve střechách vycházející ze zelených střech [24], [25], [26], v přeneseném slova smyslu dále modrých střech [27], nebo poté sakrálních staveb [28], [29], kromě prací výše zmíněných se nesetkáváme s kombinací šikmé střechy, nosné hmotné konstrukce a zejména poté jejího zateplení, které je

typické pro území nejen České republiky. Je tedy nutné volit přístup ke zpracování práce jako individuální otázku a metody, které by bylo možné čerpat ze zkušeností jiných vědeckovýzkumných prací je nutné do vysoké míry buď přizpůsobit, nebo vhodně adaptovat pro potřeby disertační práce.

B.5 Vytvoření hypotéz a cílů

1. Hmotné pláště šikmých střech z materiálů s vysokou měrnou tepelnou kapacitou vyvozují možné negativní a pozitivní vlivy na vnitřní prostředí budov. Tyto vlivy nejsou na území České republiky více popsány. Vlivy se týkají tepelného toku, vlhkostního toku a vlivu na tepelnou stabilitu vnitřního prostředí.
2. Využitelnost a míra akumulace tepelných zisků je závislá na celé řadě faktorů, z nichž je u střech nejpodstatnější solární zisk. Tento zisk je, kromě umístění objektu, primárně ovlivněn orientací teplosměnných ploch vůči světovým stranám.
3. Mechanismus a akumulace tepelných zisků, které se odráží na tepelné stabilitě místnosti, jsou přímo ovlivněny koncepcí větrání jak interiéru, tak i zhotovené větrané vzduchové vrstvy skladby, stejně jako cloněním teplosměnných konstrukcí. Kromě koncepce větrání skladby jsou však další způsoby ovlivnění závislé primárně na uživateli samotných a nelze s nimi tedy plně počítat. Vystává tedy otázka úpravy skladby samotné a vhodná kombinace materiálů a vrstev.

C. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Shrnutými poznatky, fyzikálními vztahy a zejména hypotézami je možné stanovit následující cíle a otázky, na které disertační práce odpovídá. Jedná se o konkrétní cíle, jimiž je odpověď na následující:

1. **Zjistit chování hmotné konstrukce šikmé střechy z hlediska teploty, tepelného toku, difuzního toku, fázového posunu teplotního kmitu, akumulace a rychlosti odezvy konstrukce v kritických a přechodových měsících.**
2. **Zhodnotit míru vlivu objemové hmotnosti skladby šikmého střešního pláště, která je ovlivněna volbou materiálu a s ní spojenou měrnou a objemovou tepelnou kapacitou, na tepelnou stabilitu podstřešních prostor budov při stejných okrajových podmínkách.**
3. **Zhodnotit vliv orientace teplosměnné konstrukce hmotného pláště šikmé střechy vůči světovým stranám z hlediska chování a nároků na vnitřní prostředí.**
4. **Určit nejvhodnější způsoby ovlivnění tepelné stability experimentálního objektu s hmotným pláštěm šikmé střechy, za pomoci úpravy této zkoumané skladby.**

D. METODIKA ZPRACOVÁNÍ PRÁCE A ETAPY

- **Rešerše problematiky současného stavu** – úvod do problematiky hmotných konstrukcí střešních pláštů a jejich použití. Mechanismy přestupu tepla, šíření vlhkosti, akumulační vlastnosti a tepelná stabilita interiéru budov. Součástí jsou stanovené hypotézy, ze kterých vyplývají cíle. Společně je díky rešerši vypracován návrh, jakým jsou cíle dosaženy a jakého vybavení v podobě čidel a softwarů bude zapotřebí.

- **Teoretická analýza** – teoretický rozbor celosvětově řešené problematiky, faktorů a chování, které jsou očekávány jako výsledek zakomponování hmotného pláště šikmé střechy. Za pomoci odborných článků je důkladně analyzována vhodnost metodiky a směry, kterými se lze v práci ubírat.
- **Metodika experimentálního sběru dat** – popis sestavení měřicí aparatury na předmětném objektu měření. Postup zabudování jednotlivých čidel, kalibrace měření a sběr.
- **Metodika sestavení simulace** – popis matematicko-fyzikální numerické simulace a způsob vytváření modelů. Idealizace, okrajové podmínky a selekce dat měření.
- **Základní simulace a analýza výsledků** – úvodní simulace založená na idealizovaném experimentálním numerickém modelu a jeho následné analýze, kdy je provedeno základní porovnání a potvrzení hypotéz ohledně potenciálně negativního vlivu hmotných plášťů šikmých střech a také zjištění přesnosti simulace a skutečného experimentálního měření.
- **Analýza experimentálního měření a jeho doplnění simulací** – komplexní analýza experimentálně naměřených dat, která jsou použita na sestavení simulace za účelem hlubšího pochopení tepelně-vlhkostního chování a akumulčních vlastností. Součástí je vyhodnocení dílčích výsledků a slovní závěry jednotlivých výstupů.
- **Pokročilá simulace a analýza výsledků** – pokračování simulace na již ověřeném numerickém modelu. Dle cílů bodu C je měněn model v materiálu nosné konstrukce a poté jsou prováděny na stejném výchozím modelu různé stavební úpravy za účelem sledování změn v kritických parametrech. Následně je vytvořen dle načerpaných poznatků model nový, který umožňuje vytvoření celého objektu a po vložení vnějších okrajových podmínek a následné změny orientace modelu umožňuje sledovat dopad, který tato změna ve spojení s hmotným pláštěm šikmé střechy má. Součástí je vyhodnocení dílčích výsledků a slovní závěry jednotlivých výstupů.
- **Výsledky disertační práce** – vzhledem k množství výsledků a dat, kterých je v rámci práce a měření dosaženo jsou veškeré výsledky předcházejících kapitol samostatně a následně společně analyzovány a je hledáno indikátorů stejného chování za účelem komplexně pochopit celý mechanismus hmotných plášťů šikmých střech a jejich ovlivnění za pomoci stavební úpravy skladeb, nebo orientace.
- **Shrnutí, doporučení pro praxi** – shrnutí, doporučení a závěry pro stavební praxi a uživatele. Součástí je uvedení dalších možností a rozvoje výzkumného tématu.

E. ZÁKLADNÍ SIMULACE A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

F.1 Základní simulace na EX_RD_1

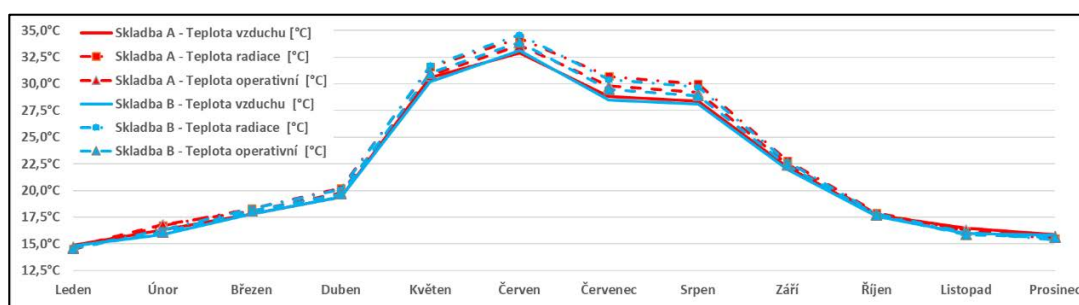
Cílem základní simulace bude potvrzení hypotéz kapitoly *B.5 Vytvoření hypotéz a cílů*, že hmotné materiály ve střeše ovlivňují pozitivně i negativně vnitřní prostředí. Za tímto účelem bude využito experimentálního objektu EX_RD_1 viz **Obr. 2**. Stavba nacházející se v obci Kuřim u Brna a je vybrána pro účely základní simulace a experimentálního měření. Stavba samotná je vystavěna z pórobetonového konstrukčního systému. Systém je použit na stěny, stropy a také na předmětnou šikmou střechu, čímž je vytvořen řešený hmotný plášť.



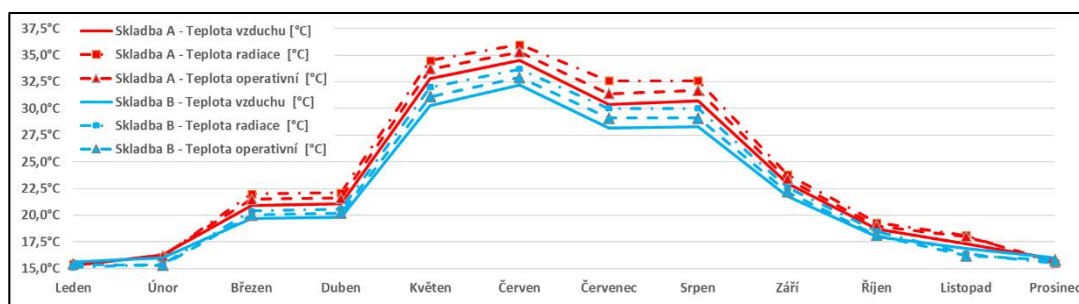
Obr. 2 Fotografie experimentálního objektu EX_RD_1 [30]

F.2 Výsledky základní simulace

Základní simulace využívá dvě skladby střešního pláště, a sice A a B. Skladba A je hmotná pórobetonová a odpovídá reálné skladbě objektu. Skladba B poté odpovídá běžně používanému typu skladeb na území České republiky sestávající z dřevěného krovu a tepelné izolace mezi a nad krokve. Výsledky jsou vyjádřeny pomocí sledovaných parametrů vnitřního prostředí, kdy je sledována teplota vzduchu interiéru θ_{ai} (označeno jako **VZD**), radiální teplota θ_{rad} (označeno jako **RAD**) a poté operativní teplota θ_{ope} (označeno jako **OPE**) vyjadřující teplotu prostředí. Objekt je posouzen na stav odpovídající reálnému osazení objektu do terénu, tedy s natočením 40° (nízkých solárních zisků, dále jen **NSZ**) od severu viz **Graf 1** a fiktivnímu natočení 220° (vysokých solárních zisků, dále jen **VSZ**) viz **Graf 2**.



Graf 1 Výsledky simulace nízkých solárních zisků vyjádřeny grafem [30]



Graf 2 Výsledky simulace vysokých solárních zisků vyjádřeny grafem [30]

F.3 Analýza základní simulace

Z průběhu grafů je patrné, že hypotézy 1 až 3 jsou potvrzeny. Je potvrzen fakt odlišného chování hmotných plášťů šikmých střech z materiálů s vysokou měrnou c , nebo objemovou

tepelnou kapacitou κ , které jsou zabudovány do střešních pláštěů. Míra ovlivnění je umocněna natočením objektu vůči světovým stranám a s mírou solárních zisků, jak si lze povšimnout z grafů. Pro závěry základní simulace je provedeno porovnání viz **Tabulka 1** a **Tabulka 2** zaměřené na srovnání skladeb mezi sebou a srovnání totožných skladeb v při různé orientaci od severu.

Skladba	[°C]	Průměrné teploty během 1/10 roku									
Skladby A-B (NSZ)	VZD [°C]	0,04	0,01	0,07	0,43	-0,22	0,31	0,28	0,11	0,1	0,08
	RAD [°C]	0,2	0,02	0,09	-0,17	-0,3	0,3	0,3	0,11	0,14	0,09
	OPE [°C]	0,12	0,02	0,08	-0,15	-0,25	0,3	0,29	0,11	0,12	0,09
Skladby A-B (VSZ)	VZD [°C]	-0,28	1,25	1,3	2,5	2,26	2,19	2,46	1,12	0,7	-0,1
	RAD [°C]	0,28	1,55	1,5	2,54	2,36	2,38	2,67	1,2	1,02	0,01
	OPE [°C]	0	1,41	1,39	2,53	2,31	2,29	2,56	1,16	0,86	-0,04

Tabulka 1 Vzájemné porovnání mezi skladbami A a B

Skladba	[°C]	Průměrné teploty během 1/10 roku									
Skladba A (VSZ-NSZ)	VZD	0,43	3,11	1,67	2,19	1,6	1,59	2,34	0,8	0,99	0,02
	RAD	0,93	3,64	1,92	2,99	1,7	1,73	2,61	0,92	1,33	0,03
	OPE	0,68	3,38	1,79	2,87	1,64	1,67	2,47	0,86	1,16	0,02
Skladba B (VSZ-NSZ)	VZD	0,75	1,87	0,44	0,12	-0,88	-0,29	0,16	-0,21	0,39	0,2
	RAD	0,85	2,11	0,51	0,28	-0,96	-0,35	0,24	-0,17	0,45	0,11
	OPE	0,8	1,99	0,48	0,19	-0,92	-0,32	0,2	-0,19	0,42	0,15

Tabulka 2 Vlastní porovnání skladeb A a B při různých solárních ziscích

Při vlastním srovnání skladeb s různými intenzitami solárních zisků je možné si povšimnout potenciálu akumulace, který je tentokrát více patrný. To vede k úspoře energie v zimních měsících. Je patrné, že hmotný plášť střechy reprezentovaný skladbou A relativně efektivně brání růstu teplot při letních měsících. Při stálých vyšších teplotách exteriéru dochází v průběhu letních dní k akumulaci a plášť do sebe začíná absorbovat nežádoucí tepelné zisky.

Při vlastním srovnání skladeb s různými intenzitami solárních zisků je možné si povšimnout patrnějšího potenciálu akumulace. V zimních měsících je možné vidět obrovskou výhodu hmotné skladby A, která vykazuje i o několik stupňů Celsia vyšší teploty, než je tomu o lehčí skladby B. Dochází k velkému potenciálu úspory energie, která je možná v zimních i v přechodných měsících, zejména při vhodné orientaci vůči osluněným světovým stranám. Orientace je dle srovnání naprosto kritická.

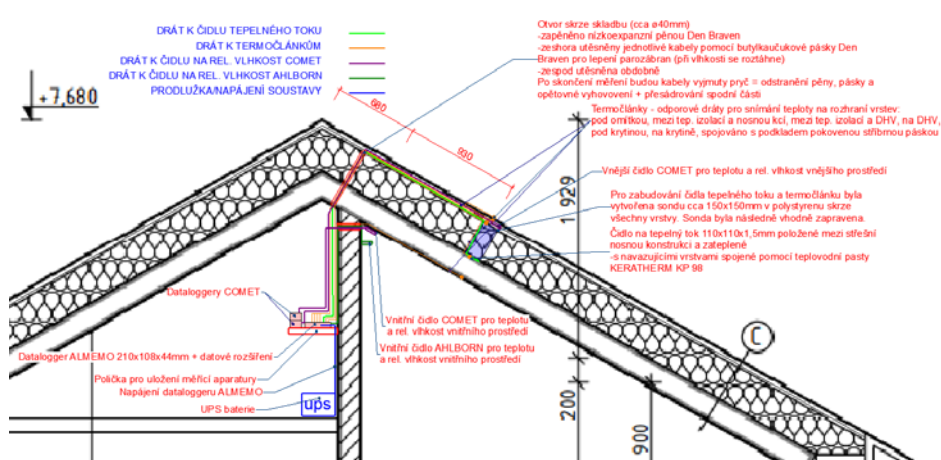
Závěrem je potvrzení hypotéz ve všech zněních a částečné dosažení odpovědi na cíl 3 ohledně natočení objektu vůči světovým stranám za cílem ovlivnění solárních zisků. Hmotné pláště šikmých střech vyvozují s vysokou pravděpodobností na základě základní simulace velmi pozitivní vlivy na vnitřní prostředí i vlivy negativní, z čehož míra tohoto vlivu, pokud neuvažujeme jinou koncepci vnitřního prostředí, či zejména jiný způsob větrání a stínění, je dána přímo solárními zisky plynoucími z vhodného natočení objektu a dále v přeneseném významu také koncepcí stínění. Na základě základní simulace je tedy nutné zjistit pomocí vytyčených cílů, které se ukázaly jako vhodně zvolené, přesné chování hmotné skladby šikmého střešního pláště.

F.4 Experimentální měření a instalace měřicí soustavy

Cílem experimentálního měření je shromáždění dat ohledně chování objektu a skladby, která disponuje hmotnou konstrukcí v úrovni nosného pláště šikmé střechy. Data jsou použita za účelem dosažení cílů 1, 3 a 4 viz kapitola C. *Cíle DISERTAČNÍ práce*. Za tímto účelem je vybrán objekt nový s názvem EX_RD_2. Stavba se nachází v obci Pohořelice. Jedná se o rodinný dům vystavěný z pórobetonového konstrukčního systému. Tvar je patrný viz **Obr. 3**. Jedná se o tvarově velmi jednoduchý objekt zakončený sedlovou střechou. Objekt je vybrán pro instalaci experimentální měřicí aparatury, pro pokročilé simulace různých materiálů, vlivu natočení objektu na stav vnitřního prostředí a další úkony pro dosažení cílů disertační práce.



Obr. 3 Fotografie experimentálního objektu EX_RD_2 [30]



Obr. 4 Schématický obrázek polohy a finální podoby experimentální měřicí soustavy [30]

V rámci sestavy experimentální měřicí soustavy, která je zabudována do EX_RD_02 viz **Obr. 4**, je využito celosvětových publikací, prostředků ÚPST FAST VUT v Brně a prostředků autora. Vzhledem k nutnosti zajistit měření o dostatečné přesnosti, druhu snímaných charakteristik, umožnění zabudování do i mimo skladbu a současně potřebě data shromažďovat v časovém intervalu, je analýzou autora vyselektováno portfolio výrobců, kteří splňují kritéria. Z přístrojů a čidel je sestavena měřicí soustava sestávající z dílčích měřicích zařízení. Soustava snímá teploty na jednotlivých vrstvách skladby EX_RD_2, hustotu tepelného toku a relativní vlhkosti. Měření je doplněno hydrometeorologickými daty poskytovanými stanicemi Českého hydrometeorologického ústavu. Situace je považována za vyhovující.

F.5 Sestavení simulace z dat experimentálního měření

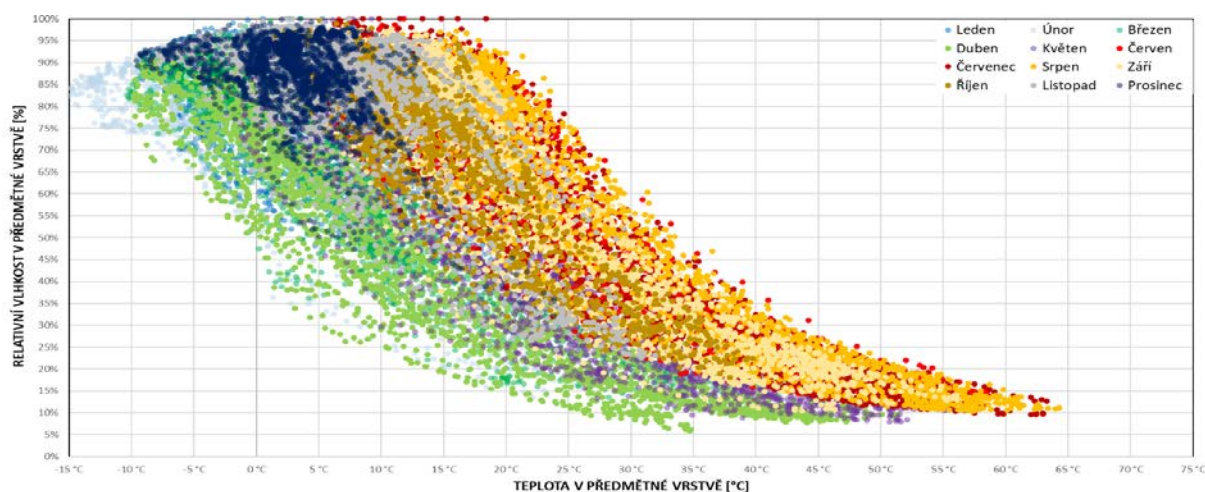
Z cílů práce vyplývá potřeba softwaru, který umožňuje výpočet nestacionárního tepelného a difuzního toku konstrukcí skladby, tedy v rozměru 1D. Jako nejlepší nástroj pro problematiku byl zvolen software WUFI Pro EDU verze 6.5.2. Pro přesné pochopení problematiky je simulováno celé roční období, po které je experimentálně zajištěn sběr dat. Jedná se o datum od 01.04.2020 do 31.03.2021. Parametry vnějšího i vnitřního prostředí jsou dodány v 10minutových intervalech. Data jsou upravena, očištěna od imperfekcí, časově díky zimnímu a letnímu času posunuta na správnou hodnotu a vložena do prostředí programu. Simulace dosahuje vysoké přesnosti, která má průměrnou hodnotu 96,84 %. Skladba objektu vstupující do programu má mít následující podobu viz **Tabulka 3** korespondující s EX_RD_2.

Č.	Název	Objemová hmotnost	Porozita	Měrná tep. Kapacita	Tepelná vodivost	Faktor dif. odporu	Zabud. vlhkost	Tloušťka
		ρ [kg.m ⁻³]	n_x [-]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	μ [-]	[kg.m ⁻³]	d [m]
1	Sádrová omítka	850	0,65	850	0,2	8,3	400	0,007
2	Pórobeton ^a	817	0,72	1004	0,355	10	200	0,2
3	EPS s grafitem	17	0,95	1270	0,035	30	0,17	0,3
4	Vzduchová vrstva slabě větraná	1,3	0,999	1000	0,18	0,46	-	0,03
5	DHV ^c	150	0,001	2300	2,3	55	-	0,001
6	Větraná vzduchová vrstva + laťování ^d	1,3	0,999	1000	0,28	0,32	-	0,04
7	Krytina betonová ^e	2200	0,18	850	1,6	92	110,71	0,02
Pozn.								
^a Výpočet nestejnorodé vrstvy dle ČSN EN ISO 6946 [31].								
^b Výměna vzduchu ve vrstvě nastavena po sérii experimentů na 20 h ⁻¹ .								
^c Zohlednění chování konstrukce pomocí vnesení imperfekce do modelu pronikáním vzduchu a průvzdušnosti/vzduchotěsnosti dle DIN 4108-7-11 [32], [33] třídy 3 s výškou sloupce 5 m.								
^d Výměna vzduchu ve vrstvě nastavena po sérii experimentů na 80 h ⁻¹ .								
^e Zohlednění chování konstrukce pomocí vnesení imperfekce do modelu pronikáním vzduchu vzduchové těsnosti třídy A s výškou sloupce 5 m.								
+ Tepelný odpor R_{se} byl stanoven hodnotou 0,0526 m ² ·K·W ⁻¹ .								
Tepelný odpor R_{st} byl stanoven hodnotou 0,125 m ² ·K·W ⁻¹ .								
Byla zohledněna absorpce krátkovlnného záření a krátkovlnná odrazivost okolního terénu.								
Součinitel prostupu tepla U předmětné zkoumané skladby					0,103	[W·m⁻²·K⁻¹]		
Celková objemová tepelná kapacita κ					3 781 958	[J·K⁻¹·m⁻³]		
Plošná tepelná kapacita c_A					213 437,1	[J·K⁻¹·m⁻²]		
Plošná hmotnost ρ_s					218,704	[kg·m⁻²]		

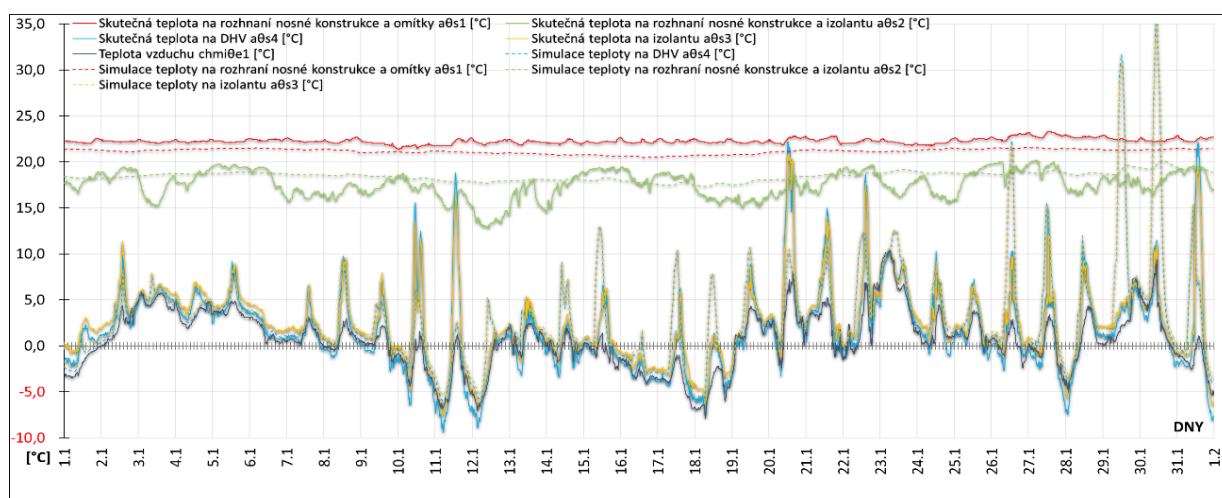
Tabulka 3 Tabulka parametrů konstrukce modelu

F.6 Výsledky experimentálního měření a simulace

Výsledky dosažené experimentálním měřením jsou analyzovány a prezentovány několika způsoby a sice grafy izolinií viz **Graf 3**, grafy průběhů teplot viz **Graf 4**, grafy vlhkosti v konstrukci, histogramy a souhrnnými tabulkami teplot a hustot tepelných toků.



Graf 3 Izolinie teploty a vlhkosti ve VVV [30]



Graf 4 Průběh skutečných a simulovaných teplot skladbou – měsíc leden [30]

Grafy postihující vybrané kritické časové úseky napříč celým ročním obdobím jsou slovně hodnoceny, doplněny tabulkami reprezentujícími průměrné, minimální a maximální teploty v dané časové úseky, kterým jsou přiřazeny průměrné a směrodatné odchylky tak, aby bylo možné plně pochopit chování celé skladby.

G. POKROČILÁ SIMULACE

Cílem pokročilé simulace je odpověď na cíle 2 až 4. Rozšíření simulace za účelem dosažení cíle 2 – zjištění vlivu změny hmotného materiálu a cíle 4 – vlivu stavebních úprav hmotné skladby je provedeno na již testovaném modelu programu WUFI Pro 6.5, který prokazatelně dosahuje ve své přesnosti přes 96 %, kdy hodnota je zjištěna integrací ploch a následným porovnáním. Model a poznatky z něj získané jsou v plné míře použity a model samotný, respektive skladba v něm použitá je vhodně upravena. Postupem je dosaženo série modelů, u nichž dosahujeme vysoké přesnosti výsledků. Pro rozšíření simulace za účelem dosažení cíle 3 – vlivu orientace konstrukce vůči světovým stranám je nutné sestavit model nový, který dokáže pracovat se změnou okrajových podmínek v rámci natočení objektu samotného. Model je kompilován v programu DesignBuilder v nástavbě Simulace, kdy je sestaven objekt EX_RD_2 Pohořelice. Před svým použitím je model opětovně podroben

srovnání a zjištění přesnosti, obdobně jako model programu WUFI Pro. Nedokonalosti softwaru jsou známy a s divergencí modelu od skutečnosti je uvažováno. Pro naplnění cíle, kdy je zjišťován procentuální nárůst či pokles teplot θ a hustoty tepelných toků q , je však přesnost dostatečná a dosahuje téměř 94 % přesnosti.

G.1 Simulace změny materiálu nosné hmotné konstrukce

Kapitola řeší kompilaci modelů a výsledků simulací, při kterých jsou v rámci dalšího pochopení chování hmotného pláště šikmé střechy simulovány různé materiálové varianty a jejich vliv na fungování skladby jako celku. Nahrazení se týká vrstvy č. 2 viz **Tabulka 3**. Parametry jsou patrné viz **Tabulka 4**. Materiály byly vybrány s ohledem na jejich použitelnost a dostupnost na českém trhu.

Var.	Název	Objemová hmotnost ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Porozita n_x [-]	Měrná tep. Kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Faktor dif. odporu μ [-]	Zabud. vlhkost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Tl. d [m]
A	Železobeton 2300 ^a	2300	0,16	1020	1,43	179 ^b	100	0,2
B	Železobeton 2500 ^a	2500	0,18	1020	1,74	180 ^b	118	0,2
C	Keramické vložky + probeton. žebra ^a	800	0,6	850	0,87	15	100	0,2
D	Keramobetonové panely+probet.Žebra ^a	820	0,6	960	0,83	18	100	0,19
	Nadbetonávka ^a	1860	0,2	850	1,6	58	81,79	0,04

Pozn.

^a Informace byly zjištěny z tech. listů výrobců a databázi Fraunhofer-IBP + LTH Univerzity Lund.

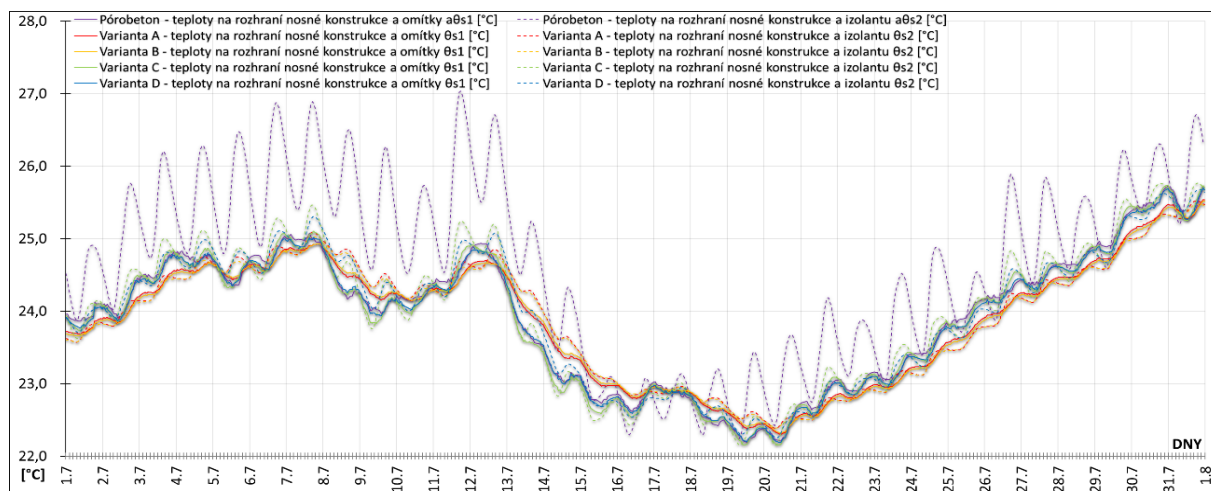
Faktor difuzního odporu μ železobetonových vrstev je uvažován dle databáze LTH Univerzity Lund. Hodnota

^b odpovídá vysokému stupni preciznosti při výrobě panelů. Vzhledem k typu konstrukce lze předpokládat, že případný železobeton bude mít charakter prefabrikátu. Je tak možné uvažovat vysoké hodnoty.

Tabulka 4 Tabulka parametrů nových hmotných vrstev jednotlivých modelů

G.2 Výsledky změny materiálu nosné hmotné konstrukce

Výsledky jsou analyzovány a prezentovány několika způsoby a sice grafy izolinií a grafy průběhů teplot viz **Graf 5**, ke kterým budou přidány také informace ohledně množství vlhkosti ve skladbách. Dále také souhrnnými tabulkami teplot a tepelných toků.



Graf 5 Průběh teplot jednotlivých materiálových variant – měsíc červenec [30]

Grafy postihující vybrané kritické časové úseky napříč celým ročním obdobím jsou slovně hodnoceny, doplněny tabulkami reprezentujícími průměrné, minimální a maximální teploty v dané časové úseky, kterým jsou přiřazeny průměrné a směrodatné odchylky. Je možné plně pochopit chování celé skladby. Kapitola poskytuje odpověď na druhý cíl disertační práce. Výstupem je slovní hodnocení chování s popisem teplot na různých rozhraních, hustot tepelných toků, difúzních toků a dalších jevů. Současně je výstupem pochopení a optimalizace skladeb z hlediska volby materiálu při zhotovení hmotných plášťů šikmých střeš.

G.3 Simulace vlivu orientace konstrukce vůči světovým stranám

Kapitola řeší míru vlivu orientace teplosměnné konstrukce vůči světovým stranám a odpovídá na cíl 3 kapitoly C. *Cíle DISERTAČNÍ práce*. Pro dosažení srovnání mezi jednotlivými odklony objektu EX_RD_2 od severu je vytvořena simulace výchozího stavu, ke které jsou další varianty vztahovány. Současně je problematické a komplikované posoudit natočení celého objektu. Je tak vybrána pouze místnost, kde současně probíhá experimentální sběr dat. Model podléhající simulaci ohledně vlivu orientace konstrukce vůči světovým stranám je proveden v programu DesignBuilder. Způsobem hodnocení je porovnání různého natočení objektu se simulací výchozího stavu orientace odpovídající realitě a mající hodnotu topografického azimutu 175°. U modelu jsou zohledněny veškeré vnější okrajové podmínky, vnitřní okrajové podmínky vycházející z užívání interiéru, větrání, chlazení, vytápění a další.

G.4 Výsledky vlivu orientace konstrukce vůči světovým stranám

Vyhodnocení probíhá na kritické místnosti, kdy je sledována teplota vzduchu θ_{ai} (VZD. [°C]), radiační teplota θ_{rad} (RAD. [°C]) a operativní teplota θ_{ope} (OPER. [°C]). Dále jsou pro hlubší pochopení problematiky sledovány energie vytápění (VYT. [kWh]), chlazení (CHLA. [kWh]), ventilace místnosti (VENT. [kWh]) a solární zisky či ztráty okny (SOL. [kWh]). Data v tabulce viz **Tabulka 5** jsou zastoupeny pouze procenty. K datovému setu je vyjádřena v procentech kladná či záporná podobnost. Vzhledem k problematickému vyjádření jsou použita dvě barevná schémata, a sice zelené kdy vykazuje vyšší hodnoty výchozí simulace, a červené kdy simulace natočení vykazuje vyšší hodnoty. Parciální a očekávané výsledky jsou patrné viz **Tabulka 5**, kde je zjevné porovnání stavu výchozího stavu oproti simulaci.

	Simulace 1 – Natočení azimut 90° – Východ							Simulace 2 – Natočení azimut 135° – Jihovýchod						
	VZD.	RAD.	OPER.	VENT.	CHLA.	VYT.	SOL.	VZD.	RAD.	OPER.	VENT.	CHLA.	VYT.	SOL.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
01	0,305	0,627	0,462	12,572	-	3,403	33,830	0,072	0,142	0,107	2,262	-	1,051	7,730
02	0,466	1,196	0,827	44,785	-	3,653	35,336	0,053	0,228	0,140	9,060	-	0,685	7,529
03	0,124	0,596	0,362	10,650	-	1,448	20,647	0,015	0,060	0,038	0,203	-	0,093	1,626
04	0,004	0,007	0,005	0,341	-	-	5,008	0,128	0,417	0,276	7,569	-	-	5,024
05	0,339	0,593	0,470	5,159	15,555	-	3,924	0,515	0,876	0,702	7,222	29,131	-	9,609
06	0,318	0,525	0,425	3,219	14,659	-	3,342	0,461	0,752	0,611	4,688	16,366	-	7,603
07	0,509	0,781	0,649	4,259	12,413	-	6,777	0,691	1,041	0,872	5,420	15,530	-	10,927
08	0,049	0,080	0,065	0,818	1,475	-	3,176	0,482	0,700	0,594	3,909	12,010	-	7,105
09	0,312	0,478	0,397	4,150	45,309	-	14,347	0,079	0,188	0,135	2,388	6,911	-	0,897
10	0,277	0,871	0,579	11,473	-	1,136	28,955	0,100	0,227	0,165	2,324	-	0,059	5,905
11	0,172	0,572	0,370	28,889	-	0,527	29,633	0,007	0,042	0,025	2,179	-	0,185	4,853
12	0,424	0,726	0,572	0,458	-	3,852	34,965	0,069	0,114	0,091	5,703	-	0,357	5,346
Max	0,509	1,196	0,827	44,785	45,309	3,852	35,336	0,691	1,041	0,872	9,060	29,131	1,051	10,927

Tabulka 5 Procentuální srovnání simulace 1 a 2 s výchozím stavem

Kapitola odpovídá na třetí cíl disertační práce ohledně vlivu, který má orientace objektu na teplosměnné hmotné pláště šikmých střech. Výstupem je komplexní pochopení teplot a nároků na stabilizaci vnitřního prostředí pomocí vytápění, chlazení a ventilace, které použití hmotných pláštěů provází. Je možné, zejména s ohledem na zjišťování solárních zisků, které jsou za nároky na stabilizaci přímo zodpovědné, odpovědět plně na otázku cíle a také navrhnout nejvhodnější variantu natočení teplosměnné konstrukce střechy, nebo alternativně co lze očekávat při různé orientaci během celého ročního období. Ačkoliv jsou výsledky značně zatíženy idealizací a konkretizací použití díky jejich původu v konkrétním objektu s konkrétní dispozicí a provozem, přinášejí hlubší pochopení celé problematiky. Je velmi pravděpodobné, že ačkoliv se výsledky budou mírně lišit v jiném objektu, bude možné sledovat obdobné procentuální rozdělení ve stejně řešených prostorech.

G.5 Simulace stavebních úprav skladby experimentálního objektu

Stavební úpravy jsou relativně nenákladnou záležitostí, zejména oproti nucenému větrání, stínění, nebo jiné koncepci vnitřního provozu, které vyžadují další finance, nebo je problematické jich dosáhnout. Jedná se o optimální řešení podpory přirozeného chování hmotného pláště. Pro optimální pokrytí trhu a běžných úprav jsou v rámci kapitoly a simulace zabývající se touto problematikou vybrány následující stavební úpravy prezentované viz **Tabulka 6**.

Var.	Název	Objemová hmotnost ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Porozita n_x [-]	Měrná tep. Kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Faktor dif. odporu μ [-]	Zabud. vlhkost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Tl. d [m]
1	Pórobeton 25 cm	817	0,72	1004	0,355	10	200	0,25
2a	Pěnosklo ^b	102	0,25	1000	0,041	1500000	-	0,35
2b	Miner. vata/vlna ^b	97	0,965	850	0,035	1,3	-	0,3
2c	Polyisokyanurát ^b	26,5	0,99	1470	0,024	51,5	0,5	0,2
3a	Větraná vzduchová vrstva tl. 60 mm ^c	1,3	0,999	1000	0,4	0,23	-	0,06
3b	Větraná vzduchová vrstva tl. 100 mm ^c	1,3	0,999	1000	0,655	0,13	-	0,1
4a	Miner. vata/vlna ^d	97	0,965	850	0,035	1,3	0,34	0,06
4b	Polystyren EPS ^d	20	0,98	1500	0,04	21,7	0,18	0,06
5a	Dřevovláknitá deska dif. otevřená ^e	625	0,41	1630	0,11	11	79,3	0,015
5b	Dřevotřísková deska dif. uzavřená ^e	650	0,57	1400	0,12	276	76	0,015
6	Asfaltový pás ^a	1400	0,001	1470	0,21	280000	-	0,002

Pozn.

Veškeré informace byly zjištěny z technických listů výrobců a databázi Fraunhofer-IBP + LTH Univerzita Lund.

^a Asfaltový pás je umístěn mezi vrstvy č. 2 a č. 3 viz **Tabulka 3**.

^b Nahrazení vrstvy č. 3 viz **Tabulka 3**.

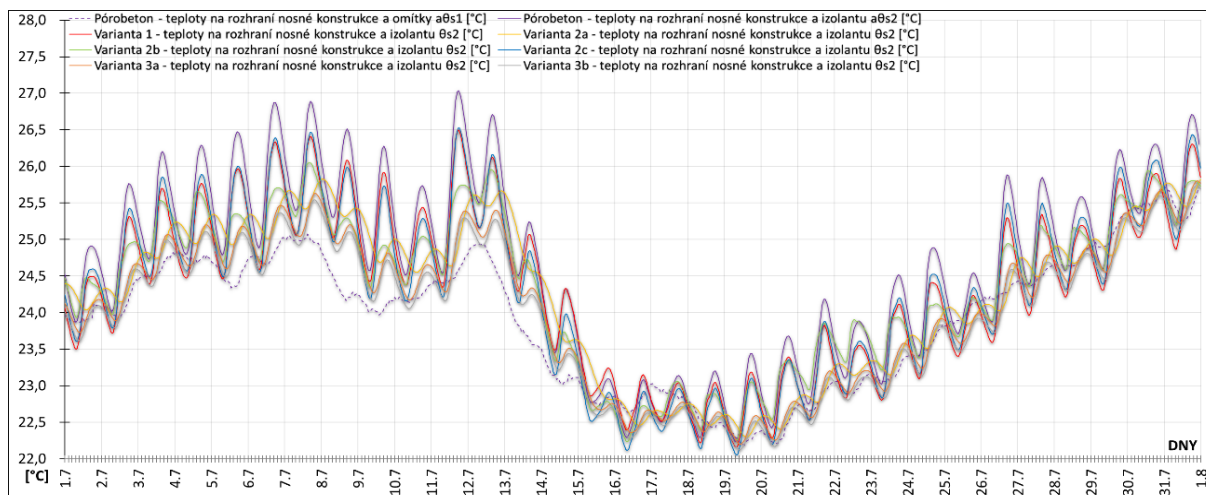
^c Rozšíření vrstvy č. 6 viz **Tabulka 3**.

^d Tepelný izolant je umístěn mezi vrstvy č. 1 a č. 2 viz **Tabulka 3**.

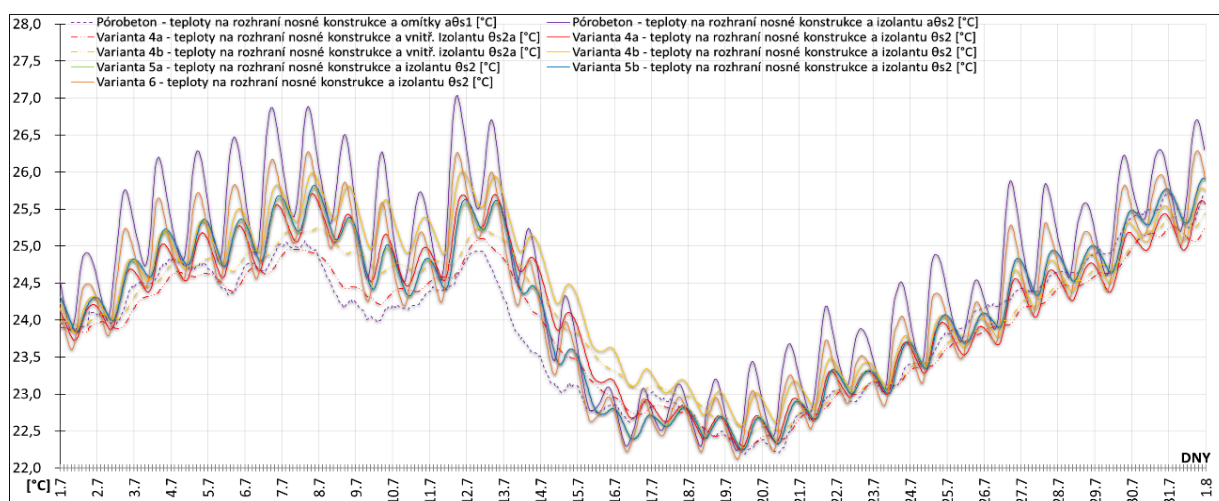
^e Bednění nahrazuje plně vrstvy č. 4 viz **Tabulka 3**. Vrstva vzduchové vrstvy slabě větrané tedy zaniká.

Tabulka 6 Tabulka parametrů stavebních úprav vrstev jednotlivých modelů

G.6 Výsledky stavebních úprav skladby experimentálního objektu



Graf 6 Varianty 1–3b – Průběh teplot jednotlivých stavebních úprav – měsíc červenec [30]



Graf 7 Varianty 4a–6 – Průběh teplot jednotlivých stavebních úprav – měsíc červenec [30]

Výsledky jsou opětovně analyzovány a prezentovány různými způsoby. Vzhledem k tomu, že je opětovně simulace kompilována z velkého množství dat, jsou vybrány dva způsoby, kterými jsou data hodnocena a sice grafy průběhů teplot viz **Graf 6** a **Graf 7** a tabulky zachycující teploty a hustoty tepelných toků.

Kapitola přináší odpověď na poslední čtvrtý cíl disertační práce. Přínosem a výstupem je slovní hodnocení chování s popisem teplot na kritickém rozhraní tepelného izolantu a nosného hmotného pláště šikmé střechy. Výstup je rozšířen o průměrné teploty, jejich maxima, minima a odchylky, stejně jako hustoty tepelných toků. Díky tomu poskytuje výstup ohledně optimální volby úpravy skladby, která disponuje hmotnou konstrukcí s ohledem na její vlastnosti a chování v čase. V této návaznosti je možné odhalit, jaká stavební úprava je optimální všeobecně a jaké jsou například omezeny pouze svým sezónním přínosem.

Veškeré dosažené výsledky jsou použity k odpovědi na jednotlivé cíle disertační práce. Cíle jsou vzájemně provázány a vzájemně vysvětlují komplexní chování hmotných plášťů šikmých střech. Hodnocení všech dílčích cílů, experimentálního měření a simulací je provedeno jak pomocí tabulkového editoru Excel za pomoci sledování průměrných, maximálních

i minimálních hodnot, tak také za pomoci vizuálního sledování jednotlivých průběhů. Vzhledem k množství dat a jejich reálnému průběhu není možné využít vhodně veškeré matematické metody na analýzu dat. Výjimku tvoří integrace průběhu jednotlivých hodnot, která jsou použita ke zohlednění podobnosti průběhů skutečného experimentálního měření a simulace.

H. ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ

H.1 Dosažení cílů

Disertační práce odpovídá v plném rozsahu na všechny cíle, které jsou v rámci zpracování stanoveny. Je prokázáno, že bez plného experimentálního měření, které je použito na definování okrajových podmínek pro série modelů doplňujících a rozšiřujících poznání již tak objemného datového celku, není možné objektivně učinit závěry a vyslovit korektní hodnocení. Současně je prokázáno, že objem práce, který byl cíli stanoven je vzhledem k nutnosti pochopení odlišného chování korektní a bez jeho rozsahu by docházelo k imperfecím ve výstupech a závěrech.

H.2 Stručné závěry disertační práce

Cíl 1 – Hmotné pláště šikmých střech jsou přímo závislé z hlediska svého chování na dvou hlavních faktorech, a sice akumulčních schopnostech a tepelné energii k ní dodané, ať již z vnitřního prostředí, nebo daleko více rozhodujícího vnějšího prostředí a zejména poté solárních ziscích. Pokud jsou energie/zisky dostatečné, vede akumulace k příznivému působení v chladné dny/měsíce, nepříznivému působení v teplé dny/měsíce a naopak. Objemová hmotnost dále vede k rozlišnému chování difúzního toku, který může jak negativně, tak pozitivně ovlivnit teploty. Akumulace samotná tedy musí být bezpodmínečně uvažována a nelze jí při návrhu těchto konstrukcí zanedbat. Stejně tak není možné ve stejné analogii opomenout míru energetických a zejména solárních zisků, které do skladby působí.

Cíl 2 – Objemová hmotnost ρ šikmého střešního pláště a její změna vlivem jiného použitého materiálů má přímý vliv na teploty, tepelné toky, difúzní toky a zejména na naprosto klíčovou akumulaci a rychlost odezvy konstrukce, která je spojená s měrnou c , plošnou c_A a objemovou tepelnou kapacitou κ . Lze rozeznat u hmotných střech dva modely chování.

- Materiály, které disponují vysokou objemovou hmotností ρ a akumulčními vlastnostmi jsou výhodné v létě, kdy tyto vlastnosti umožní lépe absorbovat energetické zisky. Díky tomu, že musíme dodat víc energie nedochází k rychlému nárůstu teplot a současně se průměrné teploty drží trvale v nižších hodnotách. V zimě a přechodovém období je nutné konstrukce trvale a průměrně více energeticky zásobovat, což vede k vyšším hodnotám teplot v těchto obdobích a současně při přerušení dodávky jsou tyto konstrukce dlouhodoběji stabilnější a pokles teplot je postupný. Nevýhodou je vyšší fázový posun teplotního kmitu ψ a potřeba do skladby dodat více energie v zimě.
- Materiály, které disponují nižší objemovou hmotností ρ a akumulčními vlastnostmi jsou méně výhodné v létě, jelikož jim na zahřátí stačí méně energie a mají tak přirozeně vyšší průběh teplot než hmotnější varianty. Současně dochází k rychlejšímu nárůstu i poklesu teplot. V zimě a přechodovém období je opětovně nutné tyto konstrukce trvale a kontinuálně energeticky zásobovat, avšak při menší hustotě tepelném toku, což je naopak výhodné, avšak současně menší tepelný tok ve spojení s menší akumulací a nižším fázovým posunem teplotního kmitu ψ vede ve finále k mírnému poklesu průměrných teplot. Při přerušení dodávky tyto konstrukce rychleji ztrácí svou stabilitu a pokles teplot je rychlejší. Nevýhodou je menší fázový posun teplotního kmitu ψ a menší potřeba energie v letním období pro zahřátí.

Cíl 3 – Orientace až několikanásobně mění parametry nároků na větrání, chlazení, vytápění a zejména naprosto klíčových solárních zisků, které jsou rozhodující pro chování hmotných pláštěů šikmých střech. Vhodná celoroční orientace objektu či konstrukce neexistuje a je nutné se rozhodnout pro jaké z ročních období či měsíců bude orientace teplosměnné konstrukce výhodná a pro jaké nikoliv. Lze rozlišit celkem 3 období a sice zimní, letní a přechodové. Pro období jsou typické následující azimuty a orientace.

- Zimní období – Azimut 180° - Jih, 225° - Jihozápad, 90° - Východ a 135° - Jihovýchod. Nejvhodnější je azimut 90° až 180°. V orientaci míříme na vysoké solární zisky během zimy a nízké nároky na stabilizaci vnitřního prostředí.
- Letní období – Azimut 270° - Západ, 315° - Severozápad, 0° - Sever a 45° - Severovýchod. Nejvhodnější je azimut 270° až 0°. V orientaci cílíme na nejnižší solární zisky během léta a nízké nároky na stabilizaci vnitřního prostředí.
- Přechodová období – Azimut 225° - Jihozápad, 270° - Západ, 90° - Východ a 135° - Jihovýchod. Lze jako vhodné doporučit azimuty určené pro zimní období.

Orientace teplosměnné konstrukce a s ní spojené solární zisky rozhodují o teplotách vnitřního prostředí do řádů několika stupňů Celsia. Problémem jsou provozní nároky z hlediska ventilace, chlazení a vytápění, které se až několikanásobně mohou podle natočení měnit a je nutné je z hlediska energetické i finanční náročnosti na provoz zohlednit. Celá problematika je díky vyšším akumulacím vlastnostem hmotných pláštěů šikmých střech daleko více umocněna.

Cíl 4 – Stavební úpravy, které se týkají různých vrstev předmětného hmotného pláště šikmé střechy, lze rozdělit dle vhodnosti jejich použití na úpravy vhodné pro zimní, letní a přechodové období. Současně se objevuje i poslední skupina, a sice úpravy, které vedou k všeobecnému vylepšení během celého sledovaného ročního období. Stavební úpravy různými způsoby ovlivňují teploty, tepelné a difúzní toky, akumulacím vlastnosti a jako takové jsou tyto informace použity i při jejich optimálním rozdělení do jednotlivých časových období.

Výhodnou stavební úpravou hmotného pláště šikmé střechy pro letní období z hlediska teplot, difúzního toku, teplotního toku a akumulace jsou varianty 1 – změna tloušťky nosné konstrukce, 2a – izolant pěnosklo, 2b – izolant minerální vlna/vata, 3a – zvýšení VVV na tloušťku 60 mm, 3b – zvýšení VVV na tloušťku 100 mm, 6 – použití parotěsnicí vrstvy z asfaltového pásu s hliníkovou vložkou. Další stavební úpravy nejsou vhodné.

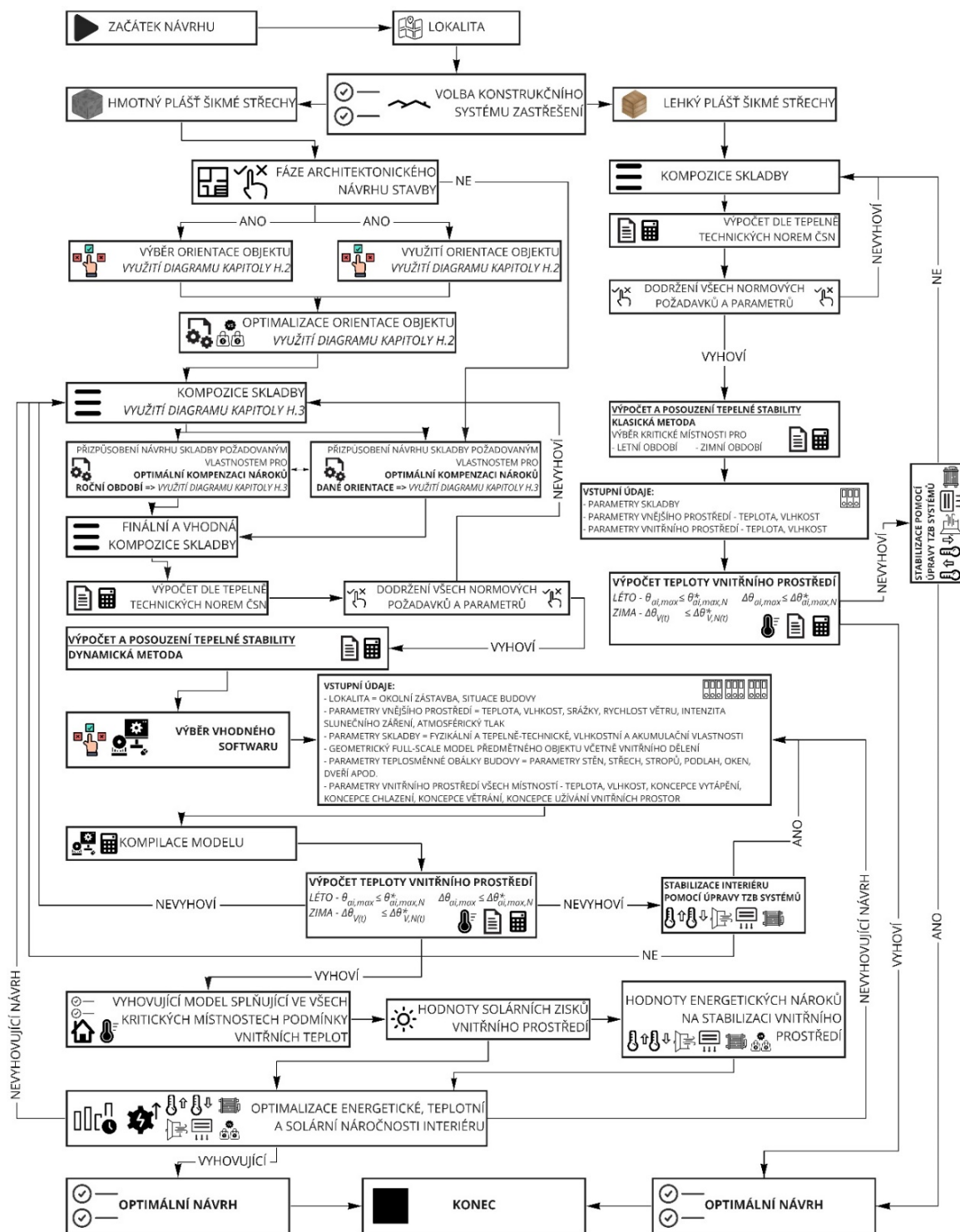
Výhodnou stavební úpravou hmotného pláště šikmé střechy pro zimní období z hlediska teplot, difúzního toku, teplotního toku a akumulace jsou varianty 1 – změna tloušťky nosné konstrukce, 2a – izolant pěnosklo, 3a – zvýšení VVV na tloušťku 60 mm, 3b – zvýšení VVV na tloušťku 100 mm, 4a – zateplení ze strany interiéru pomocí minerální vlny/vaty, 4b – zateplení ze strany interiéru pomocí EPS, 5a – umístění DHV na bednění z difúzně otevřených desek a 5b – umístění DHV na bednění z difúzně uzavřených desek. Další stavební úpravy nejsou vhodné.

Výhodnou stavební úpravou hmotného pláště šikmé střechy pro přechodové období z hlediska teplot, difúzního toku, teplotního toku a akumulace jsou varianty 1 – změna tloušťky nosné konstrukce, 2a – izolant pěnosklo, 3a – zvýšení VVV na tloušťku 60 mm, 3b – zvýšení VVV na tloušťku 100 mm, 4a – zateplení ze strany interiéru pomocí minerální vlny/vaty, 4b – zateplení ze strany interiéru pomocí EPS, 5a – umístění DHV na bednění z difúzně otevřených desek a 5b – umístění DHV na bednění z difúzně uzavřených desek. Další stavební úpravy nejsou vhodné.

H.3 Shrnutí a doporučení pro praxi

H.3.1 Doporučení při použití hmotné konstrukce do šikmé střechy ve fázi návrhu

Pro snazší pochopení projektové náročnosti při zakomponování lehkých oproti hmotným pláštům šikmých střech je sestaven pracovní diagram viz **Obr. 5**, který stručně a jasně pomůže případnému projektantovi v pochopení důležitosti přistupovat k návrhu hmotných plášťů diametrálně odlišně, než je tomu u jejich lehkých protějšků.

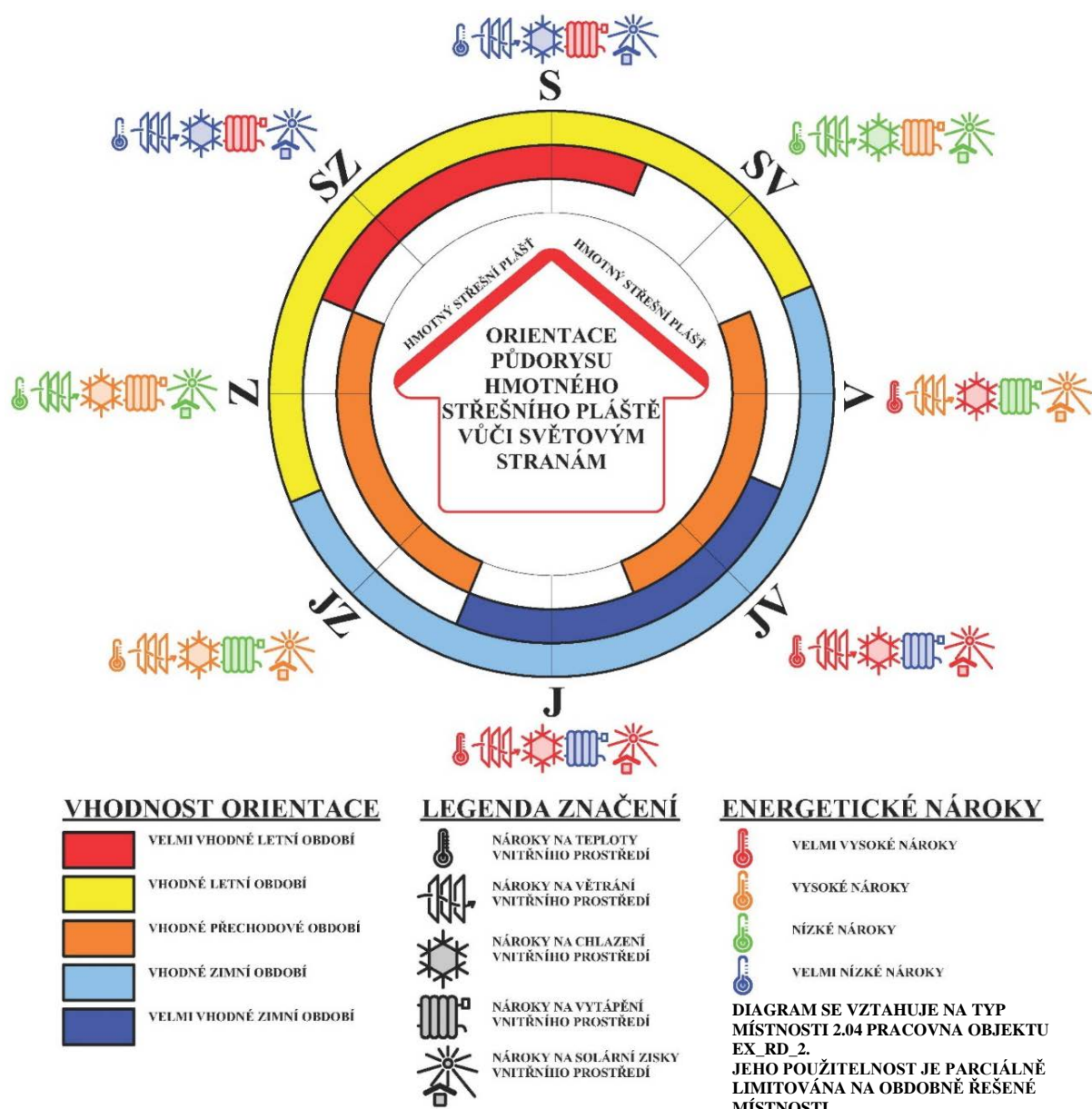


Obr. 5 Pracovní diagram návrhu lehkých a hmotných plášťů šikmých střech od architektonického návrhu po tepelně-technické, akumulční a vlhkostní posouzení včetně optimalizace

H.3.2 Vhodnost orientace objektu v analogii těžkých konstrukcí šikmých střech

V souvislosti se závěry kapitoly ohledně orientace konstrukce hmotného pláště šikmé střechy vůči světovým stranám je možné data analyzována v těchto kapitolách reprezentovat následujícím grafickým vyobrazením viz **Obr. 6**.

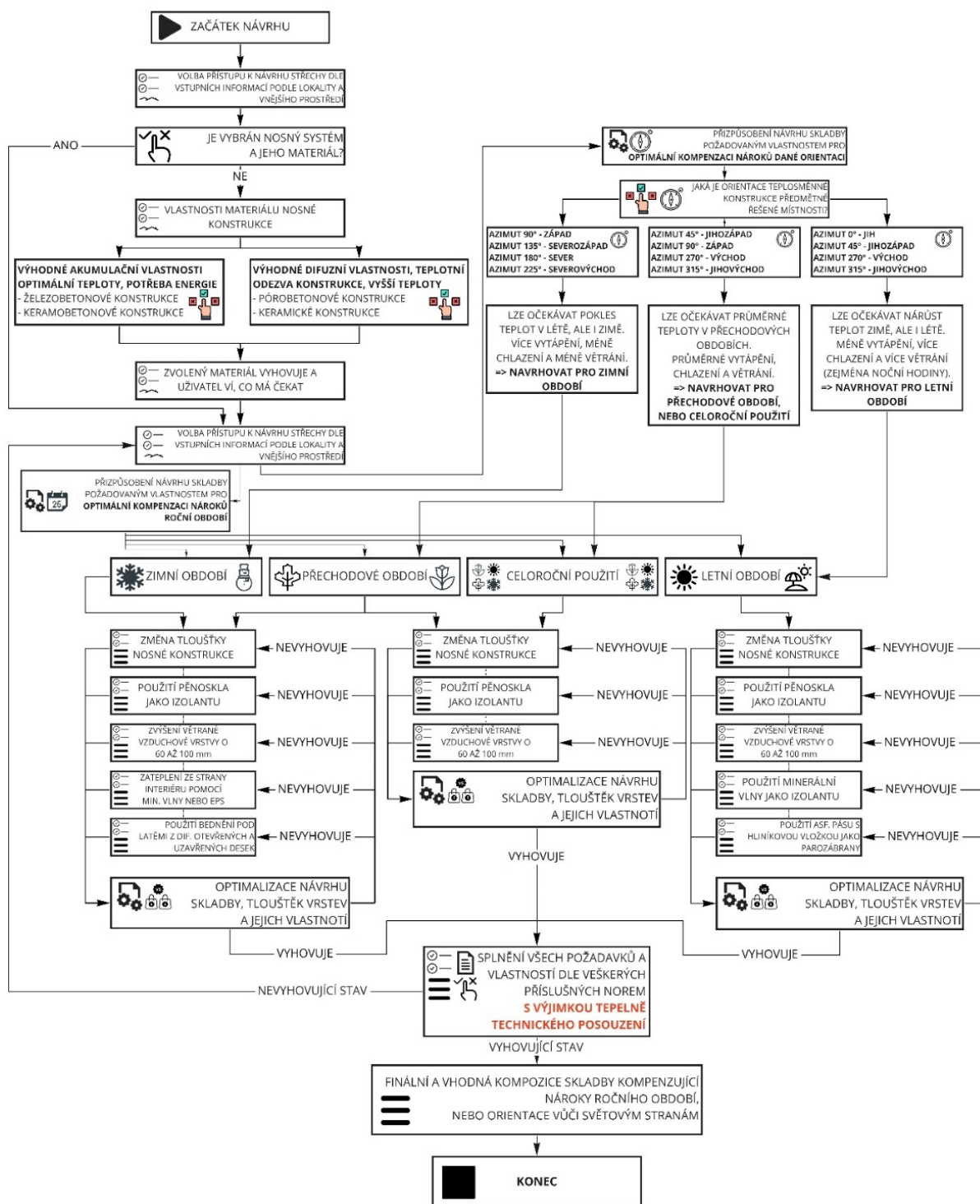
Pracovní diagram velmi zjednodušuje problematiku celého návrhu a důležitosti orientace hmotného pláště šikmé střechy. Je možné jej účinně a efektivně využít například ve fázi studie či architektonického návrhu objektu disponujícím obdobnou konstrukcí a dispozičním řešením shodným s EX_RD_2 tak, aby bylo možné se vyhnout již neodstranitelným, nebo nákladným a těžko řešitelným problémům ohledně energetické náročnosti stabilizace vnitřního prostředí. Současně může informace zde prezentovaná přinášet rozhodující element pro ucelené urbanistické celky, kdy bude možné se vyhnout stejné problematice a řešit ji s dostatečným předstihem.



Obr. 6 Pracovní diagram vhodnosti orientace hmotného pláště šikmé střechy vůči světovým stranám s ohledem na nároky vnitřního prostředí

H.3.3 Vhodnost stavebních úprav v analogii těžkých konstrukcí šikmých střech

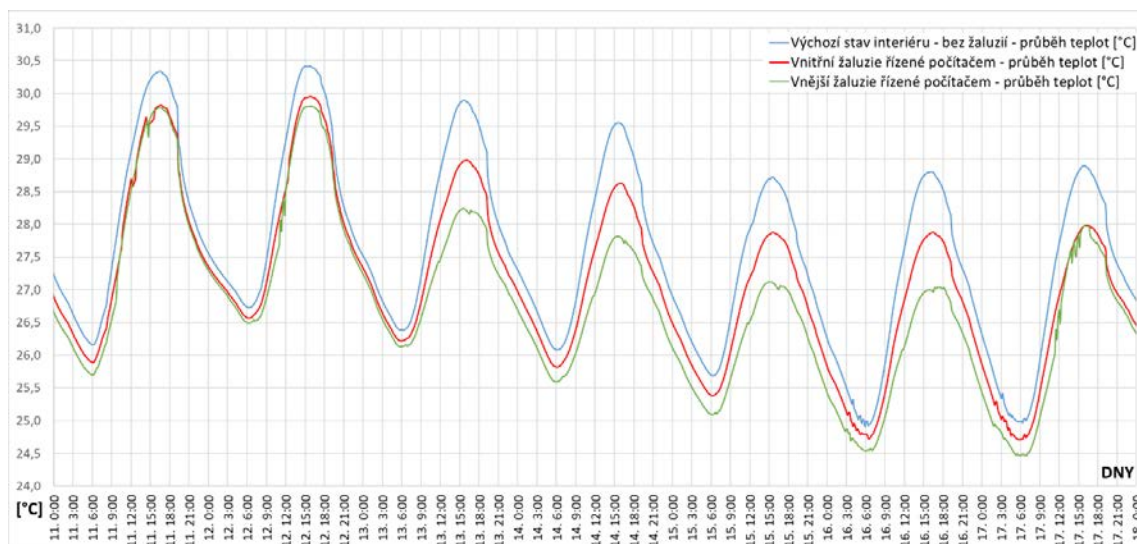
Pro pochopení závěrů ohledně volby vhodné stavební úpravy byl vypracován diagram viz **Obr. 7**, který slouží při projekčním návrhu pro výběr optimální sestavy pláště disponujícího hmotným pláštěm pro kompenzování nároků dané orientace, nebo kompenzování nároků vytvářených daným ročním obdobím. Optimální návrh skladby je nutno tepelně technicky posoudit viz diagram **Obr. 5**. Při nevyhovujícím tepelně technickém výsledku je nutné skladbu upravit a znovu posoudit.



Obr. 7 Pracovní diagram vhodných stavebních úprav hmotného pláště šikmé střechy pro optimální kompenzace nároků ročního období, nebo orientace konstrukce vůči světovým stranám

H.3.4 Koncepce stínění v analogii těžkých konstrukcí šikmých střech

Hmotné pláště šikmých střech orientované ostře na jižní strany jsou pro letní měsíce problematictější z hlediska akumulace teplot, avšak obrovským způsobem přínosné pro zimní a přechodové období. Je v nejvyšším zájmu uživatele se s takto orientovanými konstrukcemi naučit pracovat. V létě po většinou poučení uživatele nestačí a je nutné provést protiopatření. Jednou z možností, jak zabránit nárůstu teplot bez vydání energie na chlazení je stínění. Za tímto účelem byla vypracována krátká komplexní simulace, která díky své idealizaci nebyla zařazena mezi cíle disertační práce. Idealizace vycházejí z nereálného stavu vnitřního prostředí experimentálního objektu, který je vybaven stínícími prvky, jiné koncepce užívání vnitřního prostředí, než byla zachycena a konzultována s uživateli a v neposlední řadě také vybavení systémem zodpovědným za optimální funkcionalitu stínění. V rámci simulace bylo řešeno vylepšení vnitřních prostor kritické místnosti stíněním pomocí dvou typů žaluzií, které byly umístěny k oknům ze strany interiéru a exteriéru. Je předpokládáno řízení pohybu a natočení lamel počítačem podle dopadu solárního paprsku na žaluzii. Výsledky jsou patrné viz **Graf 8**.



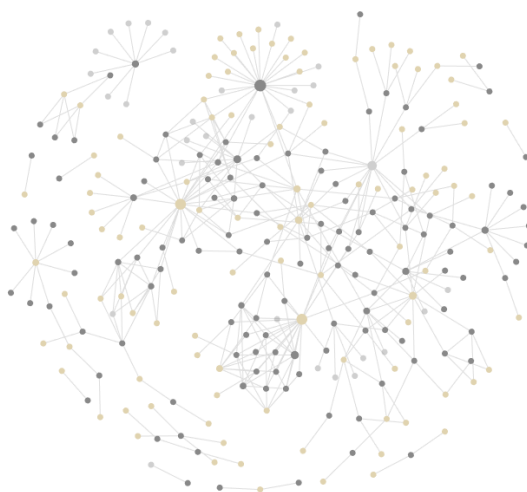
Graf 8 Průběh teplot interiéru θ_{ai} koncepce různého zastínění – 11.08 – 18.08 2020

Je patrných několik skutečností. První je nesporná výhoda libovolného stínění, které zajišťuje pokles teplot interiéru, jež mají v létě prokazatelný potenciál dosahovat ve spojitosti s hmotnými konstrukcemi šikmých střešních pláště vyšších teplot. V závislosti na typu žaluzie se bavíme v případě vnitřního stínění o průměrném poklesu teploty interiéru θ_{ai} během denních hodin o hodnotu 0,925 °C. Pokud se bavíme o vnějším stínění, dosahujeme poklesu teplot θ_{ai} o 1,729 °C. Průběhy jsou v menších hodnotách perzistentní i při nočních hodinách. Je velmi pravděpodobné, že se vhodnou koncepcí stínění můžeme dostat při delším časovém období na daleko nižší teploty, než které zachycuje simulace. Další skutečností je potenciál, který systém stínění přináší. Pokud bychom dokázali v čase pracovat optimálně se systémem stínění napříč celým objektem, můžeme s vysokým potenciálem a naprosto bez problémů, nebo bez neočekávaných a tepelnou stabilitu zhoršujících jevů, využívat hmotné pláště šikmých střech i na ostře osluněné strany. Výhoda akumulace v zimním a přechodovém období by byla využita i v letních měsících, kdy díky eliminaci solárních zisků stíněním by hmotné pláště vedly k daleko stabilnějšímu prostředí, které by bylo možné dále stabilizovat nejlépe vnějšími

žaluziemi pro velmi nízké, a tudíž příhodné denní teploty. Výhodnost je jasná. Potenciál stínění je tedy zcela nezanedbatelný a velmi přínosný, jak je možné vidět z poklesu teplot.

H.3.5 Koncepce stínění v analogii těžkých konstrukcí šikmých střech

Z dosažených závěrů práce a jejich hodnocení je zřejmé, že použití a výhodnost či nevýhodnost hmotných plášťů zakomponovaných do objektů záleží, kromě orientace, skladbě a okrajových podmínkách vnějšího prostředí, také velkou a možná až dominantní mírou na uživateli, jeho chápání funkcionality hmotného pláště a jeho přístupu k užívání vnitřních prostor. viz *H.3 Shrnutí a doporučení pro praxi*, kde je vidět na kolik lze pozitivně ovlivnit vnitřní prostory pouhým uvědomělým stíněním v kombinaci s větráním ve vhodnou denní dobu. Lze předpokládat i opačné působení a sice negativní ovlivnění vnitřních prostor, kdy uživatel vytváří a zejména kombinuje chyby. Existuje celá řada možností jak vnitřní prostředí a teploty může uživatel bezprostředně ovlivnit. Mezi tyto možnosti patří stínění, nezanedbatelné a naprosto klíčové větrání, intenzita větrání, doba větrání, způsob větrání, avšak také celá řada dalších věcí, jako je vybavení, činnost vykonávaná v interiérech, příkony zařízení, osvětlení, množství nábytku, samotné množství osob v objektu/místnosti, doba jejich pobytu a mnoho dalších a často velmi značně idealizovaných hodnot které obecně nelze jednoznačně definovat například normativními hodnotami. Vše, co obecně vstupuje do simulace, však z drtivé většiny vychází buď z experimentálně zajištěných dat, nebo často nepřesných normových hodnot. I tyto hodnoty je však do značné míry možné ovlivnit i v rámci normových postupů a způsobu jejich zadání, nebo jsou často bez dialogu od skutečného uživatele konkrétního objektu odhadnuty. Ačkoliv je tedy možné simulovat vše, je nutné si položit otázku čeho chceme simulací dosáhnout a zda je poté možno ve skutečnosti s tímto řešením skutečně uvažovat a dodržet ho. Dostáváme se tak k následující vzájemně propletené matici vstupních dat, které vstupují do simulace viz **Obr. 8**. Je zřejmé, že kombinací okrajových podmínek se dostáváme k téměř až genetickému faktoru toho, jak lze postupovat dále.



Obr. 8 Schématické zobrazení komplexnosti simulace stavu vnitřního prostředí

Je důležité, pro plné využití benefitu hmotných konstrukcí, v dalším výzkumu definovat, jak by měl uživatel takto zastřešené prostory využívat, aby nedocházelo nejen ke vzniku, ale zejména často kritické kombinaci dalších uživatelských chyb. Současně je nutné zohlednit normy a hygienické limity například při výměně vzduchu, která je jednou z nejvíce podstatných

faktorů při stabilizaci teplot. Ačkoliv se zdá úkol jako potenciálně snadný a lehce simulovatelný, není možné pokrýt bez konkrétního záměru množství variabilních simulací. Simulaci, která by měla být součástí každého takto zastřešeného objektu, pokud chceme optimalizovat využití materiálu a jeho vlastnosti, je však důležitá. V práci je prezentován krátký bodový seznam minimálních požadavků na simulace, které dále vstupují do simulace a které jsou často zanedbávány. Jmenovitě se jedná o následující výčet.

- Jak budou jednotlivé místnosti využívány, s jakou intenzitou a s jakým vytížením osob.
- Jaké vybavení bude uživatel pro svůj objekt používat, kde bude toto zařízení umístěno a jakým příkonem bude disponovat.
- Jaké nášlapné plochy, nábytek a jejich odrazivost budou ve vnitřním prostředí použity.
- Při jakých teplotách exteriéru je vhodné, nebo bude větrán vnitřní prostory.
- Při jakých teplotách exteriéru je nevhodné nebo nebude větrán vnitřní prostory.
- Při jaké intenzitě slunečního záření je vhodné podniknout kroky k eliminaci kumulace teploty, nebo naopak kdy je výhodné energii dále kumulovat.
- S jakou intenzitou bude větrání realizováno.
- Doba větrání a kdy je ve vztahu k denní době a stavu vnějšího prostředí doporučena.
- Jaké povětrnostní vlivy mohou působit na exteriér, a v přeneseném významu na interiér.
- Jak budou stíněny vnitřní prostory, jak bude probíhat ovládání stínících prvků a jak budou stínící prvky použity ve vztahu k denní době a stavu vnějšího prostředí.
- Kdy je možné jednotlivé body simulace kombinovat, za jakých podmínek a co lze při kombinaci očekávat.

Tento jednoduchý bodový seznam, který lze využít i jako příručku pro postup návrhu, samozřejmě nekončí a můžeme na něj navázat obrovský výčet věcí, které dále vstupují do simulace a které jsou často zanedbávány. Současně s tím je důležité myslet na kombinaci jednotlivých vnějších podnětů, která, jak bylo u těchto konstrukcí prokázáno, může kumulovat bez vědomí případného uživatele, a to sice jak pozitivně, tak bohužel i negativně. Pokud tedy na skutečnost této kombinace uživatelských chyb, ať už z pozice projektanta, který má za úkol optimalizovat protinávryhy a informovat uživatele, nebo z pozice uživatele, který není dostatečně informován, zapomeneme, lze očekávat s velmi vysokou pravděpodobností, že vnitřní prostředí může být v některých ročních obdobích „nepříznivé“.

H.4 Možnosti dalšího výzkumu

Pro další výzkum problematiky tepelně-vlhkostních a akumulčních vlastností těžkých konstrukcí šikmých střech lze navrhnout následující témata.

- Rozšíření experimentálního měření a sestavení objektu za účelem validace simulací.
- Využití hmotného střešního pláště jako výměníku tepla.
- Stavební úprava hmotného pláště šikmé střechy pomocí PCM.
- Softwarové řešení pro komplexní řízení vnitřního prostředí.
- Záření hmotných materiálů šikmých střech a míra ovlivnění jejich okolí.
- Optimalizace koncepce stínění vnitřních prostor a vývoj softwaru.
- Optimalizace koncepce užívání vnitřních prostor a vývoj softwaru.

H.5 Závěr

Předložená disertační práce se zabývá otázkou tepelně-vlhkostních a akumulčních vlastností těžkých konstrukcí šikmých střech. Na veškeré položené cíle bylo nalezeno odpovědi a byly vytvořeny závěry pro odbornou praxi a širokou laickou veřejnost v oblasti použití těchto konstrukcí.

Ve stavební praxi se konstrukce hmotných pláštů šikmých střech objevují stále častěji a je pravděpodobné, že trend bude z různých důvodů, ať už ve snaze dosáhnout tepelné stability vnitřního prostředí, zdražujícímu se kvalitnímu stavebnímu řezivu, nebo i za účelem ochrany objektu vůči povětrnostním vlivům a extrémním klimatickým jevům a úkazům, dále stoupat.

V rámci disertační práce bylo prokázáno, že se k těmto konstrukcím musí přistupovat individuálně a naprosto odlišným způsobem, který zamezí chybám v jejich použití, které při zanedbání vedou k energeticky náročnějším a horším stavům vnitřního prostředí. Náležitá pozornost by měla být věnována nejen hmotné konstrukci šikmé střechy a materiálu, ze kterého je zhotovena, ale veškerých vrstev s ní související. Jejich vliv na celkové tepelně-vlhkostní a akumulční vlastnosti se projevuje nejen v kontextu celé skladby, ale také z hlediska dlouhodobého časového horizontu na samotném hmotném materiálu.

Při správném pochopení ve spojení s vhodnou orientací a adekvátní optimalizací skladby pomocí vhodných stavebních úprav vedou hmotné pláště šikmých střech k teplotně velmi stabilnímu vnitřnímu prostředí, které má potenciál vést ke snížení energetických ztrát objektu a velmi vhodné tepelné pohodě uživatelů napříč celým ročním obdobím.

I. BIBLIOGRAFIE

1. *Směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepracování): ve znění změny M1 - Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018 a změny M2 - Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1999 ze dne 11. prosince 2018.* In: . Štrasburk: EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE, 2010, ročník 1, číslo 1.
2. *Passive House Institute: Superior energy efficiency in buildings.* [online]. 2015 [cit. 2021-7-23]. Dostupné z: http://www.passiv.de/en/01_passivehouseinstitute/01_passivehouseinstitute.htm
3. ČSN 73 0540-2 (730540) *Tepelná ochrana budov.: Část 2: Funkční požadavky.* 10.2011. Praha: Centrum technické normalizace, 2011.
4. ČSN 73 1901-1 (731901) *Navrhování střech: Část 1: Základní ustanovení.* 11.2020. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
5. ČSN 73 1901-2 (731901) *Navrhování střech: Část 2: Střechy se skládanou střešní krytinou.* 11.2020. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
6. ČSN 73 1901-3 (731901) *Navrhování střech: Část 3: Střechy s povlakovými hydroizolacemi.* 11.2020. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
7. ČSN 73 0540-1 (730540) *Tepelná ochrana budov.: Část 1: Terminologie.* 07.2005. Praha: Centrum technické normalizace, 2005.
8. ČSN 73 0540-3 (730540) *Tepelná ochrana budov.: Část 3: Návrhové hodnoty veličin.* 12.2005. Praha: Centrum technické normalizace, 2005.
9. ČSN 73 0540-4 (730540) *Tepelná ochrana budov.: Část 4: Výpočtové metody.* 07.2005. Praha: Centrum technické normalizace, 2005.
10. *Zákon č. 183/2006 Sb.: Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon).* In: . Praha: Parlament České republiky, 2006.
11. BANTOVÁ, Sylva. *Tepelná technika budov – Modul 03: Neustálený teplotní stav.* 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Fakulta stavební, 2014.
12. *Vyhláška č. 194/2007 Sb.: Vyhláška, kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími dodávku tepelné energie konečným spotřebitelům.* In: . Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2007, ročník 1, číslo 1.
13. *Zákon č. 258/2000 Sb.: Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů.* In: . Praha: Parlament České republiky, 2000, ročník 1, číslo 1.
14. AULICIEMS, Andris a Steven V. SZOKOLAY. *Thermal comfort.* 1. Brisbane, Qld: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland, 1997. ISBN 0867767294.
15. *Tepelně-vlhkostní mikroklima* [online]. WikiSkripta, 2018 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Tepeln%C4%9B-vlhkostn%C3%AD_mikroklima
16. RODRIGUES, Eugénio, Marco S. FERNANDES, Adélio Rodriguez GASPAR, Álvaro GOMES a José J. COSTA. Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass, *Applied Energy*. *Applied Energy*. 2019, 252, 1-15. ISSN 0306-2619.
17. RODRIGUES, Eugénio a Marco S. FERNANDES. Overheating risk in Mediterranean residential buildings: Comparison of current and future climate scenarios. *Applied Energy*. 2020, 256, 1-12. ISSN 0306-2619.
18. OROSA, José A. a Armando C. OLIVEIRA. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. *Renewable Energy*. 2012, 37(1), 89-86. ISSN 0960-1481.

-
19. Bianco, V.; Diana, A.; Manca, O.; Nardini, S.; Numerical investigation of an inclined rectangular cavity for ventilated roofs applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 6, 2018, p. 426-435. ISSN 2451-9049.
 20. Li, H.; Li, J.; Xi, Ch.; Chen, W.; Kong, X.; Experimental and numerical study on the thermal performance of ventilated roof composed with multiple phase change material (VR-MPCM). *Energy Conversion and Management*, Volume 213, 2020. ISSN 0196-8904.
 21. OSTRÝ, Milan a Pavel CHARVÁT. Materials for Advanced Heat Storage in Buildings. *Procedia Engineering*. United Kingdom, 2013, 57, 837-843. ISSN 1877-7058.
 22. SHARIFI, Sormeh, Wasim SAMAN a Alemu ALEMU. Identification of overheating in the top floors of energy-efficient multilevel dwellings. *Energy and Buildings*. 2019, 204, 1-18. ISSN 0378-7788.
 23. SHAVIV, Edna, Abraham YEZIORO a Issac G. CAPULETO. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy: An International Journal*. 2001, 24(3-4), 445-452. ISSN 0960-1481.
 24. SCHADE, Jutta, Sofia LIDELÖW a Joel LÖNNQVIST. The thermal performance of a green roof on a highly insulated building in a sub-arctic climate. *Energy and Buildings*. 2021, 241, 12. ISSN 0378-7788.
 25. SUSCA, T., S. R. GAFFIN a G. R. DELL'OSSO. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*. 2011, 159(8-9), 2119-2126. ISSN 0269-7491.
 26. OLIVEIRA, Sandra, Henrique ANDRADE a Teresa VAZ. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*. 2011, 46(11), 2186-2194. ISSN 0360-1323.
 27. SKJELDRUM, Petter Martin a Tore KVANDE. Moisture-resilient upgrading to blue-green roofs. *Energy Procedia*. 2017, 132, 417-422. ISSN 1876-6102.
 28. HNILICA, Ondřej, Stefan BICHLMAIR a Josef PLÁŠEK. Indoor Climate in Jesuit Church of Holy Name of Jesus in Telc. *E3S Web of Conferences*. 2019, 111. ISSN 25550403.
 29. COELHO, G. B. A., H. E. SILVA a F. M. A. HENRIQUES. Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings. *Building and Environment: The International Journal of Building Science and its Applications*. 2018, 142, 439-450. ISSN 0360-1323.
 30. Archiv Autora
 31. ČSN EN ISO 6946 (730558) *Stavební prvky a stavební konstrukce: Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – Výpočtové metody*. 10/2020. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
 32. *DIN 4108-7:2011-01 Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 7: Air tightness of buildings - Requirements, recommendations and examples for planning and performance*. 1/2011. Berlin-Tiergarten: German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2011.
 33. *DIN 4108-11:2018-11 Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 11: Minimum requirements to the durability of bond strength with adhesive tapes and adhesive masses for the establishment of airtight layers*. 1. Berlin-Tiergarten: German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2018.

J. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ TEŽÍ

J.1 Seznam zkratek

ČSN	Česká technická norma	RAD.	Sledovaná radiační teplota
DHV	Doplňková Hydroizolační	RD	Rodinný dům
Vrstva		SOL.	Sledovaná energie solárních
DIN	Deutsche Industrie-Norm	zisků či ztrát	
EN	Evropská norma	TI.	Tloušťka
EPS	Expandovaný polystyren	ÚPST	Ústav pozemního stavitelství
EX_RD	Experimentální rodinný dům	Var.	Varianta
FAST VUT	Fakulta stavební Vysokého učení technického	VENT.	Sledovaná energie ventilace
CHLA.	Sledovaná energie chlazení	VSZ	Vysoké solární zisky
NSZ	Nízké solární zisky	VVV	Větraná vzduchová vrstva
OPE.	Sledovaná operativní teplota	VYT.	Sledovaná energie vytápění
PMC	Phase Change Materials	VZD.	Sledovaná teplota vzduchu
Pozn.	Poznámka	Zabud. Vlhkost	Zabudovaná vlhkost

J.2 Seznam symbolů

$n_{50,N}$	normový rozdíl tlaků 50 Pa	
ρ_s	plošná hmotnost materiálu	[kg·m ⁻²]
c	měrná tepelná kapacita	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
m	hmotnost látky	[kg]
Q	množství tepelné energie	[J]
T	rozdíl počáteční a konečné teploty	[K]
$\theta_2-\theta_1$	teplotní rozdíl ustáleného vedení tepla	[K]
V	objem látky	[m ³]
κ	objemová tepelná kapacita	[J·K ⁻¹ ·m ⁻³]
c_A	plošná tepelná kapacita	[J·K ⁻¹ ·m ⁻²]
ψ	fázový posun teplotního kmitu	[-]
D^*	tepelná setrvačnost konstrukce	[h]
θ_{ai}	teplota vzduchu	[°C]
θ_g	radiační teplota/teplota kulového teploměru	[°C]
θ_0	operativní teplota vzduchu	[°C]
θ_r	střední teplota sálání	[°C]
φ_{ai}	relativní vlhkost vzduchu	[%]
θ_{wb}	teplota mokrého teploměru	[°C]
θ_{dp}	teplota rosného bodu	[°C]
v_a	rychlost proudění vzduchu	[m·s ⁻¹]
θ_{rad}	radiační teplota	[°C]
θ_{ope}	operativní teplota	[°C]
n_x	porozita	[-]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
μ	faktor difúzního odporu	[-]
d	délka	[m]
R_{se}	tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně	[m ² ·K·W ⁻¹]
R_{si}	tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně	[m ² ·K·W ⁻¹]
q	hustota tepelného toku	[W·m ⁻²]
θ	teplota	[K]
si	vnitřní konstrukce, vnitřní povrch	[-]