

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební



Disertační práce

Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

The thermal-humidity analysis of light weight building
structures

Autor: Ing. Denisa Valachová
Školitel: doc. Ing. Iveta Skotnicová, Ph.D.
Datum: leden 2018
Studijní obor: 3607V025 Teorie konstrukcí
Školící pracoviště: Katedra prostředí staveb a TZB

Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

Disertační práce

Název: Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí
Autor: Denisa Valachová, Ing.
Místo, rok, vydání: Ostrava, 2018, 1. vydání
Počet stran: 145
Vydala: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Školící pracoviště: Katedra prostředí staveb a TZB
Tisk: VŠB-TU Ostrava
Náklad: 5 ks
ISBN 978-80-248-4147-2 (autoreferát)

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala své školitelce doc. Ing. Ivetě Skotnicové, Ph.D. za pomoc a cenné rady, které mi poskytovala při zpracovávání této disertační práce, a také za trpělivost a podporu v průběhu celého studia. Rovněž děkuji celé své rodině a kolegům za podporu při studiu a především za motivaci k dokončení této práce.

Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

Disertační práce

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

.....

V Ostravě 21.1.2018

Ing. Denisa Valachová

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na mojí disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě disertační práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk disertační práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího disertační práce. Souhlasím s tím, že údaje o disertační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – disertační práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

.....

V Ostravě 21.1.2018

Ing. Denisa Valachová

Obsah

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Úvod | 10 |
| 2. Přehled o současném stavu problematiky | 11 |
| 2.1. <i>Stav problematiky v ČR</i> | 11 |
| 2.1.1. Legislativa | 11 |
| 2.1.2. Tepelně-technické požadavky v ČR | 13 |
| 2.1.3. Vývoj stavebních konstrukcí v ČR | 18 |
| 2.2. <i>Stav problematiky v zahraničí</i> | 19 |
| 2.2.1. Legislativa | 19 |
| 2.2.2. Stavební konstrukce | 23 |
| 2.3. <i>Šíření tepla ve stavebních konstrukcích</i> | 24 |
| 2.3.1. Matematické vyjádření šíření tepla vedením | 26 |
| 2.3.2. Matematické vyjádření šíření tepla prouděním | 28 |
| 2.3.3. Matematické vyjádření šíření tepla sáláním | 29 |
| 2.4. <i>Šíření vlhkosti ve stavebních konstrukcích</i> | 31 |
| 2.4.1. Matematické vyjádření šíření vodních par | 32 |
| 2.5. <i>Konstrukční systémy dřevostaveb</i> | 34 |
| 3. Cíl a obsah disertační práce | 38 |
| 4. Metody zpracování | 39 |
| 4.1. <i>Experimentální analýza chování lehkých stavebních konstrukcí</i> | 39 |
| 4.1.1. Experimentální budova | 40 |
| 4.1.2. Měření fyzikální veličiny | 42 |
| 4.1.3. Vyhodnocení chyb měření | 46 |
| 4.1.4. Analýza výsledků měření teplot a relativních vlhkostí | 47 |
| 4.2. <i>Teoretická analýza chování lehkých obvodových konstrukcí</i> | 64 |
| 4.2.1. Analytické metody výpočtu šíření tepla | 64 |
| 4.2.2. Analytické metody výpočtu šíření vlhkosti | 70 |
| 4.2.3. Analytické metody výpočtu větraných vzduchových vrstev | 74 |
| 4.2.4. Vyhodnocení výsledků teoretických výpočtů analytickými metodami | 77 |
| 4.2.5. Numerické metody | 81 |
| 4.2.6. Vyhodnocení výsledků teoretických výpočtů numerickými metodami pro stacionární okrajové podmínky | 89 |

Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

Disertační práce

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.7. Vyhodnocení výsledků teoretických výpočtů numerickými metodami pro nestacionární okrajové podmínky | 95 |
| 5. Výsledky disertační práce | 100 |
| 5.1. Porovnání experimentální a teoretické analýzy | 100 |
| 6. Závěr | 107 |
| 7. Závěry pro realizaci v praxi | 109 |
| 8. Doporučení pro další postup výzkumu | 110 |
| 9. Použitá literatura | 111 |
| 10. Seznam publikací | 115 |
| 11. Seznam tabulek | 118 |
| 12. Seznam obrázků | 119 |
| 13. Přílohy | 122 |
| 13.1. Výsledky měření teplot a relativních vlhkostí – zimní období | 122 |
| 13.2. Výsledky měření teplot a relativních vlhkostí – jarní období | 130 |
| 13.3. Výsledky měření teplot a relativních vlhkostí – letní období | 135 |
| 13.4. Výsledky měření relativních vlhkostí uvnitř konstrukcí | 143 |

Abstrakt

Tato disertační práce je zaměřena na tepelně technické hodnocení lehkých stavebních konstrukcí obálky budovy. Klade si za cíl vyhodnotit výsledky experimentálního měření tepelně-vlhkostních parametrů obvodových konstrukcí experimentálního pasivního domu, jenž je konstrukčně řešen jako stavba na bázi dřeva s lehkými obvodovými konstrukcemi. Obvodové konstrukce dřevostavby jsou řešeny jako difúzně otevřené a proto je kromě hodnocení tepelně izolačních vlastností věnována pozornost také hodnocení prostupu vodních par konstrukcemi. Hodnocení je provedeno nejen pro zimní období, ale také pro letní období, kdy se pasivní stavby na bázi dřeva často potýkají s problematikou přehřívání. Kromě experimentální analýzy je předmětem disertační práce také podrobný teoretický rozbor tepelně technické problematiky. Zároveň je provedeno porovnání výsledků tepelně-technických výpočtů a výsledků experimentálního měření. Toto porovnání je provedeno pro účely posouzení vhodnosti predikce chování lehkých obvodových konstrukcí pomocí hodnocených výpočtových metod.

Klíčová slova: lehké obvodové konstrukce, dřevostavba, pasivní budovy, tepelně-technické vlastnosti

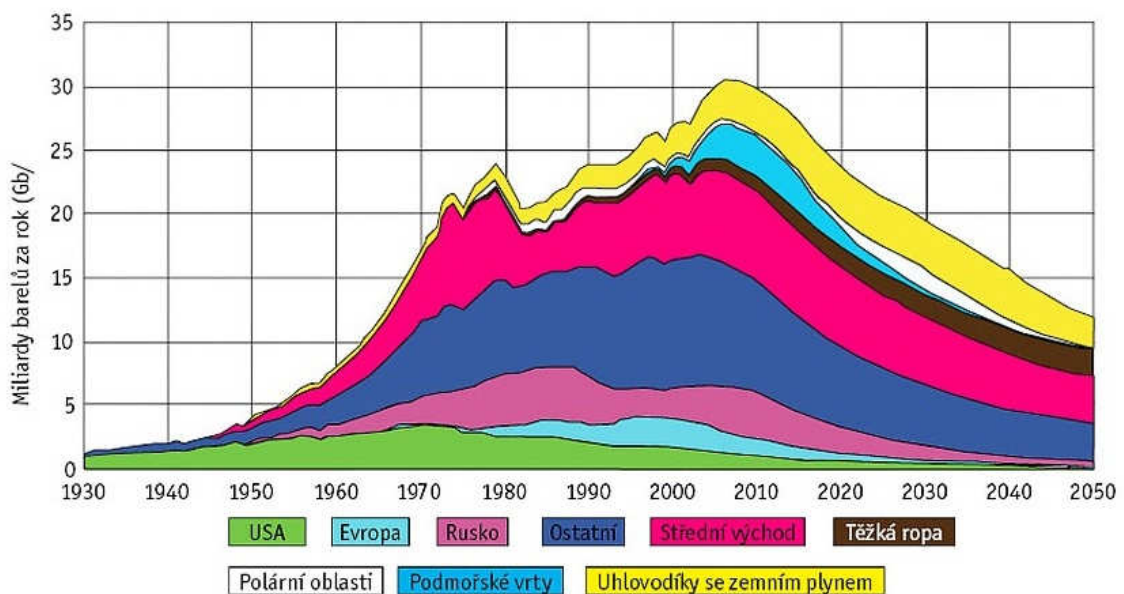
Abstract

This dissertation is focused on the thermal technical assessment of light weight building structures of the building envelope. The aim of the dissertation is to evaluate results of the experimental measurement of thermal and humidity parameters of peripheral structures of a passive house. The passive house is designed as a timber frame building with light weight building structures. The peripheral structures are designed as diffuse open structures. Therefore, an attention is also paid to the assessment of water vapor transmission inside the structures. The assessment of the structures is done not only for the winter season, but also for the summer season when passive timber frame buildings are often confronted with problems of overheating. In addition to the experimental analysis, there is also carried out detailed theoretical analysis of the thermal-technical issue. The aim of the dissertation is also a comparison of the results of the theoretical thermo-technical calculations and the results of experimental measurements. This comparison is made for the purpose of assessing the suitability of prediction of thermal-technical parameters of light weight structures by using of evaluated calculation methods.

Keywords: light weight structures, timber frame building, passive houses, thermal-technical parameters

1. Úvod

Vývoj pozemního stavitelství je dnes úzce spjat s nároky na snižování energetické náročnosti budov. Důvodem je především fakt, že téměř čtyřicet procent veškeré energie v Evropě je spotřebováváno právě budovami. Zároveň většina energie, kterou naše společnost spotřebovává, pochází z neobnovitelných zdrojů (cca 85 %) [1]. Snižování energetické náročnosti budov je tedy v souvislosti s globálními změnami klimatu a snižujícími se zásobami fosilních paliv úzce spojeno. Jelikož je životnost budov podle vyhlášky č. 3/2008 Sb. (tzv. oceňovací vyhláška) řádově 80-100 let [2], lze předpokládat, že životnost budov, které jsou dnes stavěny, zasáhne do doby, kdy již budou zásoby ropy a plynu velmi nízké viz Obr. 1.



Obr. 1: Předpokládaný vývoj zásob ropy a kapalných uhlovodíků [3]

Z tohoto důvodu je třeba klást vysoké požadavky na tepelnou ochranu budov již dnes [4]. Požadavky na energetickou náročnost budov se proto s ohledem na hospodaření energií zásadním způsobem zpřísnují. Dle zákona č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů [5], lze od 1. ledna 2013 stavět pouze budovy, které splňují požadavky na energetickou náročnost budovy na tzv. nákladově optimální úrovni. V období od roku 2013 do 2020 se tento požadavek postupně zpřísnuje, v závislosti na typu a velikosti objektu. Od roku 2020 však již bude možné realizovat pouze takové novostavby, které budou splňovat požadavky na energetickou náročnost budovy s téměř nulovou spotřebou energií.

Energetická náročnost budov je ovlivněna spoustou faktorů, které souvisí jak s koncepcí budovy, tak také s následným způsobem jejího užívání. Množství energie, které je nutné do budovy dodat, je ovlivněno především její tepelnou ztrátou, která souvisí s větráním budovy a tepelně-technickými parametry teplosměnných konstrukcí

na systémové hranici obálky budovy [6]. Energetickou náročnost budov dále zásadním způsobem ovlivňuje návrh systémů technického zařízení budovy, orientace budovy ke světovým stranám, tvar budovy, vzduchotěsnost a mnoho dalšího [7]. Obecně lze říci, že v případě stávajících budov je pro snižování jejich energetické náročnosti zásadní provedení stavebních úprav v rámci obálky budovy, modernizace otopných soustav a jejich vyregulování. Jinak je tomu u nově navrhovaných budov. Zde je třeba nepohlížet na budovu pouze jako stavební konstrukce s jejím technickým zařízením, ale jako na celek, který má být funkční, zajišťovat uživatelský komfort a v maximální možné míře využívat pasivní zisky. Toho lze docílit především správným dispozičním návrhem, tvarem budovy a vhodným rozmístěním výplní otvorů v rámci obálky budovy. Tato disertační práce se zaměřuje dále pouze na oblast tepelně-technické problematiky stavebních konstrukcí. V souvislosti se zvyšujícími se tepelně-technickými požadavky na stavební konstrukce je však třeba uvést, že další zmíněné faktory budou ovlivňovat energetickou náročnost budov stále větším podílem.

Při návrhu skladby konstrukcí klasických zděných staveb je obvykle pro snížení tepelné propustnosti konstrukcí využíváno kontaktních zateplovacích systémů. Například při návrhu obvodové stěny, splňující hodnoty součinitele prostupu tepla doporučené pro pasivní budovy $U_{pas,20}$ [8], se dnes tloušťka samotného tepelného izolantu běžně pohybuje v rozmezí 200 - 300 mm, v závislosti na typu nosné konstrukce. Zvětšováním tloušťky konstrukcí dochází buď ke zmenšení vnitřní podlahové plochy objektu, nebo ke zvětšení obestavěného prostoru budovy. Toto je samozřejmě z pohledu investora nežádoucí. Proto se jeví jako vhodná alternativa výstavba objektů s lehkými obvodovými konstrukcemi. Výhodou lehkých obvodových konstrukcí je především to, že tepelný izolant se stává součástí nosné vrstvy a tak nedochází k dalšímu zvětšování celkové tloušťky konstrukce. Lze říci, že celková tloušťka lehké obvodové konstrukce oproti klasické zděné konstrukci je při zachování shodných tepelně-izolačních vlastností výrazně nižší. Disertační práce se zaměřuje právě na chování těchto lehkých obvodových konstrukcí z pohledu stavební tepelné techniky.

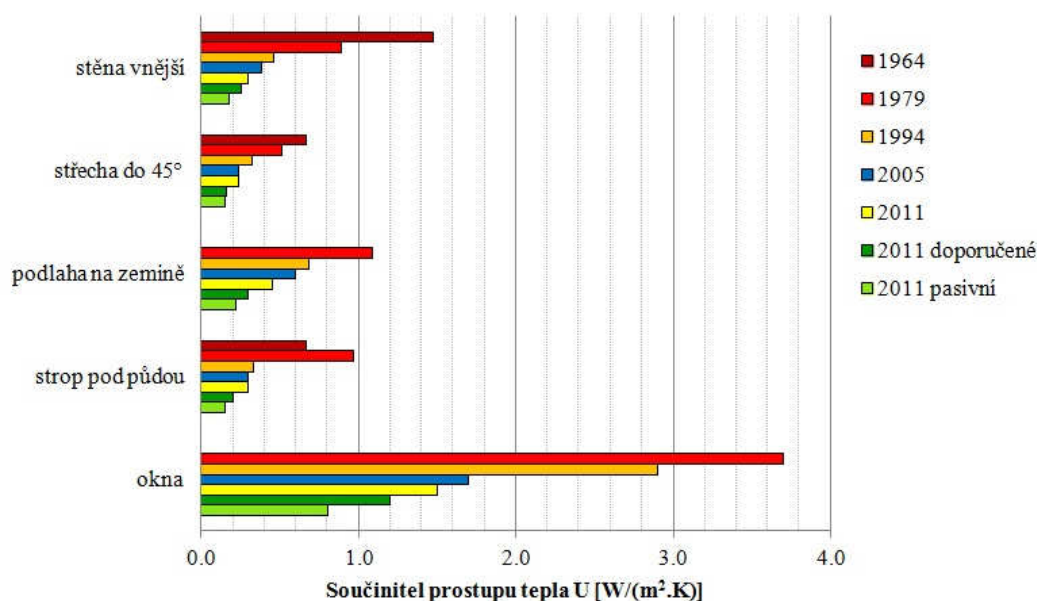
2. Přehled o současném stavu problematiky

2.1. Stav problematiky v ČR

2.1.1. Legislativa

Přestože již před druhou světovou válkou existovala snaha stavět tak, aby bylo dosaženo energetických úspor, prvním právním předpisem, který definoval tepelně-technické požadavky, byla norma ČSN 1450 „*Výpočet tepelných ztrát budovy při navrhování ústředního vytápění*“, která byla vydaná roku 1949. Dříve byly tepelně-technické vlastnosti konstrukcí spojovány pouze se zdivem z cihel plných pálených tloušťky 450 mm, které bylo součástí tehdejších doporučení „jak správně topit“. Tepelný

odpor tohoto zdiva byl jakýmsi tepelně-technickým hodnotícím kritériem - označováno jako tzv. „cihelný ekvivalent“. Norma ČSN 1450 (1949) pak jako první formulovala tepelně-technické požadavky na základní stavební konstrukce. V dalších letech docházelo k úpravám tepelně technických požadavků v revizích normy ČSN 1450 (1949) a také normou ČSN 73 0020 (1954) „*Obytné budovy*“. Vývoj topenářských a tepelně-technických norem se rozdělil roku 1961, kdy byla vydána samostatná topenářská norma ČSN 06 0210. První výhradně tepelně-technickou normou byla ČSN 73 0540 (1962) „*Navrhování stavebních konstrukcí z hlediska stavební tepelné techniky*“, která vešla v platnost roku 1963. Od roku 1963 pak došlo k významnému rozvoji oboru stavební tepelné techniky, kdy byly postupně vydávány revize této normy. K razantnímu zpřísnění tepelně-technických požadavků na stavební konstrukce došlo vydáním revize ČSN 73 0540 „*Tepelně technické vlastnosti stavebních konstrukcí a budov. Názvosloví. Požadavky a kritéria.*“ z roku 1977, která vešla v platnost roku 1979. K zásadnímu zpřísnění požadavků došlo v důsledku tehdejší energetické krize. Kromě zpřísnění požadavků norma zavádí kromě hodnocení samotných stavebních konstrukcí také další tepelně-technické požadavky jako například hodnocení letní a zimní tepelné stability a jiné [9]. K další razantní změně pak došlo roku 1994, kdy byla vydána první samostatná česká norma ČSN 73 0540 „*Tepelná ochrana budov*“ [10]. Na Slovensku již tato norma nebyla vydána a vývoj tepelně-technických norem je od té doby v obou zemích mírně odlišný. Jelikož je ČR členským státem evropské normalizační komise CEN, je povinností přejímat do systému českých technických norem normy evropské [9]. V důsledku tohoto již norma prošla několika úpravami, kdy došlo jak ke zpřísnění požadavků na tepelně-technické vlastnosti stavebních konstrukcí, tak také ke změnám ve výpočtových metodách. Vývoj tepelně-technických požadavků na stavební konstrukce, konkrétně na součinitel prostupu tepla U, v letech 1964 -2011 je patrný z Obr. 2.



Obr. 2: Vývoj normových požadavků na součinitel prostupu tepla vybraných stavebních konstrukcí v letech 1964 – 2011

2.1.2. Tepelně-technické požadavky v ČR

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, základní požadavky na tepelně technické vlastností stavebních konstrukcí a budov stanoví norma ČSN 73 0540/2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky* z roku 2011 ve znění změny Z1 z roku 2012 [8]. Požadavky lze rozdělit do 4 kategorií.

- **Šíření tepla konstrukcí a obálkou budovy**

- Součinitel prostupu tepla U

Jedná se o požadavek, který hodnotí schopnost konstrukce bránit šíření tepla s ohledem na směr tepelného toku. Tento požadavek je ve stavební praxi běžnou součástí návrhu skladeb obvodových konstrukcí.

$$U \leq U_N, \quad (1)$$

kde je

- U součinitel prostupu tepla ($W/(m^2 \cdot K)$),
- U_N , požadovaný součinitel prostupu tepla ($W/(m^2 \cdot K)$).

Mimo požadovaných hodnot součinitele prostupu tepla norma zavádí tzv. doporučenou hodnotu součinitele prostupu tepla U_{rec} , kterou je doporučeno dodržet při návrhu nových konstrukcí a také při zateplení stávajících konstrukcí, pokud je to technicky možné. V případě hodnocení energetické náročnosti budov při větší změně budovy je v některých případech dokonce nutné splnit právě doporučenou hodnotu součinitele prostupu tepla U_{rec} . Doporučená hodnota součinitele prostupu tepla je běžně používaná také jako hodnotící kritérium v případě dotačních titulů pro účely snižování energetické náročnosti budov. Kromě požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla norma zavádí hodnotu doporučenou pro pasivní budovy U_{pas} .

- Průměrný součinitel prostupu tepla U_{em}

Jedná se o požadavek, který hodnotí obálku budovy jako celek. Hodnota průměrného součinitele prostupu tepla se stanoví dle vztahu (2). Požadavek je stanoven dle vztahu (3). Stejně jako v případě součinitele prostupu tepla je i v tomto případě stanovená doporučená hodnota průměrného součinitele prostupu tepla, která odpovídá 75 % požadované hodnoty.

$$U_{em} = \frac{H_T}{A}, \quad (2)$$

kde je

- U_{em} průměrný součinitel prostupu tepla ($W/(m^2 \cdot K)$),
- H_T měrná ztráta prostupem tepla (W/K),
- A teplosměnná plocha obálky budovy (m^2).

$$U_{em} \leq U_{em,N} , \quad (3)$$

kde je

U_{em} průměrný součinitel prostupu tepla ($W/(m^2 \cdot K)$),

$U_{em,N}$ požadovaný průměrný součinitel prostupu tepla ($W/(m^2 \cdot K)$).

- Nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce θ_{si}

Hodnocení vnitřní povrchové teploty konstrukce je velmi důležité z důvodu vyloučení možného vzniku poruchy – v případě neprůsvitných konstrukcí se jedná o možný růst plísní, v případě průsvitných konstrukcí omezení rizika vzniku povrchové kondenzace vodní páry. Jedná se o požadavek, který se týká především ochrany zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí [9]. Nejnižší vnitřní povrchová teplota se hodnotí v poměrném tvaru jako tzv. teplotní faktor vnitřního povrchu f_{Rsi} , který se stanoví dle vztahů (4) a (5). Výhodou hodnocení konstrukcí pomocí teplotního faktoru f_{Rsi} je fakt, že vyjadřuje téměř čistou vlastnost konstrukčního řešení a, na rozdíl od přímého hodnocení vnitřní povrchové teploty, není závislý na teplotách přilehlých prostředí. Hodnotu f_{Rsi} tedy lze za standardních okrajových podmínek považovat za stálou vlastnost konkrétního detailního řešení [9].

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_{ai} - \theta_e} = 1 - \frac{\theta_{ai} - \theta_{si}}{\theta_{ai} - \theta_e} , \quad (4)$$

$$f_{Rsi} = 1 - U_x \cdot R_{si} , \quad (5)$$

kde je

f_{Rsi} teplotní faktor vnitřního povrchu (-),

θ_{si} vnitřní povrchová teplota konstrukce ($^{\circ}C$),

θ_{ai} teplota vnitřního vzduchu ($^{\circ}C$),

θ_e návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období ($^{\circ}C$),

U_x lokální součinitel prostupu tepla v místě x konstrukce ($W/(m^2 \cdot K)$),

R_{si} odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ($(m^2 \cdot K)/W$).

Níže uvedený požadavek (6) je stanoven pouze pro prostory s vnitřní návrhovou relativní vlhkostí ≤ 60 %. V ostatních případech je nutné zajistit splnění požadavku, tedy vyloučení rizika růstu plísní, jiným způsobem. Zároveň musí být vyloučeno riziko vzniku kondenzace na povrchu konstrukce, případně je nutno prokázat, že kondenzace nemá negativní vliv na bezchybnou funkci konstrukce.

$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} , \quad (6)$$

kde je

$f_{Rsi,N}$ požadovaná hodnota teplotního faktoru vnitřního povrchu (-),

$f_{Rsi,cr}$ kritický teplotní faktor vnitřního povrchu (-).

- Lineární a bodový činitel prostupu tepla

Slouží k vyhodnocení kvality provedení lineárních a bodových tepelných vazeb. Opět jsou zavedeny tři hodnoty a to požadované, doporučené a doporučené pro pasivní budovy.

$$\psi \leq \psi_N , \quad (7)$$

$$\chi \leq \chi_N , \quad (8)$$

kde je

| | |
|----------|--------------------------------------------------------------------|
| ψ | lineární činitel prostupu tepla (W/(m · K)), |
| ψ_N | požadovaná hodnota lineárního činitele prostupu tepla (W/(m · K)), |
| χ | bodový činitel prostupu tepla (W/K), |
| χ_N | požadovaná hodnota bodového činitele prostupu tepla (W/K). |

- Pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{l0}$

• **Šíření vlhkosti konstrukcí**

Kondenzace vodní páry uvnitř konstrukcí může zásadním způsobem ovlivňovat její únosnost a životnost. Mimo to však také dochází vlivem vlhkosti ke zvýšení tepelné vodivosti materiálů a s tím souvisejícími problémy jako je vznik plísní, snížení vnitřní povrchové teploty atd. Výpočet množství zkondenzované vodní páry se standardně provádí bilančním výpočtem s měsíčním krokem za použití měsíčních návrhových klimatických údajů. Norma stanovuje v oblasti šíření vlhkosti konstrukcí dva požadavky a to:

- Zkondenzovaná vodní pára uvnitř konstrukce

V případě konstrukcí, u kterých by kondenzace vodní páry ohrozila jejich požadovanou funkci, nesmí ke kondenzaci vodní páry uvnitř konstrukce dojít dle vztahu (9). Typicky se jedná o případnou kondenzaci vodní páry v místě nasákavých vrstev konstrukcí, jako jsou vláknité izolanty, nebo uvnitř konstrukcí se zabudovanými dřevěnými prvky, jako např. dřevěný krov.

$$M_c = 0, \quad (9)$$

kde je

M_c množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce (kg/(m². rok)).

V ostatních je dáno maximální množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce v průběhu jednoho roku dle vztahu (10).

$$M_c \leq M_{c,N} , \quad (10)$$

kde je

$M_{c,N}$ množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce (kg/(m² · rok))

- a) 0,10 kg/(m² · rok) nebo max. 3 % , případně 6 % plošné hmotnosti materiálu, ve kterém ke kondenzaci dochází, dle jeho objemové hmotnosti: tento požadavek platí pro jednoplášťové střechy, konstrukce se zabudovanými dřevěnými prvky a konstrukce s vysokým difúzním odporem vnějších povrchových vrstev,
- b) 0,50 kg/(m² · rok) nebo max. 5 % , případně 10 % plošné hmotnosti materiálu, ve kterém ke kondenzaci dochází, dle jeho objemové hmotnosti: tento požadavek platí pro ostatní konstrukce.

- Roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry v konstrukci

V případě, že je u konstrukce uplatněn požadavek dle vztahu (10), pak je nutné vyhodnotit také roční bilanci kondenzace a vypařování vodní páry v konstrukci. Požadavkem je, že na konci hodnoceného roku musí v konstrukci zůstat nulové množství zkondenzované vodní páry, jak uvádí vztah (11).

$$M_c \leq M_{ev} , \quad (11)$$

kde je

M_{ev} roční množství vypařitelné vodní páry uvnitř konstrukce (kg/(m² · rok)).

• **Šíření vzduchu konstrukcí a budovou**

Šíření vzduchu konstrukcí a budovou je hodnoceno pomocí dvou základních kritérií:

- Průvzdušnost

Průvzdušnost hodnotí samotné konstrukce a obálku budovy s hlediska netěsností, které negativně ovlivňují energetickou náročnost budovy. Ve stavební praxi je nejčastěji hodnocena celková průvzdušnost obálky budovy, která se ověřuje pomocí celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} při tlakovém rozdílu mezi vnitřním a vnějším prostředím o hodnotě 50 Pa. Intenzita výměny vzduchu n_{50} se stanovuje experimentálně pomocí tzv. blower-door testu. Přestože norma pouze doporučuje splnění daných hodnot intenzity výměny vzduchu, v rámci výstavby pasivních budov se obecně dbá na to, aby byly netěsnosti v obálce budovy eliminovány a aby byly tyto doporučené hodnoty dodrženy. Splnění doporučených hodnot intenzity výměny vzduchu je mimo jiné používáno jako kritérium hodnocení budov z hlediska dotačních programů.

- Větrání místností

V případě větrání místností se naopak jedná o hygienický požadavek, kdy jsou stanoveny minimální hodnoty intenzity větrání místností, kdy musí být zajištěna požadovaná výměna vzduchu v místnosti. Tento požadavek úzce souvisí s koncentrací CO₂ uvnitř místností, která má zásadní vliv na lidské zdraví. Výměna vzduchu může být zajištěna nuceným větráním nebo přirozeně okny.

• **Tepelná stabilita místností**

Tepelná stabilita se hodnotí pro zimní a letní období a slouží k zajištění lidského komfortu uvnitř obytných místností.

- Pokles výsledné teploty v místnosti v zimním období

$$\Delta\theta_v(t) \leq \Delta\theta_{v,N}(t), \quad (12)$$

kde je

$\Delta\theta_v(t)$ pokles výsledné teploty v místnosti na konci doby chladnutí t (°C),

$\Delta\theta_{v,N}(t)$ požadovaná hodnota poklesu výsledné teploty v místnosti (°C).

- Tepelná stabilita místnosti v letním období

$$\theta_{ai,max} \leq \theta_{ai,max,N}, \quad (13)$$

kde je

$\theta_{ai,max}$ nejvyšší denní teplota vzduchu v místnosti (°C),

$\theta_{ai,max,N}$ požadovaná hodnota nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti (°C).

Hodnocení tepelné stability místností lze provádět zjednodušeným výpočtem podle ČSN 73 0540-4 [11] nebo lze využít složitějších metod výpočtů podle novějších evropských norem ČSN EN ISO 13791 [12] a ČSN EN ISO 13792 [13], které umožňují komplexnější vyhodnocení chování budov při změnách vnitřních a vnějších podmínek. Výsledné průběhy teplot jsou pak dány simulačním výpočtem na základě fyzikálních tepelně-technických vlastností obvodových konstrukcí dané kritické místnosti, která je posuzována, způsobu stínění výplní otvorů atd. Výhodou těchto metod je především to, že lze výpočty srovnávat se skutečnými změřenými hodnotami. Nevýhodou je nutnost použití vhodného softwaru z důvodu poměrně velké složitosti.

Hodnocení tepelné stability v zimním období se v běžné praxi většinou neprovádí. V souvislosti se snižováním energetické náročnosti budov je tomu však jinak v případě tepelné stability v letním období. Budovy mají být primárně navrhovány tak, aby nebylo

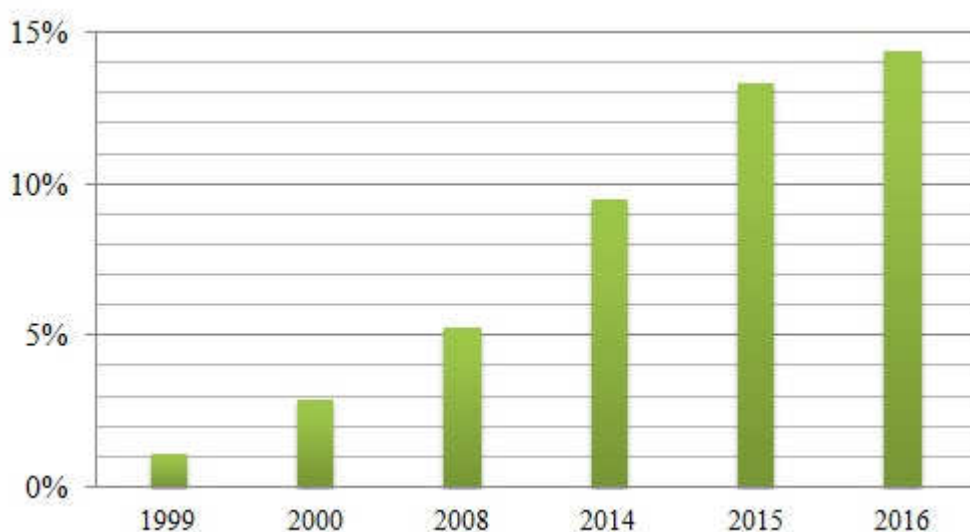
nutné instalovat chladicí zařízení. Problematika přehřívání budov v letním období úzce souvisí s tématem této disertační práce, tedy lehkými obvodovými konstrukcemi. V případě, že součástí budovy s lehkým obvodovým pláštěm nejsou také konstrukce s dostatečnou akumulací schopností, je pak nutno velmi důkladně řešit možnosti stínění a zabránit přehřívání budov.

2.1.3. Vývoj stavebních konstrukcí v ČR

V souvislosti se zvyšujícími se tepelně-technickými požadavky na stavební konstrukce dochází k dynamickému rozvoji moderních stavebních tepelně-izolačních materiálů a také konstrukčních systémů budov. Nejběžnější systém, který se dnes při bytové výstavbě v ČR používá, je zděný. Jedná se o způsob výstavby, který mnoho stavebníků považuje za tradici a z toho důvodu se k tomuto způsobu také většinou přikloní. Pro dosažení požadovaných tepelně-technických vlastností konstrukcí je však velmi často nutné provádět obvodové konstrukce jako sendvičové, tzn. provést kontaktní zateplení nosného systému. Za účelem zlepšení tepelně-izolačních vlastností obvodových konstrukcí je možné vybrat si izolační materiál ze široké nabídky, a to jak z materiálů anorganického, tak organického původu. Rozhodujícím faktorem při výběru je však stále pro většinu investorů jeho ekonomická proveditelnost a z toho důvodu je nejběžněji používaným tepelně-izolačním materiálem pěnový polystyren EPS. V současnosti je stále více využíván šedý EPS s příměsí grafitu s vylepšenými tepelně-izolačními vlastnostmi. Na českém trhu však objevují také speciální zdící tvárnice pro pasivní výstavbu bez nutnosti použití kontaktní zateplení, které jsou vyplněny tepelným izolantem. Tepelný odpor takových tvárnic je pro splnění doporučené hodnoty součinitele tepla pro pasivní budovy $U_{pas,20}$ [8] dostatečný. Nevýhodou výstavby z těchto tvárnic jsou pak problémy s nedostatečnou vzduchotěsností objektů, která velmi úzce souvisí s energetickou náročností budov, problematické zpracovávání tvárnic při výstavbě a samozřejmě také ekonomická náročnost. Lze konstatovat, že kontaktní zateplovací systém se stal trendem dnešní doby, jak v oblasti výstavby nových budov, tak v oblasti stavebních úprav budov stávajících, což úzce souvisí mimo jiné se souvisejícími dotačními programy z oblasti snižování energetické náročnosti stávajících budov. Aplikace zateplovacích systémů v rámci novostaveb v nízkoenergetickém či pasivním standardu je prakticky téměř nevyhnutelná. Alternativou ke klasickým zděným systémům je výstavba budov s lehkými obvodovými konstrukcemi.

V posledních 20 letech je patrný zvýšený zájem investorů o objekty z lehkých konstrukcí na bázi dřeva [3]. Přestože stále přetrvává názor většiny investorů, že zdění je tou nejvhodnější volbou, mnoho z nich již respektuje moderní trendy, související s důrazem na životní prostředí a tradiční hodnoty, a přiklání se k výstavbě dřevostaveb. Volba materiálů použitých při výstavbě by měla vycházet z principu udržitelné výstavby, tedy ze snahy šetřit neobnovitelné materiály, používat materiály s dlouhou životností a s možností ekologické recyklace a likvidace [1] Podíl dřevostaveb na trhu s rodinnými domy se v posledních letech zvýšil na více než 14 % [14], vývoj je patrný z Obr. 3.

Lze očekávat, že při zvyšujících se nárocích na energetickou náročnost budov a zároveň důrazu na ekologii, se bude tento podíl stále zvyšovat. Z historického hlediska je navíc dřevo jedno z nejstarších stavebních materiálů. Kromě samotného zájmu investorů o dřevostavby jako takové, se začíná prosazovat také trend používat při výstavbě ekologické tepelně-izolační materiály. Při kombinaci s dřevěným nosným systémem se pak jedná o ekologické objekty, jelikož materiály použité při výstavbě lze považovat za obnovitelné. V případě vícepodlažních objektů je v České republice bohužel možnost výstavby dřevostaveb spojená s problémy, které souvisí s požadavky na požární ochranu staveb. Do budoucna však lze předpokládat, že i v této oblasti dojde ke změnám v legislativě a následnému kvantitativnímu rozvoji výstavby v oblasti vícepodlažních objektů [15].



Obr. 3: Podíl dřevostaveb na trhu rodinných domů v ČR [14]

2.2. Stav problematiky v zahraničí

2.2.1. Legislativa

Právním základem pro energetické hodnocení budov v zemích Evropské unie je Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2010/31/EU (EPBD II) [6], která byla implementována do českého energetického zákona č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších změn [5]. Tyto předpisy požadují, aby byly nové budovy navrhovány s téměř nulovou spotřebou energie. Záměr snižovat energetickou náročnost budov a zlepšovat tepelně-izolační vlastnosti obvodových konstrukcí je tedy celoevropským a dá se říci, že i celosvětovým trendem v závislosti na klimatu dané země. Tepelně-technickou problematikou stavebních konstrukcí se zabývají odborníci v různých zemích světa [16, 17, 18, 19].

Směrnice o energetické náročnosti budov – EPBD (Energy Performance of Building Directive) [6] je základním dokumentem, který definuje cíle Evropské unie v oblasti energetické náročnosti budov. První směrnice EPBD I 2002/91/EU byla přijata již v roce 2002. Inspirována byla Kjótským protokolem, což je mezinárodní smlouva k Rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách. Průmyslové země se v tomto protokolu zavázaly snížit emise skleníkových plynů o 5,2 %. Vlády mají s ohledem na tento protokol mimo jiné podpořit energeticky úsporné technologie. V červnu roku 2010 byla vydaná novelizace EPBD I a to výše zmíněná EPBD II 2010/31/EU [6], která zachovává veškeré působnosti směrnice EPBD I, ale zároveň rozšiřuje některé požadavky a popisuje je podrobněji. Pro Evropu bylo za cíl stanoveno do roku 2020:

- zvýšení energetické účinnosti o 20 %,
- zvýšení podílů využití obnovitelných zdrojů energie v celkové spotřebě EU o 20 %,
- snížení emisí skleníkových plynů o 20 % oproti roku 1990.

Členské státy EU na základě EPBD II musí přijmout taková opatření, aby od konce roku 2020 byly stavěny pouze budovy s téměř nulovou spotřebou energií a se značným využitím obnovitelných zdrojů. Požadavky jsou definovány na tzv. nákladově optimální úrovni, tedy je nutná rovnováha mezi vstupní investicí a náklady na uspořené energie během životnosti budovy. Pro veřejné budovy tento požadavek musí být při nové výstavbě splněn již po konci roku 2018. Tyto požadavky jednotlivými členskými státy do zákonů a příslušných norem.

Přestože jednotlivé státy přejímají cíle, které jsou stanoveny EPBD II, každý stát sám stanovuje své vlastní požadavky na obvodové konstrukce budov a také způsoby hodnocení a výpočtu energetické náročnosti budov. Následující odstavce jsou blíže věnovány problematice legislativy v oblasti energetického hodnocení budov v České republice, Slovenské republice a Polské republice – konkrétně je porovnáno hodnocení součinitele prostupu tepla U konstrukcí a hodnocení energetické náročnosti budov.

Požadavky na stavební konstrukce – součinitel prostupu tepla U [$W/(m^2 \cdot K)$]

Požadavky na stavební konstrukce jsou v závislosti na legislativně daných státech různé [20]. S ohledem na vyhodnocení a porovnání požadovaných hodnot součinitele prostupu tepla U lze konstatovat, že jsou požadavky dány především klimatickou oblastí, ve které se daný stát nachází. Porovnání požadavků v České republice, Slovenské republice a Polské republice je uvedeno v Tab. 1. Za nákladově optimální úroveň stavebních konstrukcí v České republice se považují konstrukce splňující doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla U dle ČSN 73 0540-2 [8].

Česká republika

Požadavky na součinitele prostupu tepla konstrukcí U jsou stanoveny normou ČSN 73 0540-2 [8]. Jak již bylo uvedeno v Kap. 2.1.1, norma stanoví hodnoty součinitele prostupu tepla U požadované U_N , doporučené U_{rec} a doporučené hodnoty pro pasivní budovy U_{pas} . Hodnota součinitele prostupu tepla v případě této české normy závisí na převažující teplotě vytápěné budovy. Pro budovy s převažující vnitřní návrhovou teplotou 18-22 °C včetně se požadavek stanoví na základě tabulky 3 normy [8]. V zásadě se v tomto případě jedná o všechny bytové a nebytové občanské s převážně dlouhodobým pobytem osob. Pro budovy s odlišnou převažující vnitřní návrhovou teplotou se však požadavek vypočte dle vztahu (14).

$$U_N = U_{N,20} \cdot e_1, \quad (14)$$

kde je

- $U_{N,20}$ požadovaný součinitel prostupu tepla dle tabulky 3 normy [8] ($W/(m^2 \cdot K)$),
- e_1 součinitel typu budovy, stanoví se jako $e_1 = 16/(\theta_{im} - 4)$, kde θ_{im} je převažující vnitřní návrhová teplota v dané budově.

Slovenská republika

Požadavky na součinitele prostupu tepla konstrukcí U jsou stanoveny normou STN 73 0540-2 [22]. Tato norma stanoví hodnoty součinitele prostupu tepla maximální U_{max} , požadované U_N , doporučené $U_{r,1}$ a cílové doporučené hodnoty $U_{r,2}$. Na rozdíl od české normy [8] však požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla U_N platí jednotně pro všechny bytové i nebytové budovy, které jsou vytápěné či klimatizované, bez ohledu na převažující vnitřní teplotu. Výjimkou jsou pouze nebytové výrobní budovy, u kterých musí být splněna tzv. maximální hodnota součinitele prostupu tepla U_{max} , která je oproti české normě v tomto případě uvedena navíc.

Polská republika

Požadavky na součinitele prostupu tepla konstrukcí U jsou stanoveny nařízením Ministerstva dopravy, stavebnictví a námořnického hospodářství [22]. Toto nařízení uvádí pouze požadované hodnoty součinitele prostupu tepla $U_{c(max)}$. Nařízení ve svém původním znění bylo vydáno roku 2013. Požadované hodnoty součinitele prostupu tepla $U_{c(max)}$ uvádí s platností od roku 2014, 2017 a 2021. Na rozdíl od českých a slovenských norem neuvádí jiné než požadované hodnoty součinitele prostupu tepla (např. doporučené). Zároveň však zohledňuje převažující vnitřní návrhovou teplotu budovy a to rozdělením požadavku do tří teplotních kategorií a to pro budovy s převažující vnitřní návrhovou teplotou nad 16 °C včetně, v rozmezí 8-16 °C a pod 8 °C.

Tab. 1: Požadavky na součinitele prostupu tepla konstrukcí U (porovnání hodnot pro budovy s převažující vnitřní teplotou 20 °C)

| Hodnota | Stát | Ozn. | Součinitel prostupu tepla U (W/(m ² · K)) | | | |
|-----------------------|------|--------------|--------------------------------------------------------|------------------|-------------------|---------|
| | | | Typ obvodové konstrukce | | | |
| | | | Obvodová stěna | Střecha (do 45°) | Podlaha na zemině | Okna |
| Požadovaná | ČR | U_N | 0,30 | 0,24 | 0,45 | 1,5 |
| | SR | U_N | 0,32 | 0,20 | 0,30 | 1,1 |
| | PR | $U_{c(max)}$ | 0,23 | 0,18 | * | 1,4 |
| Doporučená 1 | ČR | U_{rec} | 0,25 (těžká) 0,20 (lehká) | 0,16 | 0,30 | 1,2 |
| | SR | $U_{r,1}$ | 0,22 | 0,10 | * | 1,0 |
| Doporučená 2 | ČR | U_{pas} | 0,18-0,12 | 0,15-0,10 | 0,22-0,15 | 0,8-0,6 |
| | SR | $U_{r,2}$ | 0,15 | 0,10 | * | 0,6 |
| Požadovaná od r. 2021 | PR | $U_{c(max)}$ | 0,20 | 0,15 | 0,30 | 0,9 |

*STN 73 0540-2 [21] uvádí pro podlahu na zemině pouze požadované hodnoty tepelného odporu R a to v závislosti na hloubce podlahy a umístění.

Požadavky na energetickou náročnost budov

Stejně jako v případě požadavků na stavební konstrukce jsou v závislosti na legislativně daných státech různé také požadavky na energetickou náročnost budov a způsob jejich stanovení. Níže uvádím porovnání hodnocení energetické náročnosti budov (dále jen ENB) v České republice a Slovenské republice.

Česká republika

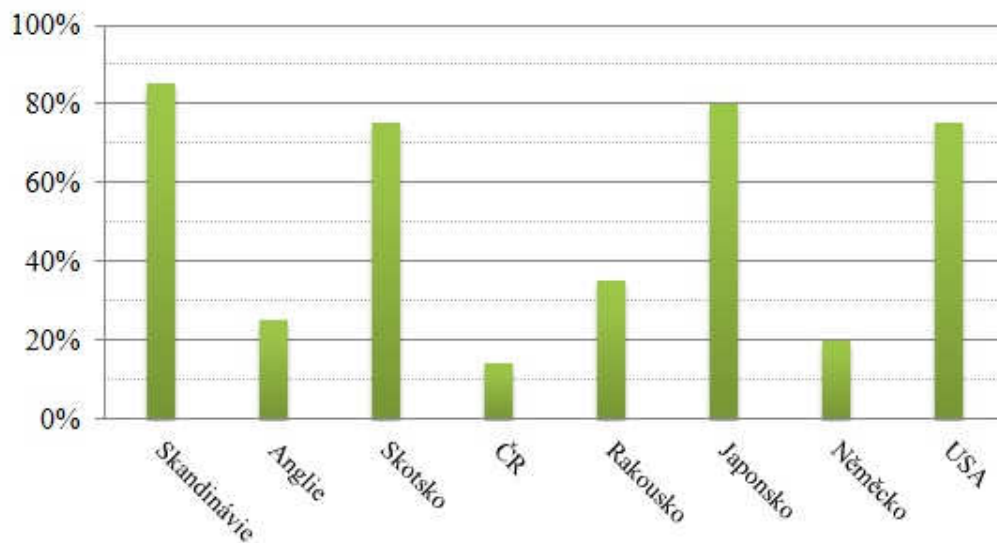
Požadavky na ENB a způsob výpočtu uvádí vyhláška 78/2013 Sb. ve znění pozdějších změn [23]. Výstupem hodnocení ENB je tzv. průkaz energetické náročnosti budovy (PENB). Požadavky na ENB se v tomto případě stanovují pomocí tzv. referenční budovy. Jedná se o budovu, která je svým tvarem i umístěním shodná s budovou posuzovanou, ovšem parametry referenční budovy jsou stanoveny dle přílohy č. 1 této vyhlášky [23]. Referenční budova prakticky reprezentuje budovu na optimální nákladové úrovni ENB. Zařídění posuzované budovy do klasifikačních tříd se provádí taktéž na základě výsledků výpočtu ENB referenční budovy.

Slovenská republika

Na rozdíl od české normy ČSN 73 0540- 2 [8], která neuvádí energetické požadavky na budovy, slovenská norma STN 730540-2 [21] definuje jak základní požadavky, tak také způsob výpočtu. Zároveň však norma [21] definuje energetické požadavky na budovy pouze v podobě požadavku na měrnou potřebu tepla na vytápění. O energiích vstupujících do budovy se dále nezmiňuje. Slouží pouze k posouzení budovy s ohledem na její konstrukční řešení a umístění. Blíže požadavky a výpočet měrné potřeby tepla na vytápění popisuje norma STN EN 15603/NA:2012 [24]. Stejně jako v případě České republiky jsou požadavky na energetickou náročnost budov a způsob jejich výpočtu předmětem vyhlášky. V případě Slovenské republiky se jedná o prováděcí vyhlášku č. 364/2012 Sb. [25] zákona č. 555/2005 Sb. [26]. Výstupem hodnocení ENB je v tomto případě tzv. energetický certifikát. Hodnocení ENB se v zásadě liší především ve způsobu, jakým jsou stanoveny požadavky. Hlavním rozdílem v porovnání s českou legislativou je to, že není zavedena „referenční budova“. Stanovení požadovaných hodnot a způsob zařídění do klasifikačních tříd se provádí dle pevně stanovených hodnot daných ukazatelů na základě typu budovy. Tyto hodnoty jsou stanoveny v příloze č. 3 vyhlášky [25].

2.2.2. *Stavební konstrukce*

Stavby na bázi dřeva jako takové jsou v zahraničí velmi rozšířené, především ve Skandinávii. Podíl dřevostaveb na zahraničním trhu je uveden na Obr. 4 [27]. V mnohých zemích je dřevo rovnocenným materiálem k ostatním stavebním materiálům [28]. Stejně jako v České republice, tak i v zahraničí dochází k vývoji nových stavebních materiálů a konstrukčních systémů na bázi dřeva. Tepelně-technické vlastnosti těchto konstrukcí jsou pak vyhodnocovány a sledovány. V Rakousku a Německu se navíc v posledních letech významně rozšířila výstavba vícepodlažních dřevostaveb a to právě z důvodu snahy vytvářet ekologické budovy v pasivním standardu [29]. Výstavba až osmipatrových dřevěných domů je umožněna například v Austrálii, ve Finsku platí stejný výškový limit už od roku 2010. V Rakousku byla první sedmipatrová dřevostavba realizovaná v roce 2013. Větší budovy z CLT panelů se již běžně realizují také ve Velké Británii [30]. Aktuální zajímavostí je projekt nejvyšší dřevostavby na světě, tzv. HoHo Tower viz Obr. 5, jejíž výstavba byla zahájena ve Vídni roku 2016. Jedná se o 24-podlažní budovu o výšce 84 m [31]. Tato budova je součástí velkého rozvojového projektu Seestadt Aspern na severovýchodě města.



Obr. 4: Podíl výstavby dřevostaveb ve světě [27]



Obr. 5: Vizualizace nejvyššího dřevostavby na světě – HoHo Tower, Vídeň [31]

2.3. Šíření tepla ve stavebních konstrukcích

Pojem teplo se obvykle používá ve smyslu jeho dodaného nebo odebraného množství určité látky. V případě, že je určité látce dodáváno teplo, zvětšuje se zároveň její vnitřní energie. Stejného účinku lze dosáhnout také mechanickou prací, např. třením [32]. Z toho důvodu je možné teplo vyjadřovat ve stejných jednotkách jako mechanickou práci, tedy v Joulech (J). Teplo lze definovat jako formu fyzikální práce, konané při interakcích mezi látkovými částicemi o různých kinetických energiích. Jedná se o energii, která je vyměněna mezi systémem a jeho okolím [33].

Ve stavebních konstrukcích se teplo šíří na základě teplotního gradientu [33]. To znamená, že k přenosu tepla stavební konstrukcí dochází v případě rozdílných teplot na jejím vnějším a vnitřním povrchu. Teplo se v prostředí může šířit třemi způsoby, ve většině případů dochází s šířením tepla v kombinaci těchto způsobů:

- **vedením** (kondukcí),
- **prouděním** (konvekcí),
- **sáláním** (radiací).

Při výpočtech šíření tepla v konstrukcích je nutno rozlišovat tzv. ustálený a neustálený teplotní stav.

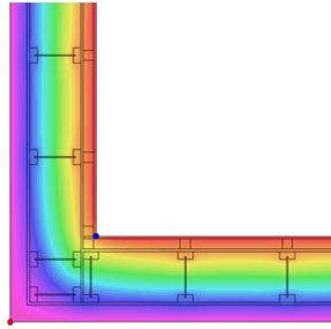
- **Ustálený teplotní stav**

Při ustáleném (stacionárním) teplotním stavu nedochází ke změně teploty v čase. V tomto případě se při tepelně technických výpočtech vychází z předpokladu, že teploty na vnitřní a vnější straně konstrukce se nemění. Teplotní zátěž konstrukce je tak konstantní. Jedná se o zjednodušující předpoklad, který se používá v běžné stavební praxi pro tepelně technické hodnocení stavebních konstrukcí a také k vyhodnocování energetické náročnosti budov. Pro účely stavební praxe je použití ustáleného teplotního stavu jistě dostačující, avšak pro účely této disertační práce bylo využito také neustáleného teplotního stavu, který na rozdíl od ustáleného přesněji vystihuje reálnou odezvu konstrukce na chování přilehlých prostředí.

- **Neustálený teplotní stav**

Při neustáleném (nestacionárním) teplotním stavu naopak dochází ke změně teploty v čase. Neustálený teplotní stav odpovídá reálnému chování konstrukce, teploty v jednotlivých bodech konstrukce se mění v závislosti na čase. V tomto případě se vychází ze skutečnosti, že při rozdílných teplotách dochází po určitém čase k vyrovnání teplot, nastane tzv. tepelná rovnováha. Ve stavební praxi se neustálený teplotní stav běžně nepoužívá. V rámci disertační práce je využito nestacionárního teplotního stavu pro porovnání skutečného chování konstrukcí, získaného experimentálním měřením, a výsledků teoretických výpočtů.

Pro tepelně technické hodnocení konstrukcí se využívá tzv. teplotní pole, což je rozdělení teplot v jednotlivých místech konstrukce v určitém časovém okamžiku. Dle způsobu šíření tepla rozlišujeme jednorozměrné, dvourozměrné a trojrozměrné teplotní pole. Příklad grafického znázornění dvourozměrného teplotního pole je uveden na Obr. 6. V případě stacionárních výpočtů vedení tepla, tedy v případě běžného tepelně technického hodnocení, se jedná o tzv. stacionární teplotní pole. Pro nestacionární vedení tepla je nazýváno jako nestacionární teplotní pole. V tomto případě lze do výpočtu zahrnout vliv proměnlivých okrajových podmínek na vnějším a vnitřním povrchu konstrukce.



Obr. 6: Grafický výstup výpočtu stacionárního teplotního pole (kout obvodové stěny, vytvořeno v SW Area2015)

2.3.1. Matematické vyjádření šíření tepla vedením

Přenos tepla vedením v pevných látkách je transport tepelné energie z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě, ke kterému dochází na základě předávání kinetické energie mezi jednotlivými molekulami dané látky. Šíření tepla vedením je charakterizováno tepelným tokem q , který je přímo úměrný teplotnímu spádu. Tuto závislost matematicky pro stacionární vedení tepla vyjadřuje tzv. **první Fourierův zákon** dle vztahu (14) [34]. Zajímavostí je, že matematický model vedení tepla, který byl popsán v knize „Théorie analytique de la chaleur“ známého francouzského matematika J.-B. Fouriera, je historicky vůbec jedním z prvních matematických modelů [36]. Obr. 7 uvádí ukázkou z této knihy.

THÉORIE ANALYTIQUE DE LA CHALEUR,

PAR M. FOURIER.



CHEZ FIRMIN DIDOT, PÈRE ET FILS,
LIBRAIRES POUR LES MATHÉMATIQUES, L'ARCHITECTURE HYDRAULIQUE
ET LA MARINE, RUE JACOB, N° 24.

1822.

102 THÉORIE DE LA CHALEUR.

D'un autre côté cette même tranche dont la surface extérieure est $l dx$ et dont la température diffère infiniment peu de v , laisse échapper dans l'air pendant l'instant dt une quantité de chaleur équivalente à $h l v dx dt$; il suit de là que cette partie infiniment petite du solide conserve en effet une quantité de chaleur représentée par

$$KS \frac{d^2v}{dx^2} dx dt - h l v dx dt$$

et qui fait varier sa température. Il faut examiner quelle est la quantité de ce changement.

105.

Le coefficient C exprime ce qu'il faut de chaleur pour élever l'unité de poids de la substance dont il s'agit depuis la température 0 jusqu'à la température 1; par conséquent, en multipliant le volume $s dx$ de la tranche infiniment petite par la densité D , pour connaître son poids, et par la capacité spécifique de chaleur C , on aura $C D s dx$, pour la quantité de chaleur qui élèverait le volume de la tranche depuis la température 0 jusqu'à la température 1. Donc l'accroissement de la température qui résulte de l'addition d'une quantité de chaleur égale à $KS \frac{d^2v}{dx^2} dx dt - h l v dx dt$ se trouvera en divisant cette dernière quantité par $C D S dx$. Donc en désignant selon l'usage par $\frac{dv}{dt} dt$ l'accroissement de température qui a lieu pendant l'instant dt , on aura l'équation $\frac{dv}{dt} = \frac{K}{CD} \frac{d^2v}{dx^2} - \frac{h l}{C D S} v$. (b.)

Obr. 7: Ukázkou z knihy J. - B. Fouriera z roku 1822 [31]

$$q = -\lambda \frac{\delta\theta}{\delta x} = -\lambda \cdot \text{grad}\theta, \quad (14)$$

kde je

| | |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| q | hustota tepelného toku (W/m^2), |
| λ | součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), |
| θ | teplota ($^{\circ}\text{C}$), |
| x | souřadnice vyjádření polohy bodu v konstrukci (m), |
| $\frac{\delta\theta}{\delta x}$ | teplotní gradient (K/m). |

Ve vztahu (14) je zavedena veličina součinitele tepelné vodivosti λ , který vyjadřuje úměrnost gradientu teploty (teplotního spádu) a hustoty tepelného toku. Součinitel tepelné vodivosti je veličinou, která se ve stavební praxi používá jako základní vlastnost stavebních materiálů, charakterizující jejich tepelně izolační schopnost. Pro jednorozměrné šíření tepla v homogenních izotropních tělesech za předpokladu nezávislosti součinitele tepelné vodivosti λ na teplotě a směru šíření tepla lze definovat tzv. Fourierovu parciální diferenciální rovnici pro jednorozměrné vedení tepla ve tvaru (15):

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = a \cdot \frac{\delta^2\theta}{\delta x^2}, \quad (15)$$

kde je

| | |
|----------|----------------------------------------------------------|
| θ | teplota ($^{\circ}\text{C}$), |
| t | čas (s), |
| a | součinitel teplotní vodivosti (m^2/s), |
| x | souřadnice (m). |

Součinitel teplotní vodivosti a vyjadřuje rychlost vyrovnávání teplot v tělese a je definován vztahem (16):

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (16)$$

kde je

| | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|
| λ | součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), |
| c | měrná tepelná kapacita ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), |
| ρ | objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti (kg/m^3). |

Jestliže nedochází v čase ke změně teploty, jak je tomu v případě ustáleného (stacionárního) vedení tepla, pak pro vedení tepla platí vztahy (17) pro jednorozměrné vedení tepla, (18) pro dvourozměrné vedení tepla a (19) pro trojrozměrné šíření tepla.

$$\frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta y^2} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta z^2} = 0, \quad (19)$$

kde je

θ teplota (°C),
 x, y, z souřadnice (m).

V případě neustáleného (nestacionárního) vedení tepla vstupuje do vztahů navíc skutečnost, že je teplota funkcí času $\theta = f(t)$ [33]. Zde platí tzv. **druhý Fourierův zákon** [35] a parciální diferenciální rovnice pak mají tvar:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta y^2} \right) \quad (21)$$

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta z^2} \right) \quad (22)$$

2.3.2. Matematické vyjádření šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním na rozdíl od vedení není možné u pevných látek, ale pouze u kapalných a plynných látek. K přenosu tepla dochází pohybem částic látek (molekul). K pohybu částic může docházet v důsledku:

- **rozdílných teplot** (přirozeně), kdy dochází k pomalému přemísťování částic, způsobeným rozdílnou hustotou. Přirozené proudění lze rozdělit na laminární, přechodné a turbulentní.
- **vnějších vlivů** (nuceně), kdy je pohyb částic způsoben mechanickým zařízením např. čerpadlem nebo ventilátorem. V tomto případě je intenzita výměny tepla uměle zvýšena.

Základním fyzikálním zákonem, který se používá pro výpočet šíření tepla prouděním je **Newtonův zákon** (23).

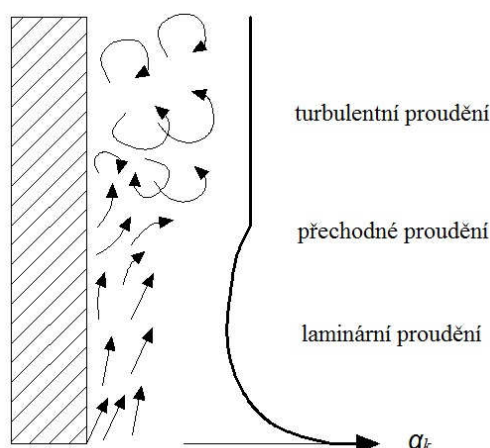
$$q_s = h_k \cdot (\theta - \theta_s), \quad (23)$$

kde je

q_s hustota tepelného toku při proudění (W/m²),
 h_k součinitel přestupu tepla při proudění (W/(m² · K)),

- θ teplota proudícího média (°C) – ve stavební fyzice teplota vnějšího nebo vnitřního vzduchu,
- θ_s teplota povrchu tělesa (°C) – ve stavební fyzice teplota vnějšího nebo vnitřního povrchu konstrukce.

Vztah (23) definuje hustotu tepelného toku při proudění mezi povrchem tuhého tělesa (ve stavebnictví nejčastěji povrchem konstrukce) a plynným či kapalným prostředím. Tato výměna tepla je nazývána přestupem tepla a může k němu docházet směrem do povrchu stavební konstrukce nebo z povrchu stavební konstrukce. Při proudění vzduchu okolo povrchu tělesa dochází k rozdělení oblasti proudění na vnější proudění a proudění v oblasti mezní vrstvy. V rámci mezní vrstvy se v důsledku změny viskozity vzduchu mění také jeho rychlost a to v rozmezí nulové hodnoty na povrchu tělesa a hodnoty rychlosti proudění ve vnější vrstvě. Při proudění vzduchu okolo tělesa dochází na jeho dolním povrchu k laminárnímu proudění vzduchu, následuje přechodné proudění a v horní části dochází k turbulentnímu proudění viz Obr. 8.

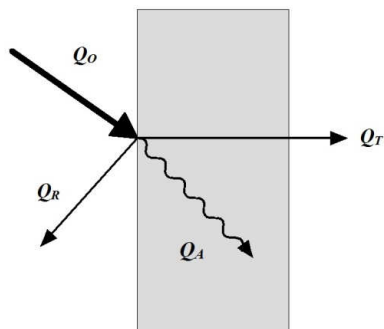


Obr. 8: Průběh proudění vzduchu okolo povrchu tělesa při ohřívání vzduchu (např. povrch konstrukce v kontaktu s vnějším vzduchem)

2.3.3. Matematické vyjádření šíření tepla sáláním

Tepelné sálání je podintervalem elektromagnetického záření, jinak je také označováno jako tepelné záření. K tepelnému záření dochází při vlnových délkách od 760 nm do 4000 nm, což prakticky odpovídá rozsahu infračerveného záření (IR) [32]. Jedná se o jediný způsob šíření tepla, ke kterému dochází také v prostředí vakua.

Tepelné záření vydává každé těleso o teplotě vyšší než 0 K. Toto těleso záření vydává, ale také částečně pohlcuje, odráží a propouští [36]. Schéma rozdělení sálavého toku, dopadajícího na stavební konstrukci, je patrné z Obr. 9.



Obr. 9: Schéma rozdělení sálavé energie dopadající na konstrukci

Z výše uvedeného Obr. 9 je možné odvodit vztah (24), který definuje celkovou zářivou energii, která na těleso dopadá.

$$Q_o = Q_A + Q_R + Q_T \quad (24)$$

kde je

- Q_o celková zářivá energie, dopadající na těleso (J),
- Q_A pohlcená část energie (J),
- Q_R odražená část energie (J),
- Q_T propuštěná část energie (J).

Vztah (24) lze matematicky upravit také na vztah (25).

$$A + R + T = 1 \quad (25)$$

kde je

- A pohltivost záření (-),
- R odrazivost záření (-),
- T propustnost záření (-).

V teoretické fyzice je možné se setkat s pojmy *dokonalé černé těleso*, kdy $A = 1$, dále *dokonale odrazivé těleso*, jinak též *dokonalé zrcadlo*, kdy $R = 1$, a také *dokonale propustné těleso*, kdy $T = 1$. Ve skutečnosti však existují pouze tzv. *šedá tělesa*.

Hustotu sálavého tepelného toku definuje **Stefan-Boltzmannův zákon**, který je základním zákonem v oblasti tepelného záření a využívá se pro účely tepelně technických výpočtů ve stavební fyzice a to ve tvaru (26):

$$q_{\check{c}} = c_{\check{c}} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (26)$$

kde je

- $q_{\check{c}}$ hustota sálavého tepelného toku (W/m^2),
- $c_{\check{c}}$ součinitel sálání absolutně černého tělesa ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$),
- T absolutní teplota tělesa (K).

V praxi se pak pro ostatní „šedá“ tělesa používá součinitel sálání dle vztahu (27):

$$c = A \cdot c_{\xi} \quad (27)$$

kde je

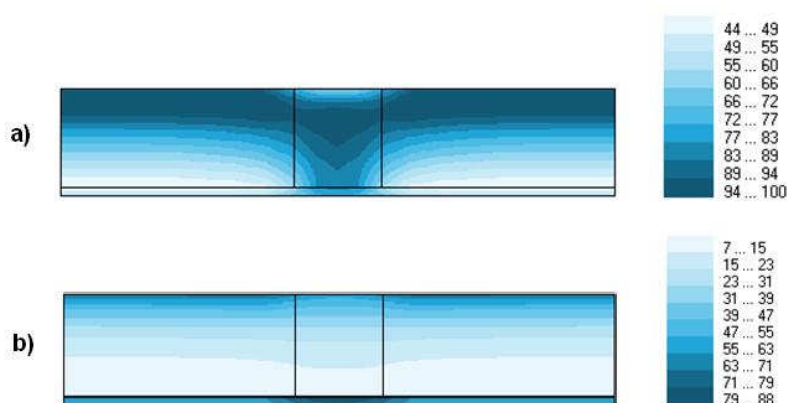
- c součinitel sálání šedého tělesa ($W/(m^2 \cdot K^4)$),
- c_{ξ} součinitel sálání absolutně černého tělesa ($= 5,67 W/(m^2 \cdot K^4)$),
- A pohltivost sálání šedého tělesa (-).

2.4. Šíření vlhkosti ve stavebních konstrukcích

Vodní páry se ve stavebních konstrukcích šíří tzv. difúzí, což je proces, kdy dochází k samovolnému rozptylování částic z prostředí s vyšší koncentrací do prostředí s nižší koncentrací daných částic. V případě šíření vodních par k tomuto jevu dochází na základě gradientu částečného tlaku vodních par. To znamená, že k šíření vlhkosti dochází mezi dvěma prostředími s různými parciálními tlaky vodních par. Zásadním předpokladem pro šíření vodní páry je skutečnost, že látka, kterou se šíří, je pórovitá a póry jsou větší než střední volná dráha molekul vodní páry [32].

Vodní páry se stavebními konstrukcemi šíří obdobně jako tepelný tok. Jelikož mezi vedením tepla a šířením vodních par existuje analogie, jsou fyzikální vztahy definující šíření vodní páry a vedení tepla obdobné. Obdobně je také nutné rozlišovat ustálený a neustálený teplotní stav.

Pro tepelně technické hodnocení konstrukcí se využívá tzv. vlhkostní pole, což je rozdělení relativních vlhkostí v jednotlivých místech konstrukce v určitém časovém okamžiku [28]. Dle způsobu šíření vodních par rozlišujeme jednorozměrné, dvourozměrné a trojrozměrné difúzní pole. Příklad grafického znázornění dvourozměrného vlhkostního pole je uveden na Obr. 10.



Obr. 10: Grafický výstup výpočtu stacionárního vlhkostního pole (řez šikmou střechou, vytvořeno v SW Area2015): a) bez difúzní fólie a parozábrany, b) s difúzní fólií a parozábranou

Posouzení šíření vlhkosti v konstrukcích je stejně tak důležité, jako posouzení šíření tepla. V případě šíření vlhkosti ve stavebních konstrukcích je nutné hodnotit případný vznik kondenzace vodních par, jehož důsledkem může být znehodnocení materiálů nebo hygienické nedostatky, které se projevují tvorbou plísní, zároveň dochází vlivem vlhkosti ke zvyšování tepelné vodivosti materiálů [33]. V případě konstrukcí, které ve své skladbě mají zabudované dřevěné prvky, je nutné posuzovat, ve kterém místě konstrukce ke kondenzaci dochází. Je nutné posoudit, zda ke kondenzaci nedochází například právě v místě dřevěných prvků, u kterých tímto dochází k závažnému znehodnocení. Z toho vyplývá, že v případě dřevostaveb je nutné dbát na správný návrh konstrukcí a zajistit, aby ke kondenzaci vodní páry uvnitř konstrukcí nemohlo dojít. Dále musí být vždy respektovány podmínky pro uplatnění dřeva a materiálů na bázi dřeva ve stavebních konstrukcích podle normy ČSN 73 2810 [37]. Analýza šíření vlhkosti a případné kondenzace vodní páry uvnitř lehkých obvodových konstrukcí experimentální dřevostavby je součástí této disertační práce.

2.4.1. Matematické vyjádření šíření vodních par

Šíření látek difúzí charakterizuje tzv. **první Fickův zákon** dle vztahu (28).

$$J_A = -D_A \frac{\delta c_A}{\delta x}, \quad (28)$$

kde je

| | |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| J_A | difúzní tok látky A (kg/(m ² · s)), |
| D_A | koeficient difúze látky A (m ² /s), jinak též difuzivita látky A, |
| c_A | koncentrace látky A (kg/m ³), |
| x | souřadnice vyjádření polohy bodu v konstrukci (m), |
| $\frac{\delta c_A}{\delta x}$ | gradient koncentrace látky A (kg/(m ³ · m ¹)). |

Šíření vodní páry je dále charakterizováno hustotou difúzního toku vodní páry g_v , který je přímo úměrný gradientu částečného tlaku vodních par p_v . Tuto závislost matematicky pro stacionární vedení tepla na základě prvního Fickova zákona vyjadřuje vztah (29). Ve vztahu je zavedena veličina součinitele difúze vodní páry δ_p , který vyjadřuje úměrnost gradientu parciálních tlaků vodních par a hustoty difúzního toku. Součinitel difúzní vodivosti je jednou z veličin, charakterizujících difúzní schopnost materiálu.

$$g_v = -\delta_p \cdot \text{grad } p_v, \quad (29)$$

kde je

| | |
|------------|--------------------------------------------------------------|
| g_v | hustota difúzního toku vodní páry (kg/(m ² · s)), |
| δ_p | součinitel difúzní vodivosti (s), |
| p_v | skutečný částečný tlak vodní páry (Pa). |

Pro hodnocení vlhkostního stavu ve stavebních konstrukcích se pracuje s difúzními konstantami [33]. V České republice se používají dva parametry a to:

- **součinitel difúzní vodivosti** δ_p (s), který je definován výše. Jedná se o schopnost materiálu propouštět vodní páru difúzí.
- **faktor difúzního odporu** μ (-), který vyjadřuje relativní schopnost materiálu propouštět vodní páry ve vztahu k difúznímu odporu vzduchové vrstvy o stejné tloušťce, difúzní odpor vzduchu je $\mu = 1$. Tento parametr se při tepelně technických výpočtech využívá častěji a výrobci stavebních materiálů deklarují pomocí certifikátů převážně právě tento parametr.

Pro převod mezi těmito parametry platí obecný vztah (30) [33]:

$$\mu = \frac{1}{N \cdot \delta_p}, \quad (30)$$

kde je

- μ faktor difúzního odporu (-)
- δ_p součinitel difúzní vodivosti (s),
- N teplotně difúzní funkce (1/s),
(pro střední teplotu $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ je přibližně $N = 5,315 \cdot 10^9 \text{ 1/s}$).

Jestliže do konstrukce vstupuje stejné množství vodní páry, jaké z ní na druhé straně odchází, pak dochází k tzv. stacionární difúzi. Koncentrace vodní páry se v konstrukci s časem v tomto případě nemění a k výpočtům šíření vlhkosti pak lze využít první Fickův zákon ve tvaru parciálních derivací dle rovnic (31) pro jednorozměrné šíření vodních par, (32) pro dvourozměrné šíření vodních par (33) pro trojrozměrné šíření vodních par. Zjednodušujícím předpokladem je, že koeficient difúze látky D není závislý na její koncentraci c a poloze.

$$\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} = 0, \quad (31)$$

$$\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta y^2} = 0, \quad (32)$$

$$\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta z^2} = 0, \quad (33)$$

kde je

- c koncentrace látky (kg/m^3),
- x, y, z souřadnice (m).

Jestliže do konstrukce vstupuje jiné množství vodní páry, než z ní na druhé straně odchází, pak dochází k tzv. nestacionární difúzi. Koncentrace vodní páry v konstrukci se v tomto případě s časem mění, tedy koncentrace látky je funkcí času $c = f(t)$ a k výpočtům šíření vlhkosti je nutné použít **druhý Fickův zákon**, který právě závislost na čase vyjadřuje. Parciální diferenciální rovnice pak mají tvar:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \cdot \left(\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \right), \quad (34)$$

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \cdot \left(\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta y^2} \right), \quad (35)$$

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \cdot \left(\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta z^2} \right), \quad (36)$$

kde je

- c koncentrace látky (kg/m^3),
- D koeficient difúze látky (m^2/s),
- x, y, z souřadnice (m).

2.5. Konstrukční systémy dřevostaveb

Lze říci, že pojem „dřevostavba“ se dnes používá poněkud nesprávně. Správně by se tyto stavby měly nazývat „stavby s materiály na bázi dřeva“ [27]. To proto, že pod pojmem „dřevostavba“ jsou dnes zařazeny také budovy, které ve své konstrukci rostlé dřevo jako takové téměř neobsahují. Obvykle jsou tyto budovy vystaveny z materiálů, které jsou vyrobeny z dřevního odpadu, modifikací dřeva či dokonce kombinací dřeva s jinými materiály jako například cement [27]. Dřevo se dnes stává znovuobjevenou surovinou. Jedná se snad o jediný materiál, ze kterého je možno vyrobit všechny prvky, které vytvářejí dům, a to od nosných konstrukcí po vnitřní vybavení [38]. Velmi významnou vlastností dřeva je to, že se jedná o obnovitelnou surovinu a z hlediska trvalého udržitelného rozvoje se tak jedná o ideální materiál. Jako u všech materiálů se však jedná o materiál, které má své výhody a nevýhody.

Hlavní výhody dřeva a materiálů na bázi dřeva jsou:

- nízká hmotnost a s tím související nižší nároky na dopravu a manipulaci,
- dobré tepelně-izolační vlastnosti,
- snadná zpracovatelnost,
- recyklovatelnost,
- prodyšnost.

Hlavní nevýhody dřeva a materiálů na bázi dřeva jsou:

- hořlavost,
- degradace povětrnostními vlivy a vlhkostí,
- degradace vlivem škůdců.

Dřevo, které se používá při výstavbě lze rozdělit do tří základních skupin [1]:

1. Masivní dřevo

Jedná se o dřevo, které je použito v nezměněné podobě. Získává se pouze opracováním rostlého dřeva. Takový materiál si zachovává své anizotropní vlastnosti, které mají zásadní vliv na jeho tepelně-technické vlastnosti. Masivní dřevo nachází využití především v rámci nosných konstrukcí, ale také v interiérech budov např. jako podlahy, obklad atd.



Obr. 11: Ukázka použití masivního dřeva (srubová stavba) [30]

2. Aglomerované dřevo

Jedná se o materiál, který je vyroben spojením kousků dřeva nebo jiných lignocelulóзовých materiálů. Kousky mohou být tvořeny vlákny, štěpkou, třískami atd. Spojení kousků může být provedeno vlastní lepivostí materiálu, organickým pojivem či jiným minerálním pojivem. Vlivem spojení kousků dřeva dochází ke zlepšení jeho vlastností jako např. snížení vlhkostní roztažnosti, zvýšení pevnosti, zvýšení požární odolnosti a podobně. Materiály z aglomerovaného dřeva jsou používány k různým účelům, např. jako nosné konstrukce či k opláštění konstrukcí. Mezi tyto materiály patří OSB desky (Oriented Strand Board), dřevovláknité desky, dřevotřískové desky, cementotřískové desky, kompozitní dřevo a mnoho dalších typů stavebních materiálů.

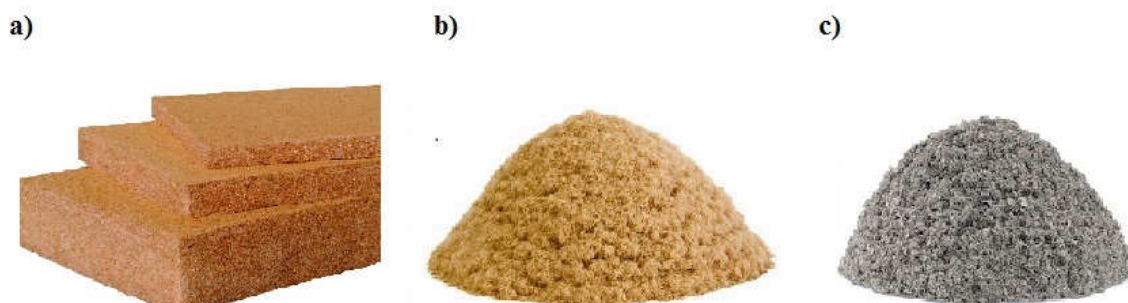


Obr. 12: Aglomerované dřevo: a) OSB desky, b) překližka, c) dřevovláknité desky [39]

3. Desintegrované dřevo

Jedná se o materiál, který je tvořen malými kousky dřevní hmoty. Tento materiál se velmi často používá jako tepelně-izolační materiál. Forma dezintegrovaného dřeva může být různá od sypkých materiálů, které se většinou do skladeb konstrukcí vpravují

foukáním, nebo také ve formě měkkých desek či rohoží. Výhodou těchto materiálů je především to, že je při jejich výrobě mnohdy využito odpadového materiálu. Mezi tyto materiály lze řadit foukanou dřevovláknitou izolaci, dřevovláknitou izolaci ve formě měkkých desek či recyklovanou celulózu.



Obr. 13: Desintegrované dřevo: a) dřevovláknitá izolace ve formě měkkých desek [40], b) foukaná dřevovláknitá izolace [40], c) foukaná celulóza [40]

Co se týče konstrukčních systémů dřevostaveb, lze tyto objekty rozdělit do čtyř základních skupin [41]:

1. Lehká skeletová konstrukce

V případě u nás běžnějšího lehkého skeletu se jedná o stavební konstrukci, která je sestavována prakticky přímo na místě budoucí stavby. Konstrukci lze přirovnat ke stavebnici, jejíž prvky jsou tvořeny fošnovými profily, nejčastěji smrkové fošnové profily o rozměrech 50 x 100 mm. Ty tvoří základní kostru domu. Alternativně lze využít dřevěné I profily, kdy je dosaženo úspory, kterou lze využít pro vložení tepelného izolantu. Ztužení základní kostry se provádí deskovými profily. Za tímto účelem se nejčastěji používají cementovláknité a dřevoštěpkové desky. Mezi profily je pak vložena tepelná izolace a je tudíž využito celého profilu stěny, čímž je dosaženo subtilnějších rozměrů při zachování velmi dobrých izolačních vlastností.

2. Těžké skeletové konstrukce

Novějším typem skeletové konstrukce je těžká skeletová konstrukce, která je tvořena robustními lepenými tyčovými prvky, které jsou spojovány ocelovými styčnickovými deskami [1]. Hlavní výhodou těžkého skeletu je vyšší statická únosnost a s tím související možnost výstavby vyšších budov. Takový typ skeletu je proto vhodný pro bytové stavby, stavby občanské vybavenosti, administrativu i průmyslové využití.

3. Dřevěné panelové konstrukce

Z konstrukčního hlediska se prakticky jedná o rámový skelet. Rozdíl je ovšem v místě výroby, kdy jsou dřevěné panelové konstrukce na rozdíl od skeletových konstrukcí sestavovány ve výrobních halách. Výhodou je především následná rychlost výstavby, sestavení domu z montovaných panelů i se střechou trvá obvykle pouze 2 dny. Další

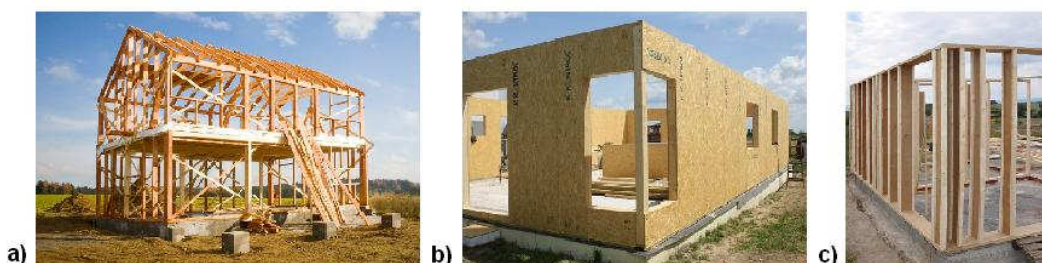
výhodou jsou stabilní klimatické podmínky při sestavování skladby konstrukce přímo ve výrobní hale.

Méně rozšířeným typem dřevěné panelové konstrukce jsou konstrukce vyrobené z prefabrikovaných velkoplošných dílců. Masivní panely jsou vytvořeny vrstvením lepeného dřeva přímo ve výrobě a následně jsou tyto dílce sestaveny na stavbě. Jednotlivé vrstvy panelů jsou vždy orientovány kolmo na sebe, čímž je dosaženo dokonalé tvarové stability. Vnější strana konstrukce se následně opatří kontaktním zateplovacím systémem a to takovým, aby byla zachována difúzní otevřenost konstrukce.

4. Roubené a srubové konstrukce

Tyto typy konstrukcí u nás mají dlouholetou tradici. Konstrukci stavby v tomto případě tvoří masivní dřevo, v případě srubů se jedná o dřevěnou kulatinu, v případě roubených staveb jsou dřevěné profily zpracovány do formy trámů. Výstavba takových konstrukcí je však s ohledem na objem masivní dřevní hmoty ekonomicky náročná. Přestože je v případě obvodových konstrukcí z masivního dřeva možné dosáhnout dnes požadovaných hodnot součinitele prostupu tepla U , dosažení doporučených či dokonce hodnot doporučených pro pasivní budovy je bez dodatečného zateplení prakticky nemožné. Pro dosažení energetické náročnosti budovy na úrovni budovy s téměř nulovou spotřebou energií v případě takových konstrukcí nebude možné. Hlavní nevýhodou těchto konstrukcí pak bude nutnost zateplení, což lze provést z vnější či vnitřní strany konstrukce, čímž je narušen vizuální koncept takovýchto budov. Alternativním řešením pro zachování pohledové vnitřní i vnější strany je dvojitá konstrukce, mezi kterou je vložen tepelný izolant. Toto řešení však stavbu samozřejmě prodražuje. Jako další nevýhodu v souvislosti se snižováním energetické náročnosti budovy lze uvést řešení vzduchotěsnosti obálky budovy.

Roubené stavby se dnes řadí mezi ekonomicky náročnější varianty výstavby budov a s jejich výstavbou se lze setkat spíše v horských oblastech. Ostatní typy dřevostaveb jsou ekonomicky srovnatelné se zděnými technologiemi a svým konečným vzhledem jsou většinou k nerozeznání od klasických zděných objektů.



Obr. 14: Konstrukční systémy dřevostaveb: a) lehký skelet ze smrkových profilů [42], b) panelový [43], c) lehký skelet z dřevěných I nosníků [44]

3. Cíl a obsah disertační práce

Cílem disertační práce je provést tepelně vlhkostní analýzu lehké obvodové konstrukce experimentální dřevostavby v pasivním standardu, která vznikla v roce 2012 v areálu Fakulty stavební. Oficiální název tohoto objektu je „Výzkumné a inovační centrum Národního dřevařského klastru (NDK)“ a jedná se o objekt, který díky své výjimečnosti umožňuje sledovat celou řadu tepelně-vlhkostní parametrů jeho obvodových konstrukcí [28].



Obr. 15: Výzkumné a inovační centrum MSDK

Cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- vyhodnocení výsledků experimentálního měření tepelně-vlhkostních parametrů lehkých obvodových konstrukcí se zaměřením na dvouplášťové konstrukce pro zimní, jarní a letní období,
- vyhodnocení výsledků experimentálního měření relativních vlhkostí uvnitř difúzně otevřených konstrukcí pro účely vyloučení vzniku kondenzace vodních par uvnitř těchto konstrukcí,
- porovnání výsledků tepelně-technických výpočtů vybraných stavebních detailů, které byly provedeny použitím 4 vhodných výpočetních programů,
- porovnání dat získaných experimentálním měřením s výsledky numerické simulace.

4. Metody zpracování

Metody zpracování disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- Experimentální analýza
- Teoretická analýza
- Porovnání výsledků experimentální a teoretické analýzy

4.1. Experimentální analýza chování lehkých stavebních konstrukcí

V rámci experimentální analýzy je využito dat získaných dlouhodobým monitorováním tepelně-technických parametrů lehkých obvodových konstrukcí již zmíněné experimentální budovy, jejíž oficiální název je Výzkumné a inovační centrum NDK. Dlouhodobě získávaná data jsou navíc pro účely komplexního tepelně technického vyhodnocení konstrukcí doplněna o výsledky dalších experimentálních měření, která probíhala jak v zimním, tak také v letním období.

Experimentální analýza se blíže zaměřuje na vyhodnocení vlivu větraných vzduchových mezer ve skladbách konstrukcí. Ty jsou součástí dvouplášťových střešních konstrukcí a tzv. provětrávaných fasád. Na základě předpokladu chování těchto dvouplášťových konstrukcí se jako hlavní výhody uvádí:

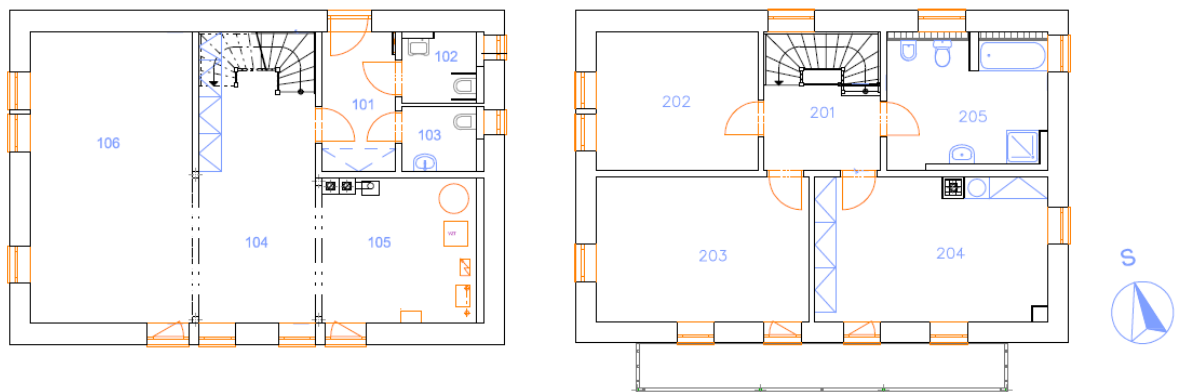
- snížení tepelných toků konstrukcí v zimním období,
- ochrana konstrukcí proti teplotním výkyvům vnějšího prostředí (v létě se nepřehřívají, v zimě naopak neprochlazují),
- odvádění vodních par z konstrukcí větranou vzduchovou mezerou,
- vytvoření příjemného klimatu uvnitř budov,
- zvýšení požární bezpečnosti a akustického komfortu,
- prodloužení životnosti izolovaných konstrukcí,
- estetický přínos.

Princip dvouplášťových konstrukcí je založen na provětrávané vzduchové mezeře. Pro správnou funkci takovýchto konstrukcí, tak aby splňovala výše uvedené předpoklady, je důležitý návrh větrané vzduchové mezery. Česká legislativa se však návrhu větrané vzduchové mezery blíže nevěnuje. V současnosti neexistuje norma pro návrh provětrávaných fasád. Lze využít pouze normu ČSN 73 1901 [45], která je ale primárně určena k návrhu větraných vzduchových mezer v případě dvouplášťových střešních konstrukcí. Provětrávané fasády lze považovat za střechy se sklonem $\geq 45^\circ$, v tomto případě má být pro zajištění správné funkce tloušťka vzduchové mezery minimálně 40 mm a větrací otvory musí tvořit minimálně 1/400 plochy fasády. Pro střešní konstrukce se sklonem 5 – 25° má být tloušťka vzduchové mezery minimálně 60 mm. V případě, že je však střešní konstrukce velmi dobře izolovaná (součinitel prostupu tepla U střešní konstrukce nižší než jeho požadovaná hodnota dle ČSN 73 0540-2 [8], pak by se měla

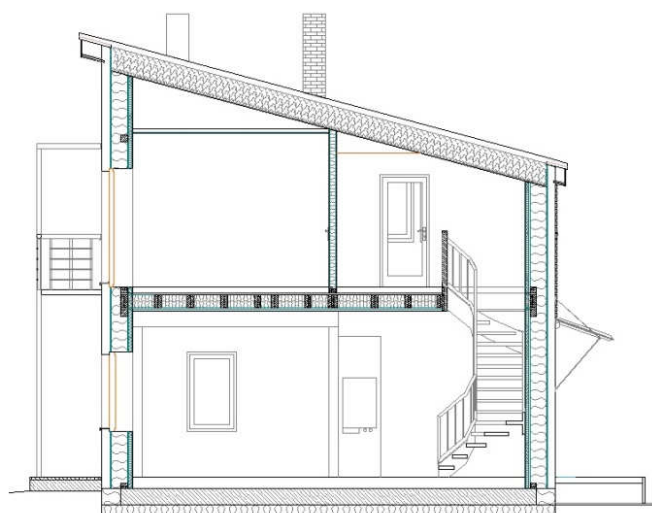
tloušťka větrané mezery navýšit na 100 mm. V disertační práci jsou sledovány tepelně-vlhkostní parametry dvouplášťových konstrukcí a to jak pro fasádu, tak také pro případ pultové dvouplášťové střechy.

4.1.1. Experimentální budova

Experimentální budova je z konstrukčního hlediska řešena jako panelová dřevostavba. Jedná se o dvoupodlažní nepodsklepený objekt s pultovou střechou, který je založen na plovoucí základové desce. Z energetického hlediska se jedná o budovu v pasivním standardu, jejíž obvodové konstrukce splňují hodnoty součinitele prostupu tepla doporučené pro pasivní budovy $U_{pas,20}$ dle ČSN 73 0540-2 [8]. Konstrukční a dispoziční řešení budovy je patrné z následujících Obr. 16 a 17.



Obr. 16: Experimentální budova: půdorys 1.NP a 2NP



Obr. 17: Experimentální budova: řez

Disertační práce je zaměřena pouze na ty obvodové konstrukce, které jsou v kontaktu s vnějším vzduchem, tedy obvodovou stěnu a střešní konstrukci. Podlaha a výplně otvorů nejsou součástí řešení této disertační práce. Analyzované konstrukce jsou tvořeny prefabrikovanými panely, které byly vyrobeny za stabilních klimatických podmínek ve výrobní hale. Nosné prvky obvodových stěn a střechy tvoří dřevěné I nosníky Steico. Obvodové konstrukce jsou izolovány dřevovláknitou izolací Steico a to jak mezi nosníky, tak také z vnější a vnitřní strany konstrukcí. Opláštění jednotlivých vrstev obvodových konstrukcí je provedeno ze sádrovláknitých desek Fermacell. Z hlediska šíření vodních par konstrukcí jsou skladby řešeny jako difúzně otevřené, což znamená, že součástí skladby konstrukcí není parozábrana, která by zamezila šíření vodních par konstrukcí. Součástí skladby konstrukce je však tzv. parobrzdá, konkrétně jsou použity sádrovláknité desky Fermacell Vapor se zvýšeným difuzním odporem. Tato vrstva nezabraňuje difúzi vodních par konstrukcí, pouze ji omezuje.

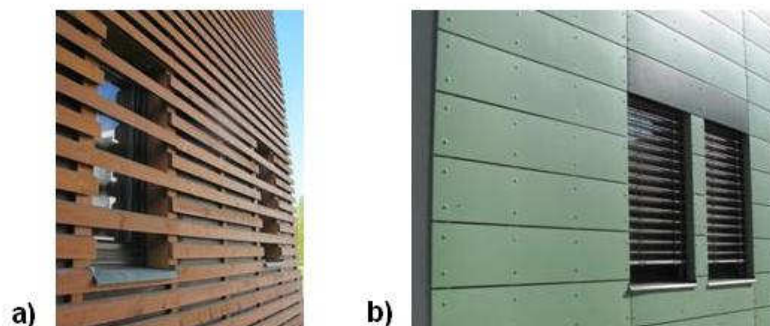
Obvodové stěny jsou řešeny třemi způsoby a to jako obvodová stěna s vnějším kontaktním zateplením a obvodové stěny s provětrávanou fasádou s dřevěným a cementotřískovým obkladem z desek Cetriz. V prvním případě, tedy stěny s kontaktním zateplovacím systémem, je vnější povrch konstrukce opatřen dřevovláknitou tepelnou izolací Steico Protect, která je určena speciálně pro tento způsob použití. Jedná o voděodolný, difúzně otevřený typ izolantu. Vnější povrch konstrukce je opatřen tenkovrstvou omítkou viz obr. 18.



Obr. 18: Použití tepelného izolantu Steico Protect v kombinaci s omítkou [40]

Dále je obvodový plášť budovy tvořen již zmíněnými dvěma typy provětrávaných fasád, což znamená, že součástí skladby těchto konstrukcí je provětrávaná vzduchová dutina. První typ provětrávané fasády je tvořen vzduchovou mezerou o tloušťce 20 mm a vnějším dřevěným obkladem. Tento obklad je tvořen dřevěnými lamelami, mezi kterými jsou mezery tloušťky 30 mm. Druhý typ odvětrávané fasády je tvořen vzduchovou mezerou o tloušťce 40 mm a vnějším obkladem z cementotřískových desek Cetriz. Tyto desky opět netvoří zcela kompaktní povrch, ale jsou mezi nimi mezery tloušťky 9 mm. Řešení obkladů fasád je zřejmé z Obr. 19. V případě prvního typu provětrávané fasády je z tepelně-technického hlediska nevýhodou nekompaktní vnější povrch a malá tloušťka vzduchové mezery. Co se týče tepelného izolantu, který je umístěn na vnější

straně konstrukce, jedná se o typ izolace Steico Special, který je primárně určen pro použití ve skladbách střech jako nadkroevní deska. S ohledem na vlastnosti tohoto materiálu je však vhodné také využití jako pojistná hydroizolační vrstva v odvětrávaných fasádách. Na vnějším povrchu před vzduchovou mezerou je konstrukce opatřena pojistnou fólií proti větru.



Obr. 19: Typy řešení provětrávané fasády: a) dřevěným obkladem, b) obkladem z cementotřískových desek

Střešní konstrukce je řešena obdobným způsobem jako konstrukce obvodových stěn. Jedná se o dvouplášťovou střešní konstrukci. Součástí její skladby je tedy provětrávaná vzduchová mezera o tloušťce 60 mm. Na vnější straně konstrukce je umístěna tepelná izolace Steico Universal, která je určena především pro použití jako podstřešní deska u střech se sklonem do 18°. Vnější povrch tepelného izolantu je v tomto případě opatřen pojistnou difúzní fólií.

4.1.2. Měřené fyzikální veličiny

Experimentální budova je vybavena měřícím systémem, díky kterému jsou od uvedení budovy do provozu průběžně zaznamenávány mimo jiné tyto fyzikální veličiny:

- vnitřní a vnější povrchové teploty lehkých obvodových konstrukcí,
- teploty a relativní vlhkosti uvnitř lehkých obvodových konstrukcí,
- teplota a relativní vlhkost vzduchu uvnitř vzduchové mezery v dvouplášťové střeše,
- teplota a relativní vlhkost vzduchu ve vnitřním prostředí,
- teplota a relativní vlhkost vzduchu ve venkovním prostředí.

Data získaná měřeními výše uvedených veličin byla využita v rámci zpracování této disertační práce. V budově je dále měřeno velké množství fyzikálních veličin, jako například teploty pod základovou deskou v zemině, hodnoty fyzikálních parametrů systémů TZB atd., které nejsou součástí disertační práce.

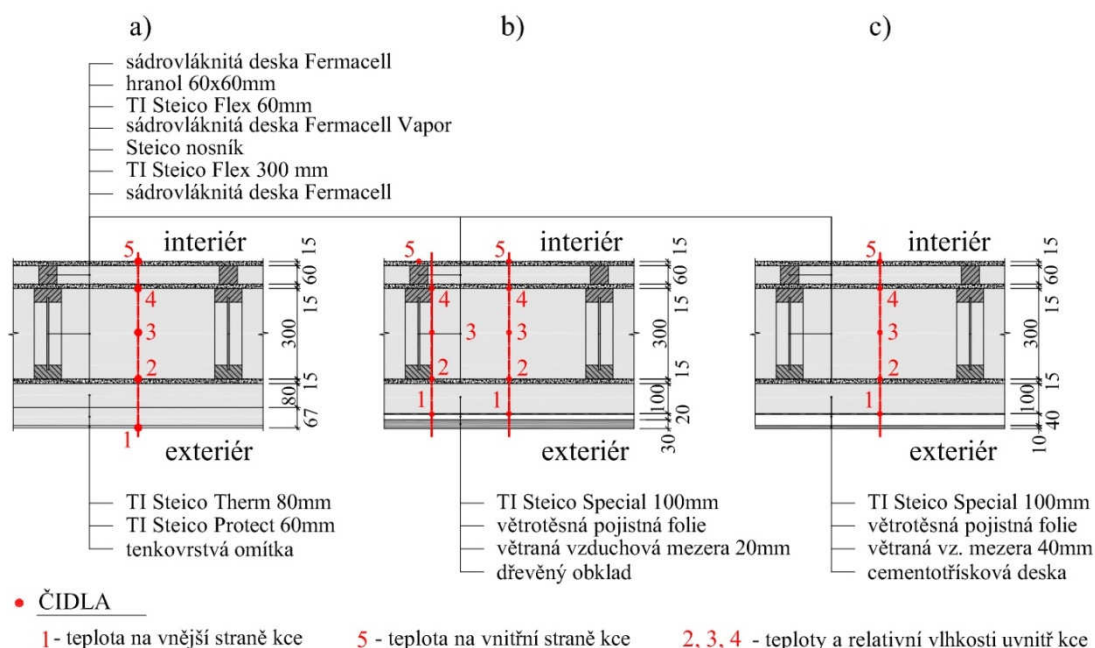
Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

Disertační práce

Pro tato dlouhodobá měření jsou použita měřicí zařízení společnosti TR instruments spol. s r. o. se snímači značky Rotronic. Specifikace použitých snímačů je uvedena v kap. 4.1.3. Měřená data jsou zaznamenávána pomocí vícekanálové měřicí ústředny DataTaker DT80G Geologger v časovém intervalu 15 min. Čidla pro měření teplot a relativních vlhkostí byla do obvodových konstrukcí zabudována již ve fázi prefabrikace, jak je patrné z Obr. 20. Umístění čidel uvnitř obvodových stěn a střechy je uvedeno na Obr. 21 a 22. V rámci získaných dat jsou pro účely tepelně vlhkostní analýzy zvoleny pouze určité časové úseky, které jsou následně vyhodnocovány.



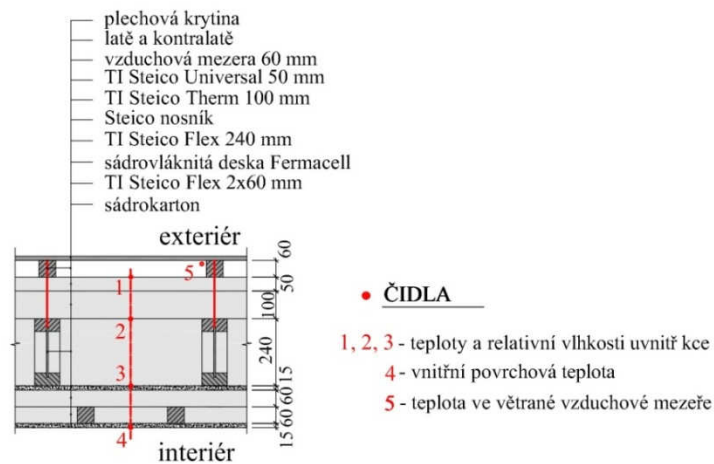
Obr. 20: Zabudování teplotně-vlhkostních čidel do panelu obvodové stěny



Obr. 21: Skladba obvodové stěny a poloha zabudovaných měřicích čidel: a) kontaktní zateplovací systém opatřený tenkovrstvou omítkou, b) provětrávaná fasáda s dřevěným obkladem, c) provětrávaná fasáda s obkladem z cementotřískových desek Cetris

Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

Disertační práce



Obr. 22: Skladba dvouplášťové střechy a poloha zabudovaných měřicích čidel

Za účelem komplexního vyhodnocení chování lehkých obvodových konstrukcí byla provedena další samostatná měření, která doplňují výsledky průběžného monitorování.

Pro zimní a jarní období byla doplněna tato měření:

- teplota uvnitř vzduchové mezezy obvodové stěny s dřevěným obkladem,
- teplota a relativní vlhkost uvnitř vzduchové mezezy obvodové stěny s obkladem z cementotřískových desek Cetris.

Pro tato měření bylo použito měřicí zařízení Arexx viz Obr. 23. Jedná se o systém multifunkčního bezdrátového dataloggeru Arexx BS-510 a snímačů Arexx TSN-TH70E pro měření teplot a relativních vlhkostí a snímačů Arexx TSN-33MN pouze pro měření teplot. Měřená data byla zaznamenávána automaticky v časovém intervalu 45 s.



Obr. 23: Měřicí zařízení Arexx

Pro letní období byla doplněna tato měření:

- teplota a relativní vlhkost uvnitř vzduchové mezery obvodové stěny s dřevěným obkladem,
- vnější povrchová teplota na dřevěném obkladu,
- teplota a relativní vlhkost uvnitř vzduchové mezery obvodové stěny s obkladem z cementotřískových desek Cetris,
- vnější povrchová teplota na obkladu z cementotřískových desek Cetris,
- intenzita sluneční radiace na východní a západní fasádě.

Pro tato měření byla použita měřící zařízení Ahlborn viz Obr. 24 a 25. Pro měření byly použity samostatné měřící ústředny ALMEMO 2590 a ALMEMO 2690. Bližší specifikace použitých snímačů je uvedena v Kap. 4.1.3. Měřená data byla zaznamenávána v časovém intervalu 15 min.



Obr. 24: Měřící zařízení Ahlborn Almemo 2590 (vlevo) a Ahlborn Almemo 2690 (vpravo)



Obr. 25: Instalace měřícího zařízení Ahlborn

4.1.3. Vyhodnocení chyb měření

V rámci zpracování experimentální analýzy jsou využita data získaná měřením pomocí měřících zařízení a snímačů. Výsledky těchto měření jsou zatíženy chybou, která se projevuje odchylkou mezi skutečnou a neměřenou hodnotou dané veličiny. Chyby měření lze rozdělit na 3 typy a to:

- **hrubé** – dané např. poruchou měřícího zařízení či chybnou volbou metody měření,
- **systematické** – dané přesnosti měřícího zařízení a měřící metody,
- **statistické** – dané proměnnými rušivými vlivy.

Předpokladem pro interpretaci naměřených dat bylo vyloučení hrubé chyby. Statistické chyby nelze vyloučit a zároveň je nelze přesně stanovit. Tyto chyby lze stanovit pouze na základě opakování měření či statistického vyhodnocení naměřených dat, což pro proměnné veličiny, které byly zjišťovány, nelze provést. Následující odstavce jsou proto věnovány pouze systematickým chybám, vzniklým na základě přesnosti měřícího zařízení, které byly určeny nestatistickými metodami na základě dokumentace výrobce použitých zařízení. Přesnost výsledků měření použitými snímači je uvedena v Tab. 2.

Tab. 2: Přesnosti měření měřících zařízení

| Zařízení | Snímač | Měřené veličiny | Přesnost měření |
|----------|--------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ROTRONIC | TG 68-60 Pt1000, třída A | vnitřní a vnější povrchové teploty | $\pm 0,3 \text{ K}$ |
| | TG 7 Pt1000, třída A | | $\pm 1,5 \% \text{ RH}$ |
| | HC2-CO4 RH/T | teploty a rel. vlhkosti uvnitř konstrukcí | $\pm 0,3 \text{ K}$ $\pm 1,5 \% \text{ RH}$ |
| | Pt 1000, třída A | teploty a rel. vlhkosti vnitřního vzduchu | $\pm 0,1 \text{ K}$ |
| | HC2-S RH/T | | $\pm 0,8 \% \text{ RH}$ |
| AREXX | TSN-TH70E | teploty a rel. vlhkosti vzduchu | $\pm 0,5 \text{ K}$ $\pm 4,5 \% \text{ RH}$ |
| | TSN-33MN | teploty vzduchu | $\pm 0,5 \text{ K}$ |
| AHLBORN | FHAD36RS | teploty a rel. vlhkosti vzduchu | $\pm 0,2 \text{ K}$ při 23°C $\pm 1,3 \% \text{ RH}$ |
| | FH A646-R | | $\pm 0,1 \text{ K}$ při $0^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C}$ $\pm 2 \% \text{ RH}$ při $0 - 90\%$ |
| | FHAD 462 | | $\pm 1,2 \text{ K}$ $\pm 1,8 \% \text{ RH}$ v rozsahu $20-80\%$ při $25 \pm 2^\circ\text{C}$ |
| | FPA 686 | povrchové teploty | $\pm 0,2 \text{ K}$ při 23°C |
| | FLA613GS | intenzita slunečního záření | chyba $\leq 3\%$ |

4.1.4. Analýza výsledků měření teplot a relativních vlhkostí

K analýze jsou využita data, která byla získána experimentálním měřením v zimním, jarním a letním období, která jsou získávána průběžným monitorováním chování lehkých obvodových konstrukcí sledované budovy. Zároveň byla v tomto období provedena další doplňující měření pro komplexnější vyhodnocení.

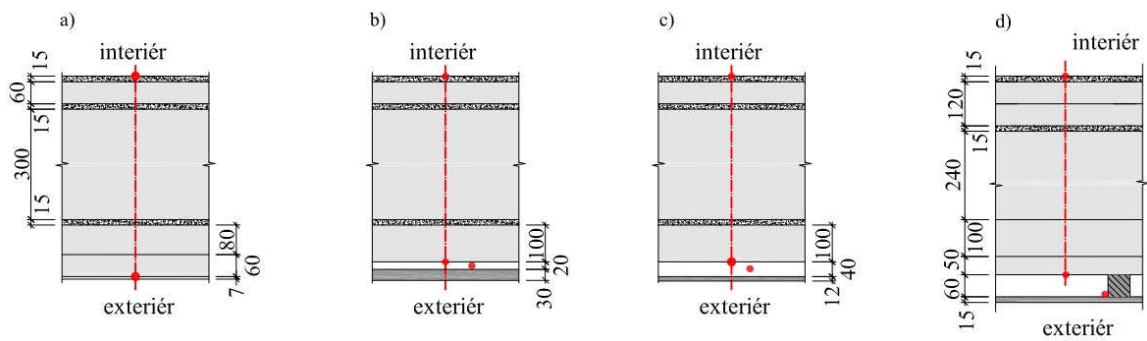
Analýza byla provedena pro tyto konstrukce:

- obvodová stěna s kontaktním zateplením opatřeným omítkou, orientace konstrukce na jih,
- obvodová stěna s provětrávanou fasádou:
 - a) s dřevěným obkladem, orientace konstrukce na východ,
 - b) s obkladem z cementotřískových desek Cetris, orientace konstrukce na západ,
- dvouplášťová střecha s větranou vzduchovou mezerou.

a) Analýza výsledků měření v zimním období

Měření bylo provedeno v termínu 8. 1. – 19. 1. 2016. Pro analýzu jsou využita data získaná měřením na vnitřním a vnějším povrchu konstrukcí, vnější a vnitřní klimatická data a dále data získaná měřením uvnitř vzduchových mezer. Umístění čidel pro jednotlivé konstrukce je patrné z Obr. 26. pro hodnocené obvodové konstrukce. Výsledky měření jsou patrné z Obr. 27 – 30. Průběhy teplot jsou zjišťovány ve všech zde uvedených případech v místě mimo tepelný most, tedy v konstrukcích v ose mezi nosnými prvky. Pro porovnání jednotlivých konstrukcí jsou v uvedených grafech zobrazeny tyto hodnoty:

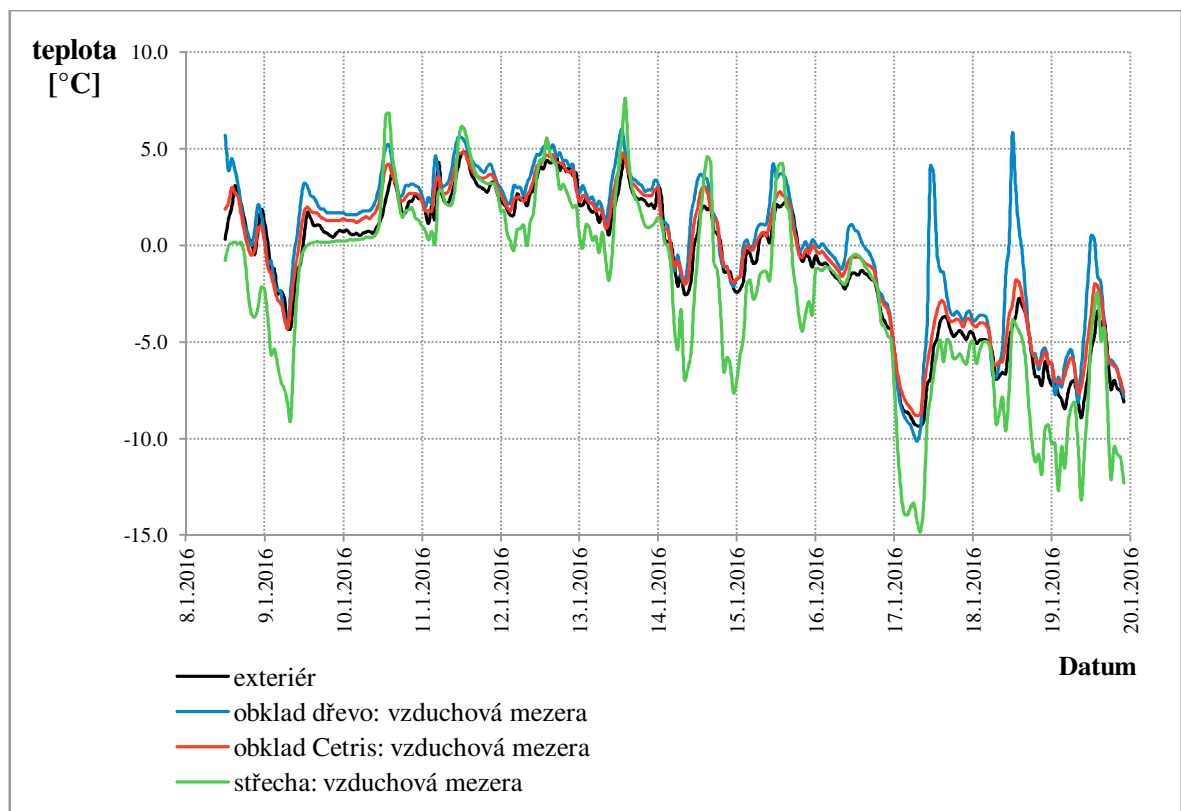
- venkovní teplota (exteriér),
- teplota vnitřního vzduchu (interiér),
- teplota na vnějším povrchu konstrukcí (v případě dvouplášťových konstrukcí na vnějším povrchu před větranou vzduchovou mezerou, nejedná se tedy o teploty na povrchu venkovního obkladu či střešní krytiny),
- teplota uvnitř vzduchové mezery (pro dvouplášťové konstrukce),
- teplota na vnitřním povrchu konstrukcí,
- relativní vlhkost vnějšího vzduchu (exteriér),
- relativní vlhkost vzduchu uvnitř vzduchové mezery pod Cetris obkladem (interiér).



Obr. 26: Polohy měřicích zařízení pro zimní a jarní období: a) obvodová stěna s kontaktním zateplením, b) obvodová stěna s dřevěným obkladem, c) obvodová stěna s obkladem Cetris, d) dvouplášťová střecha

Analýza průběhů teplot

Na Obr. 27 jsou graficky znázorněny průběhy teplot vnějšího vzduchu, který na hodnocené konstrukce působí. V případě obvodové stěny s kontaktním zateplovacím systémem se jedná o venkovní teplotu (exteriér). Na dvouplášťové konstrukce pak přímo působí teploty, které byly zjišťovány uvnitř provětrávaných vzduchových mezer.

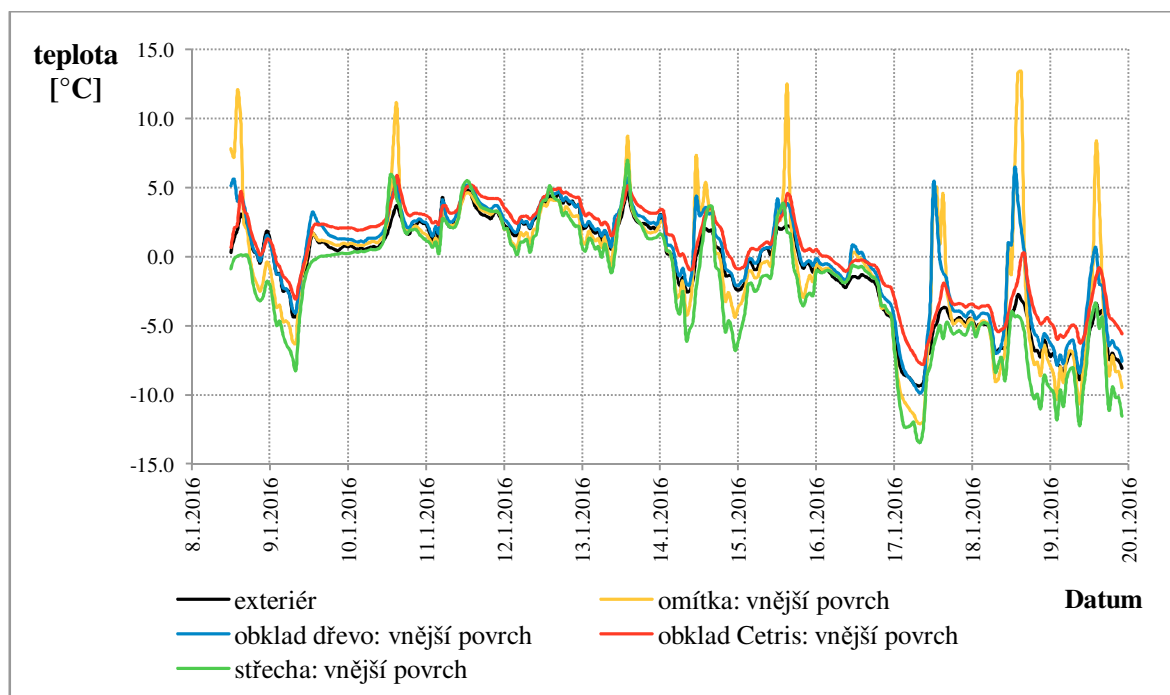


Obr. 27: Průběhy teplot vnějšího vzduchu ve sledovaném zimním období

Z naměřených dat jsou patrné následující jevy:

- V případě větrané vzduchové mezery u střešní konstrukce dochází k významným poklesům teploty vzduchu uvnitř mezery oproti teplotě vzduchu vnějšího prostředí. K podchlazení vzduchu uvnitř vzduchové mezery dochází prokazatelně v souvislosti s chladným sáláním noční oblohy [46]. Tento jev má negativní vliv na tepelnou ztrátu střešní konstrukce v nočních hodinách, kdy je konstrukce zatížena větším teplotním spádem v porovnání s metodikou výpočtu tepelné ztráty, kdy se za vnější okrajovou podmínku považuje teplota vzduchu vnějšího prostředí. Maximální zjištěný rozdíl mezi teplotou vnějšího vzduchu a teplotou uvnitř vzduchové mezery je 5,5 °C. Co se týče bilance teplot v rámci sledovaného období, průměrná teplota vzduchu uvnitř vzduchové mezery byla -2,2 °C, zatímco průměrná teplota venkovního vzduchu byla -0,8 °C. Chladný vzduch uvnitř vzduchové mezery má pak přímý vliv na teplotu vnějšího povrchu spodního pláště střešní konstrukce.
- Teploty, které působí na vnějším povrchu dvouplášťových obvodových stěn, jsou prokazatelně vyšší než teplota vnějšího vzduchu a to průměrně o 0,5 °C v případě obkladu Cetris a o 1,1 °C v případě dřevěného obkladu. Konstrukce provětrávané fasády plní ochrannou funkci a omezují vliv chladného sálání noční oblohy. Tato skutečnost má mimo jiné pozitivní vliv na energetickou bilanci daných konstrukcí.

Na Obr. 28 jsou graficky znázorněny průběhy teplot na vnějším povrchu konstrukcí. V případě dvouplášťových konstrukcí se jedná o teplotu na vnějším povrchu konstrukce před vzduchovou mezerou.

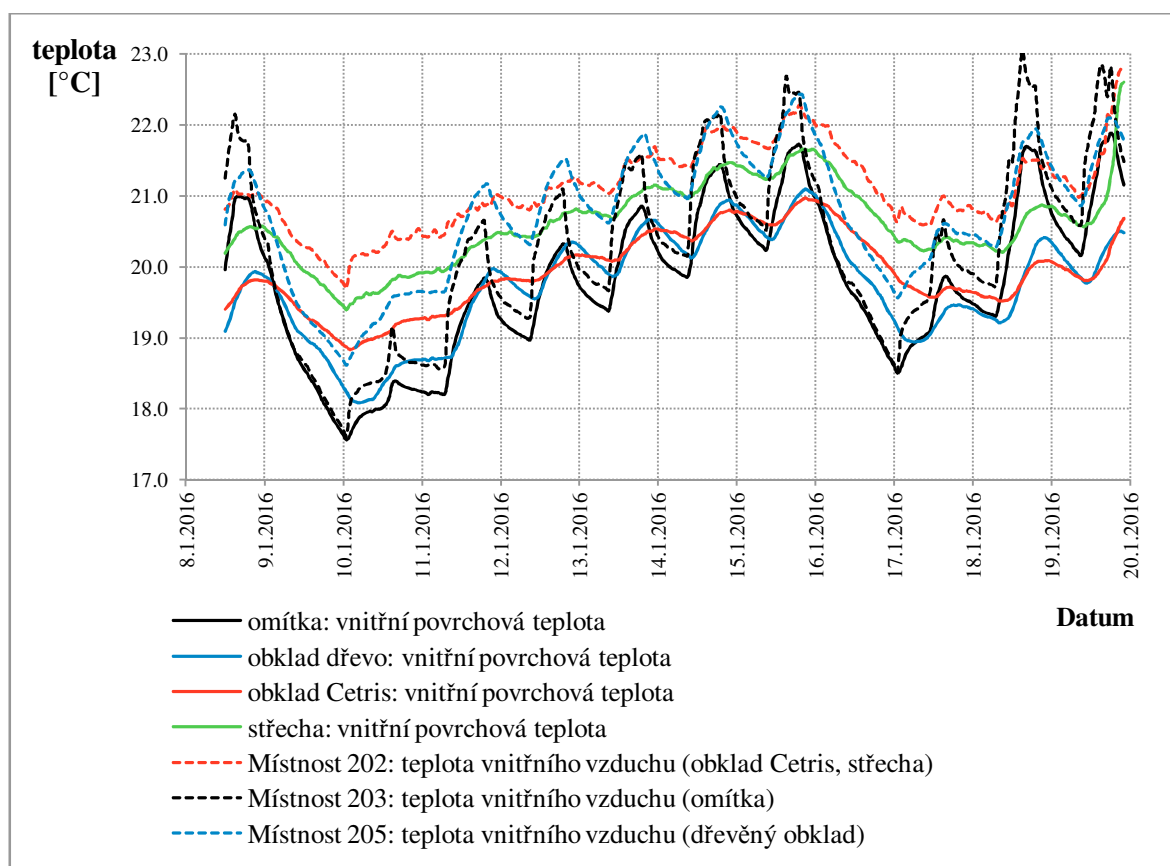


Obr. 28: Průběhy teplot na vnějším povrchu konstrukcí ve sledovaném zimním období

Z naměřených dat jsou patrné následující jevy:

- Vliv chladného sálání jasné noční oblohy [46, 47] v případě obvodové stěny s kontaktním zateplením a omítkou. Je patrné významné podchlazování konstrukce v nočních hodinách a brzkých ranních hodinách. Tato konstrukce je zároveň vystavena největší teplotní zátěži, kdy naopak ve dne dochází k prohřívání vnějšího povrchu konstrukce vlivem solárního záření.
- Nejvíce ochlazovanou konstrukcí je konstrukce střechy. Velmi nízké teploty na povrchu spodního pláště střešní konstrukce jsou ovlivněny teplotou vzduchu uvnitř vzduchové mezery, která v nočních hodinách může klesat pod teplotu vzduchu vnějšího prostředí. Toto je patrné z předchozího Obr. 27, kdy byly teploty uvnitř vzduchové mezery v nočních a ranních hodinách podstatně nižší, než teplota vnějšího vzduchu.
- V případě obvodových stěn s provětrávanou vzduchovou mezerou je patrné, že jsou konstrukce účelně chráněny proti vnějším vlivům a to lze konstatovat na základě stabilnějšího průběhu teplot.

Na Obr. 29 jsou graficky znázorněny průběhy teplot na vnitřním povrchu konstrukcí. Zároveň jsou zobrazeny současné hodnoty teplot vnitřního vzduchu, které na sledované konstrukce z vnitřní strany působí.



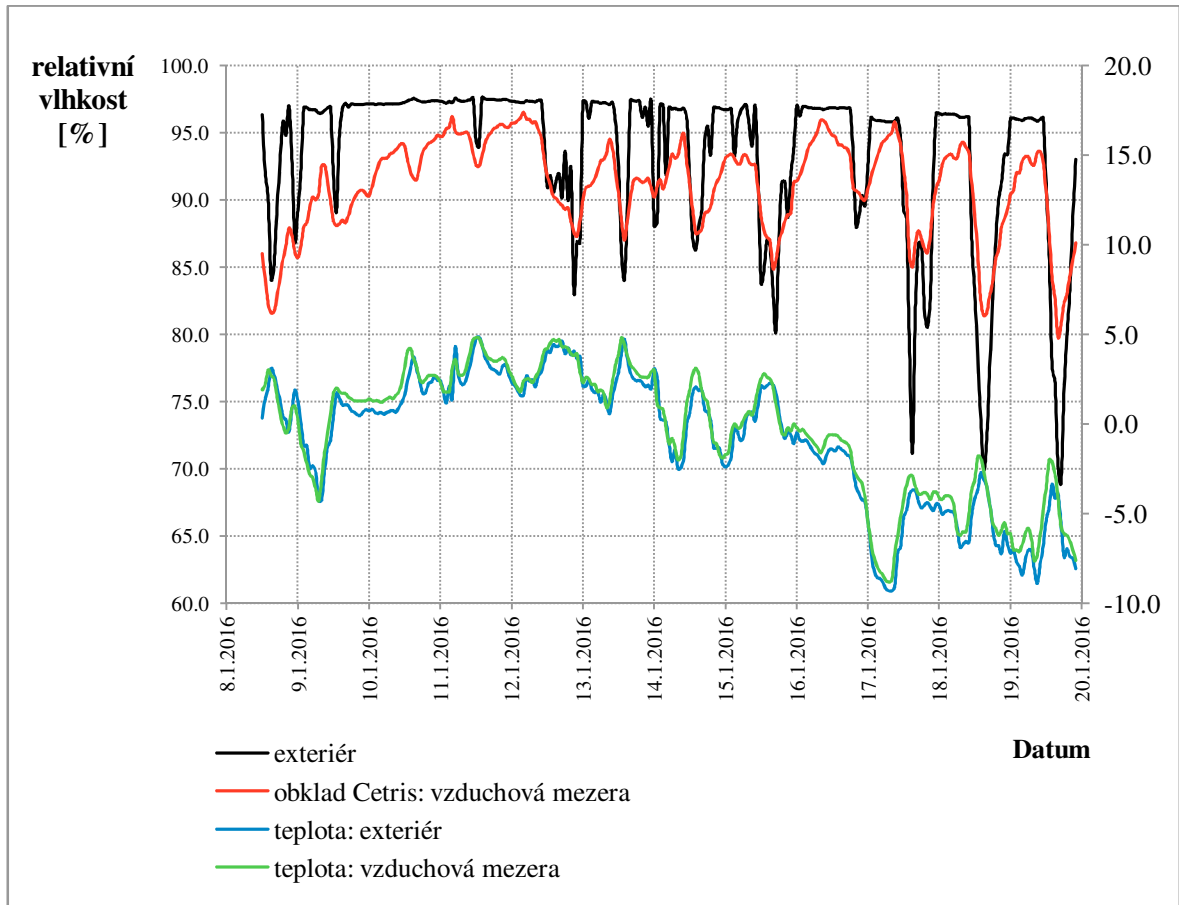
Obr. 29: Průběhy vnitřních povrchových teplot ve sledovaném zimním období

Z naměřených dat jsou patrné následující jevy:

- V případě místností 203 a 205 (viz Obr. 16) jsou patrné výrazné výkyvy teplot během dne. Toto je způsobeno především útlumem vytápění a následným zátopem v ranních hodinách. V případě místnosti 202 (viz Obr. 16) není tento jev natolik patrný, což je dáno vlivem tepelných zisků od počítačového serveru, který je v dané místnosti situován. V souvislosti s touto skutečností lze upozornit na zásadní vliv tepelných zisků ze spotřebičů na chování teplot uvnitř místností a to právě v případě budov s velmi nízkou energetickou náročností.
- Rozdíl mezi teplotou vnitřního vzduchu a vnitřní povrchovou teplotou dvouplášťové stěny je průměrně 1,2 °C v případě obkladu Cetris a 1,0°C v případě dřevěného obkladu.
- Rozdíl mezi teplotou vnitřního vzduchu a vnitřní povrchovou teplotou stěny s kontaktním zateplením je průměrně pouze 0,4 °C. V případě této konstrukce s jižní orientací je však velmi zajímavé vzájemné chování obou křivek. Na rozdíl od předchozích konstrukcí křivky nekopírují svůj průběh. Pravidelně dochází k vyrovnávání těchto teplot a je patrná postupná odezva konstrukce na změnu teploty vzduchu v místnosti vlivem solárních zisků.
- Rozdíl mezi teplotou vnitřního vzduchu a vnitřní povrchovou teplotou dvouplášťové stěny je průměrně pouze 0,5 °C. Menší rozdíl teplot v porovnání s obvodovou stěnou je dán z fyzikálního hlediska především konvekcí teplého vzduchu směrem nahoru, což je při tepelně-technických zohledněno nižším tepelným odporem na vnitřní straně vodorovné konstrukce.

Analýza relativních vlhkostí

Na Obr. 30 jsou graficky zobrazeny výsledky měření relativních vlhkostí vnějšího vzduchu a vzduchu uvnitř provětrávané vzduchové mezery s obkladem Cetris. Měření relativních vlhkostí pod dřevěným obkladem a ve vzduchové mezeře střešní konstrukce nebylo provedeno. Zároveň jsou v grafu zobrazeny průběhy teplot vnějšího vzduchu a vzduchu uvnitř vzduchové mezery, se kterými průběhy relativních vlhkosti vzduchu velmi úzce souvisí.



Obr. 30: Průběhy relativních vlhkostí vnějšího vzduchu ve sledovaném zimním období

Z naměřených dat jsou patrné následující jevy:

- Relativní vlhkosti uvnitř vzduchové mezery jsou ve sledovaném období průměrně o 2,5 % nižší než relativní vlhkost vnějšího vzduchu. Přestože je rozdíl jen nepatrný, v souvislosti s proudícím vzduchem uvnitř vzduchové mezery má jistě pozitivní vliv na odvádění vlhkosti z obvodové konstrukce.
- V případě vzduchové mezery nedochází k tak dynamickým změnám relativní vlhkosti jako je tomu v případě relativní vlhkosti venkovního vzduchu.

Součástí této disertační práce je také podrobnější analýza pro jednotlivé obvodové konstrukce. Tato část analýzy je součástí přílohy č. 13.1.

b) Analýza výsledků měření v jarním období

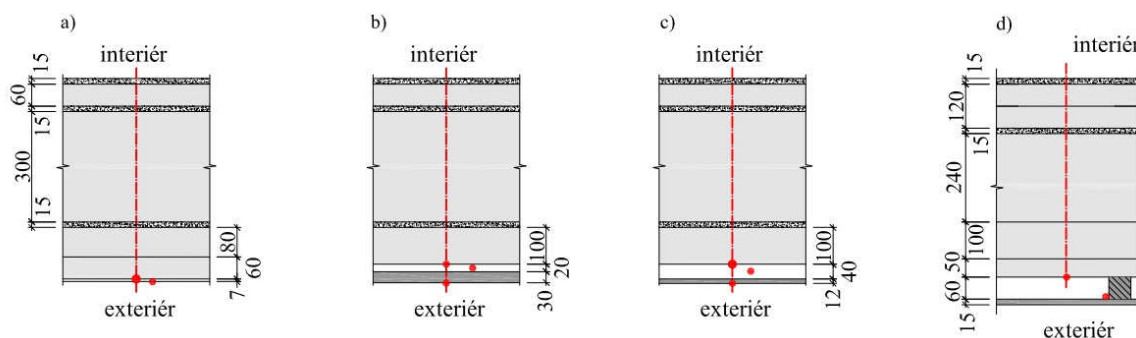
Měření bylo provedeno v termínu 14. 3. – 28. 3. 2017. Umístění měřícího zařízení je shodné s měřením v zimním období. Výsledky měření v jarním období jsou součástí přílohy č. 13.2 této disertační práce.

Průběhy teplot a relativních vlhkostí jsou obdobné jako v zimním období, avšak s ohledem na jiné klimatické podmínky a s tím související teplotní spád, který na konstrukce působí, lze konstatovat, že vliv sledovaných jevů není tolik markantní. Obdobně jako v zimním období lze pro konstrukce obvodových stěn s provětrávanou fasádou sledovat vyšší teploty uvnitř vzduchové mezery. Stejně lze sledovat vliv sálání jasné noční oblohy. K podchlazení v nočních hodinách dochází u konstrukce obvodové stěny s kontaktním zateplením a omítkou, nejvíce ochlazovanou konstrukcí je střecha. Rozdíly teploty vzduchu uvnitř vzduchové mezery v případě střešní konstrukce a teploty vnějšího vzduchu již nejsou tak významné jako v zimním období, kdy bylo podchlazení vzduchu markantnější. Při vyhodnocení bilance vlivu podchlazení a prohřívání střešní konstrukce vlivem solárního záření během dne však pro jarní období konstatovat, že průměrná teplota vzduchu uvnitř vzduchové mezery byla 5,9 °C, zatímco průměrná teplota venkovního vzduchu byla 4,5 °C. Podchlazování konstrukcí s ohledem na tepelné zisky během dne v tomto období proto není tak významné jako v období zimním.

c) Analýza výsledků měření v letním období

Měření bylo provedeno v termínu 4. 8. – 23. 8. 2017. Pro analýzu jsou využita data získávaná průběžným měřením ve sledované budově a navíc jsou doplněna měření teplot na povrchu konstrukcí v kontaktu s vnějším vzduchem – povrchová čidla byla navíc umístěna na omítkě, vnějším povrchu dřevěného obkladu a obkladu z desek Cetris. Uvnitř větraných vzduchových mezer dvouplášťových fasád byla provedena doplňková měření teplot a relativních vlhkostí. Umístění měřících zařízení pro letní období je uvedeno na Obr. 31. Zároveň byla provedena měření intenzity slunečního záření na východní a západní straně fasády sledované budovy pro posouzení vlivu slunečního záření na povrchovou teplotu fasády. Pro porovnání jednotlivých konstrukcí jsou v uvedených grafech zobrazeny tyto hodnoty:

- Venkovní teplota (exteriér)
- Teplota na vnějším povrchu konstrukcí (v případě dvouplášťových konstrukcí na vnějším povrchu před větranou vzduchovou mezerou, nejedná se tedy o teploty na povrchu venkovního obkladu či střešní krytiny)
- Teplota uvnitř vzduchové mezery (pro dvouplášťové konstrukce)
- Teplota na vnějším povrchu omítky, resp. obkladu pro obvodové stěny
- Intenzita slunečního záření - východní a západní fasáda



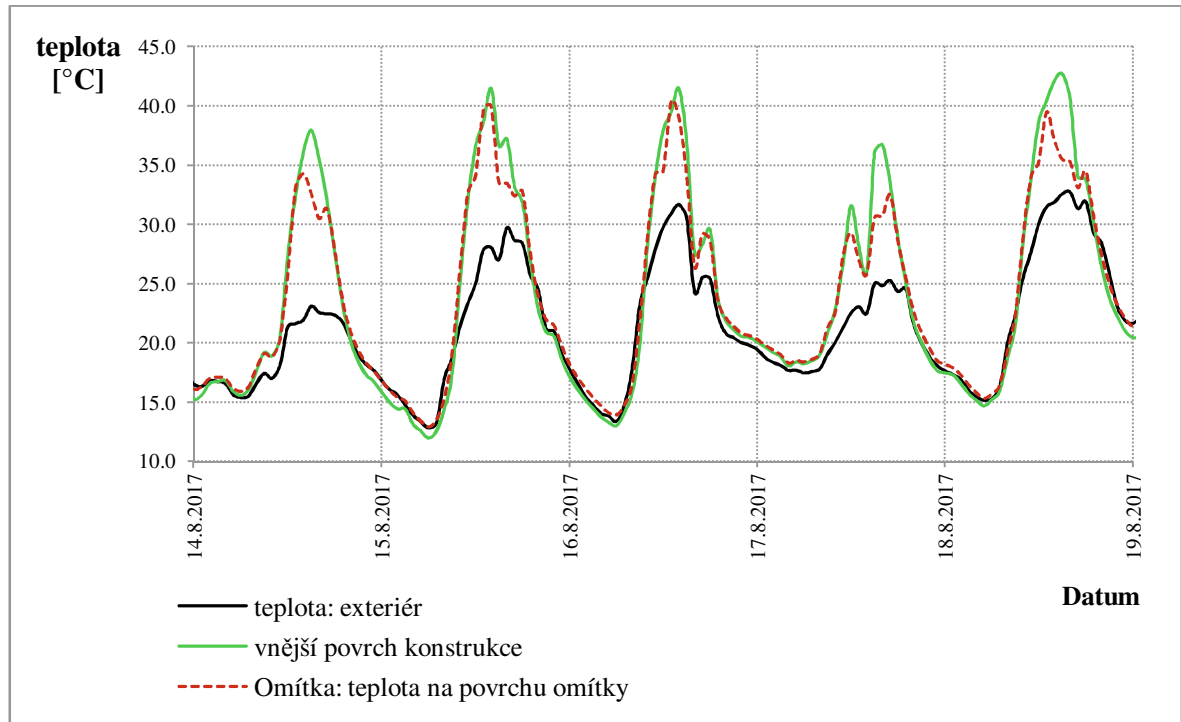
Obr. 31: Polohy měřících zařízení pro letní období: A) obvodová stěna s kontaktním zateplením, B) obvodová stěna s dřevěným obkladem, C) obvodová stěna s obkladem Cetris, D) dvouplášťová střecha

Analýza průběhů teplot

V letním období je nutné řešit letní tepelnou stabilitu, která se s ohledem na snižování energetické náročnosti budov stává velmi aktuálním, avšak stále podceňovaným problémem. Je nutné si uvědomit, že energetická náročnost budov nesouvisí pouze s problematikou jejího vytápění, ale zásadním způsobem ji v případě budov, které jsou nedostatečně chráněny před tepelnou zátěží v letním období, ovlivňují také systémy chlazení.

V případě dobře navržených dvouplášťových konstrukcí by měla větraná vzduchová mezera zamezit přehřívání těchto konstrukcí. Jak již bylo zmíněno, přehřívání konstrukcí je nežádoucím jevem. Pro lepší názornost jsou v níže uvedených grafech uvedeny pouze výsledky experimentálního měření v období od 14. 8. do 18. 8. 2017, kdy venkovní teploty v odpoledních hodinách stoupaly nad 30 °C, a to jednotlivě pro sledované konstrukce. Kompletní výsledky měření v letním období jsou uvedeny v příloze č. 13.3 této disertační práce.

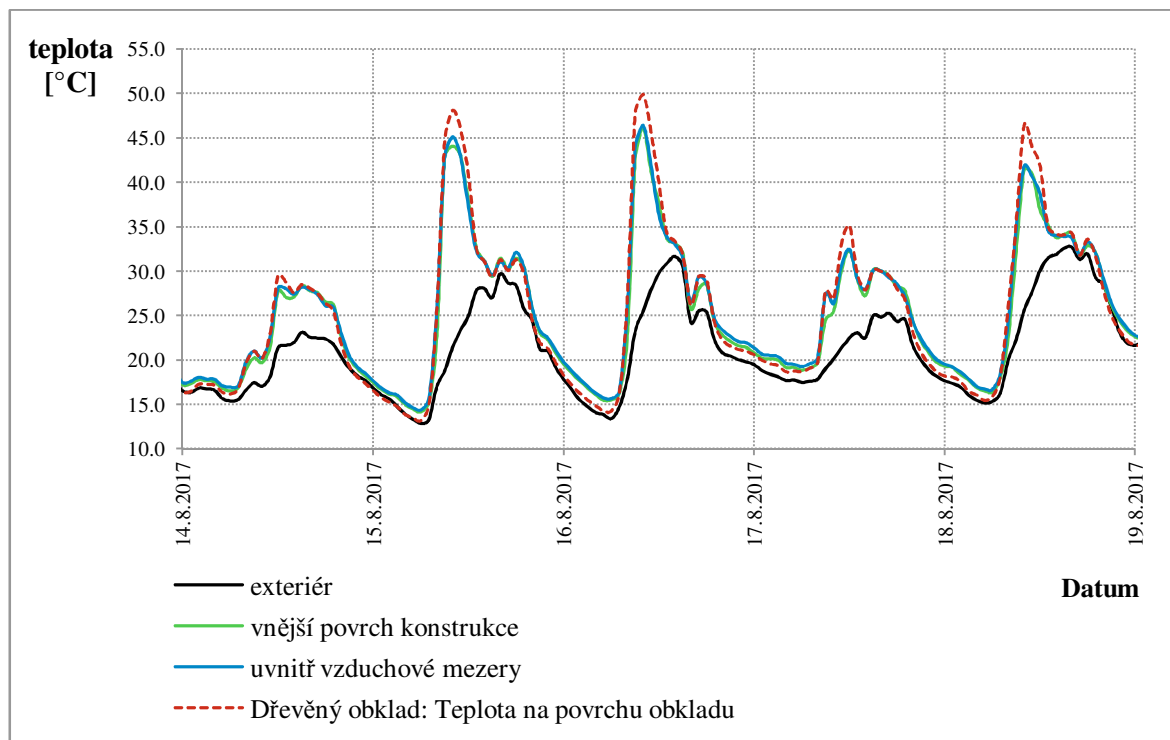
Na Obr. 32 jsou uvedeny výsledky měření pro stěnu s kontaktním zateplením a omítkou, která je orientována na jih. Obr. 33 uvádí výsledky měření pro stěnu opatřenou dřevěným obkladem s východní orientací a Obr. 34 výsledky pro stěnu opatřenou obkladem z desek Cetris se západní orientací.



Obr. 32: Průběhy teplot na vnější straně stěnové konstrukce opatřené omítkou (jižní orientace fasády) v letním období

Z naměřených dat jsou patrné následující jevy:

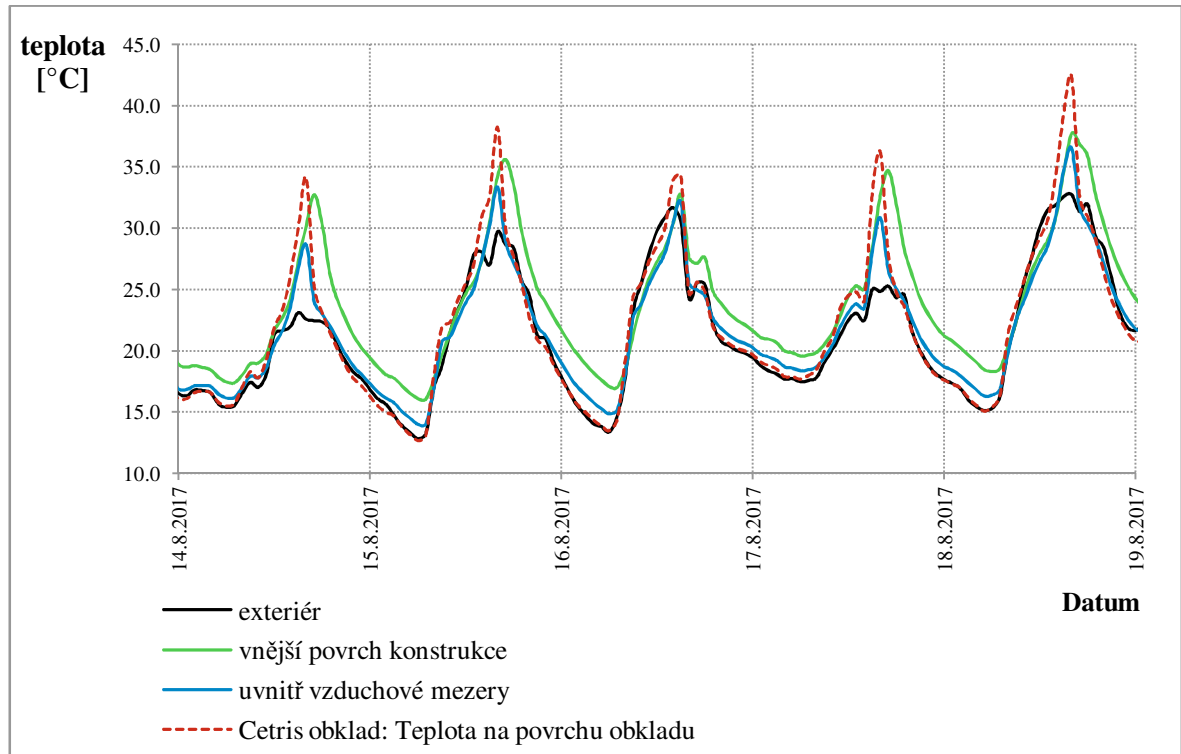
- Pro stěnovou konstrukci opatřenou omítkou jsou zajímavé teploty změřené pod povrchem omítky, které jsou vyšší než teploty měřené kontaktním čidlem na samotném povrchu omítky a to průměrně o 0,1 °C. Významných rozdílů je však dosaženo při velmi vysokých teplotách v odpoledních hodinách, kdy dochází k akumulaci tepla uvnitř vnější vrstvy konstrukce a pod jejím povrchem jsou zjištěny podstatně vyšší teploty než na samotném povrchu konstrukce, což má souvislost s prouděním vzduchu okolo vnějšího povrchu konstrukce. Největší rozdíl v těchto teplotách byl zjištěn dne 18. 8. 2017, kdy byly zjištěny také nejvyšší teploty vnějšího vzduchu. Teplota pod povrchem omítky byla ve svém maximu o 6 °C vyšší než teplota zjištěná na povrchu konstrukce. V nočních hodinách, kdy není fasáda ovlivněna slunečním zářením, jsou tyto teploty téměř shodné s teplotou venkovního vzduchu.
- Lze zaznamenat také vliv sálání noční oblohy [46], kdy byly zjištěny teploty nepatrně nižší než teplota venkovního vzduchu. Tento jev byl lépe patrný v případě sledování chování konstrukcí v zimním období při velmi nízkých venkovních teplotách.



Obr. 33: Průběhy teplot na vnější straně dvouplášťové stěnové konstrukce opatřené dřevěným obkladem (východní orientace fasády) v letním období

Z naměřených dat jsou patrné následující jevy:

- Pro dvouplášťovou stěnu s dřevěným obkladem je zjevný nárůst teploty uvnitř vzduchové mezery a zároveň také na vnějším povrchu konstrukce vlivem slunečního záření, kdy dochází k prohřívání vzduchu pod dřevěným obkladem. Teploty uvnitř vzduchové mezery jsou však při maximálních denních teplotách vnějšího vzduchu nižší než teploty zjištěné na povrchu obkladu a to až o 4,6 °C, čímž je eliminována tepelná zátěž vnitřního pláště konstrukce.
- Zároveň v případě této konstrukce bylo zjištěno, že teploty na vnějším povrchu konstrukce se téměř rovnají teplotě vzduchu uvnitř vzduchové mezery. V nočních hodinách, na rozdíl od konstrukce opatřené omítkou, teploty uvnitř vzduchové mezery zůstávají vyšší než teplota vnějšího vzduchu.

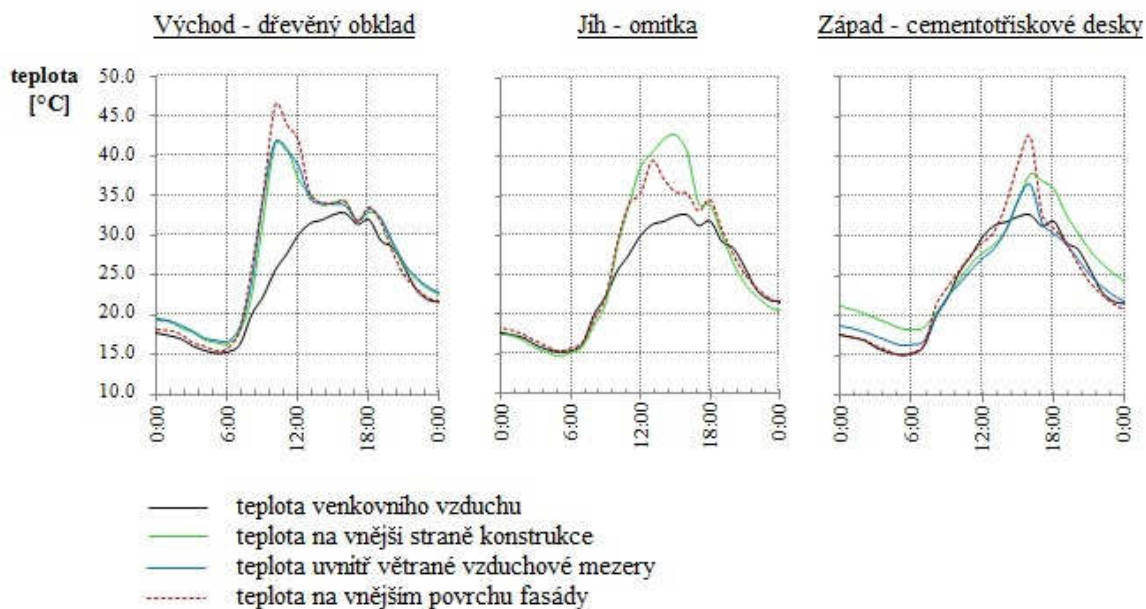


Obr. 34: Průběhy teplot na vnější straně dvouplášťové stěnové konstrukce opatřené obkladem z desek Cetris (západní orientace fasády) v letním období

Z naměřených dat jsou patrné následující jevy:

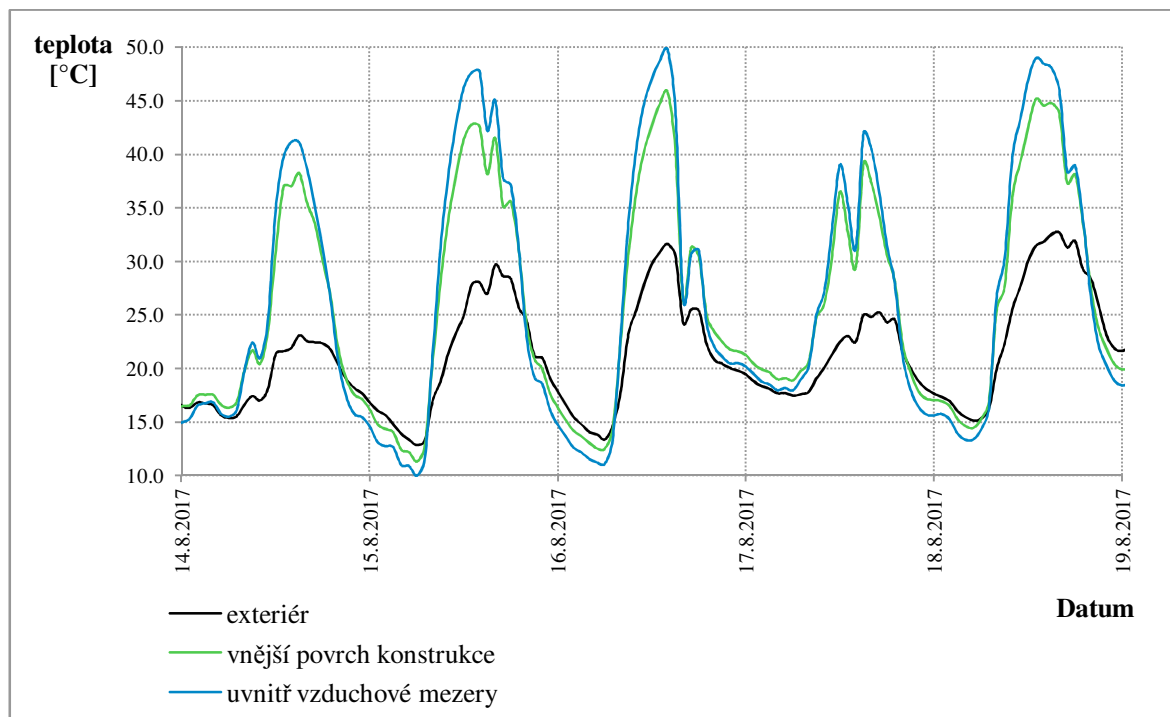
- Chování obvodové konstrukce, která je opatřena obkladem z desek Cetris, je velmi zajímavé. K nárůstu teplot uvnitř větrané vzduchové mezery a na vnějším povrchu konstrukce dochází v tomto případě až v odpoledních hodinách, což je samozřejmě dáno západní orientací této fasády. Teploty uvnitř vzduchové mezery jsou při maximálních denních teplotách vnějšího vzduchu, stejně jako v případě stěny opatřené dřevěným obkladem, nižší než teploty zjištěné na povrchu obkladu, v tomto případě však až o 5,8 °C. Eliminace tepelné zátěže vnitřního pláště konstrukce je v tomto případě významnější.
- V nočních hodinách se teploty na vnějším povrchu udržují podstatně vyšší než je teplota venkovního vzduchu, což je důsledkem akumulčních vlastností obkladu z cementotřískových desek. Zároveň jsou teploty na povrchu konstrukce podstatně vyšší než teploty vzduchu uvnitř vzduchové mezery. V ranních hodinách dochází k vyrovnání teplot.
- Velmi zajímavý je také vzestup teploty na vnějším povrchu konstrukce po vzestupu teploty zjištěné na vnějším povrchu obkladu s jistou časovou odezvou.

Uvedené jevy jsou dobře patrné také z Obr. 35, kde jsou uvedeny výsledky měření pro den 18. 8. 2017, kdy venkovní teploty stouply až na 32,5 °C. Stěnové konstrukce jsou v obrázku uvedeny v pořadí dle světových stran, tak aby byl patrný vliv slunečního záření na tyto konstrukce, kdy v závislosti na orientaci konstrukcí dochází v dané denní době k nárůstu teplot. Vzhledem k současnému vyobrazení všech tří konstrukcí je možné provést vizuální srovnání těchto konstrukcí.



Obr. 35: Průběhy teplot ve sledovaných místech stěnových konstrukcí dne 18. 8. 2017

V případě střešní konstrukce, viz Obr. 36, je patrné, že během dne dochází k zásadnímu ohřívání vzduchu uvnitř vzduchové mezery pod střešní krytinou vlivem slunečního záření. Pro střešní konstrukci je v porovnání s obvodovými stěnami zřejmé, že je tato konstrukce nejvíce zatížena teplotou. Z toho důvodu je důležité navrhovat větranou vzduchovou mezeru tak, aby byla teplotní zátěž konstrukce co nejvíce eliminována. Pro teploty uvnitř vzduchové mezery platí, že v nočních a brzkých ranních hodinách může docházet k poklesu teploty až pod teplotu vnějšího vzduchu. Maximální rozdíl byl zjištěn dne 18. 8. 2017, kdy byla teplota uvnitř vzduchové mezery o 3,7 °C nižší než teplota vnějšího vzduchu. Tato skutečnost je dána vlivem chladného sálání jasné noční oblohy [46, 47] a také prouděním chladného vzduchu uvnitř vzduchové mezery. Vlivem proudění chladného vzduchu větranou vzduchovou mezerou dochází i na vnějším povrchu konstrukce k ochlazení pod teplotu vnějšího vzduchu. Jev podchlazení vzduchu uvnitř vzduchové mezery byl zaznamenán také v zimním období, kdy se ovšem nejedná o jev, který by pozitivně ovlivňoval energetickou bilanci konstrukce. V letním období však toto podchlazení lze považovat za pozitivní. Zároveň lze konstatovat, že v zimním období byl vliv podchlazování podstatně markantnější a rozdíly mezi teplotou venkovního vzduchu a teplotou vzduchu uvnitř vzduchové mezery dosahovaly vyšších hodnot.



Obr. 36: Průběhy teplot na vnější straně dvouplášťové střechy v letním období

Intenzita slunečního záření

Tepelná zátěž budov v letním období je problematikou, která se bohužel mnohdy zanedbává. V důsledku toho jsou navrhovány budovy bez dostatečného stínění, které jsou pak velmi náchylné k přehřívání. V případě budov s velmi nízkou potřebou tepla a především u budov s lehkými obvodovými konstrukcemi, které mají nízkou akumulaci schopnost, je třeba problematiku letní tepelné stability důsledně řešit. K přehřívání budov dochází v důsledku tepelné zátěže, která je převážně způsobena tepelnými zisky okny bez dostatečného stínění. Zároveň však dochází také k tepelným ziskům ostatními konstrukcemi. Tepelným ziskům konstrukcemi je třeba věnovat pozornost především v případě budov s malým počtem výplní otvorů nebo v případě důsledně řešeného stínění oken.

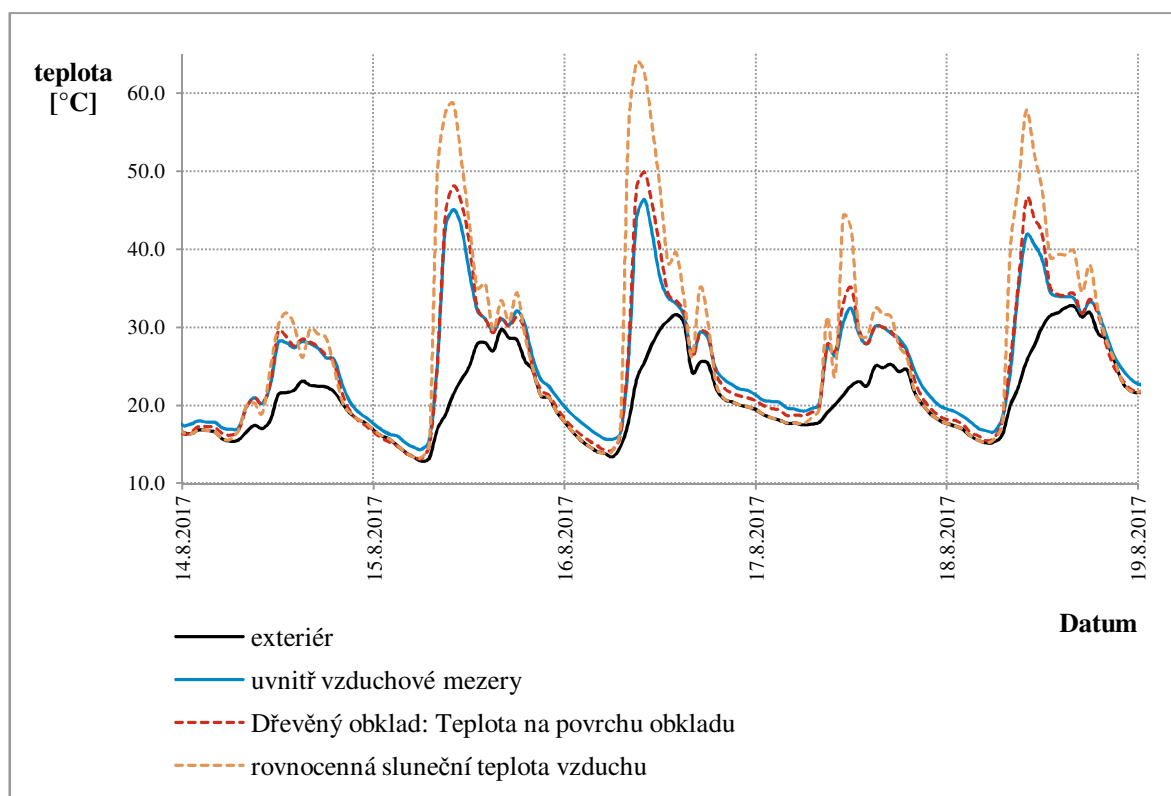
Tepelnou zátěží budov v letním období se mimo jiné zabývá norma ČSN 73 0548 „Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů“ [48], která mimo jiné uvádí výpočet tepelné zátěže stěnami. Při výpočtech tepelných zisků z vnějšího prostředí se pro výpočet tepelných toků uvažují teploty vzduchu po obou stranách stěny. V případě, že je konstrukce osluněna, teplota vnějšího vzduchu se nahrazuje tzv. rovnocennou sluneční teplotou vzduchu t_r , která je definována dle vztahu (37). Tímto je zohledněno sluneční záření, které zásadním způsobem ovlivňuje vnější teplotu, která na konstrukci skutečně působí.

$$t_r = t_e + \frac{\varepsilon \cdot i}{\alpha_e} , \quad (37)$$

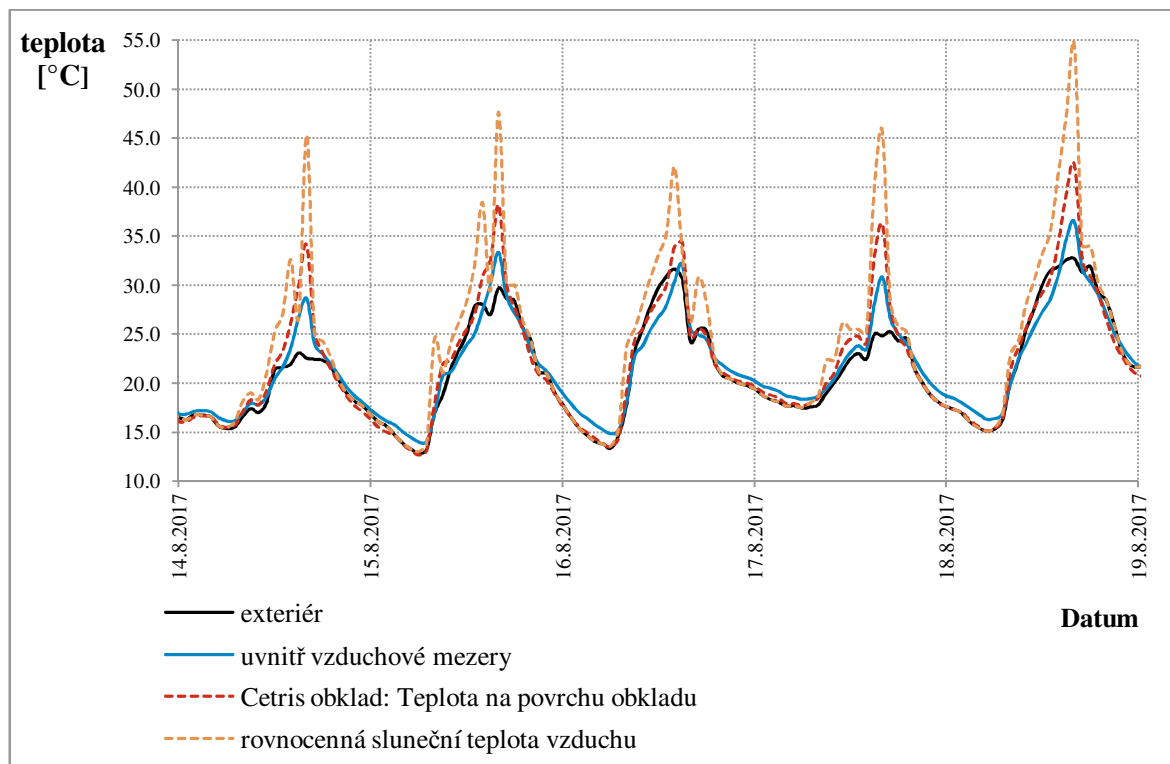
kde je

- t_r rovnocenná sluneční teplota vzduchu (°C),
- t_e teplota vnějšího vzduchu (°C),
- ε součinitel poměrné tepelné pohltivosti pro sluneční radiaci (-),
- i intenzita přímé a difúzní sluneční radiace dopadající na stěnu (W/m^2),
- α_e součinitel přestupu tepla na vnější straně stěny ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), uvažováno $\alpha_e = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Jednou z fyzikálních veličin, která byla v letním období měřena, je intenzita slunečního záření, která byla zjišťována pro východní a západní fasádu, tedy pro fasády opatřené vzduchovou mezerou. Na základě získaných dat byla dle výše uvedeného vztahu (37) stanovena rovnocenná sluneční teplota vzduchu t_r . Průběhy této teploty jsou znázorněny v následujících Obr. 36 a 37.



Obr. 37: Průběh rovnocenné sluneční teploty vzduchu pro výpočet tepelných zisků konstrukcí (východní orientace fasády – konstrukce s dřevěným obkladem)

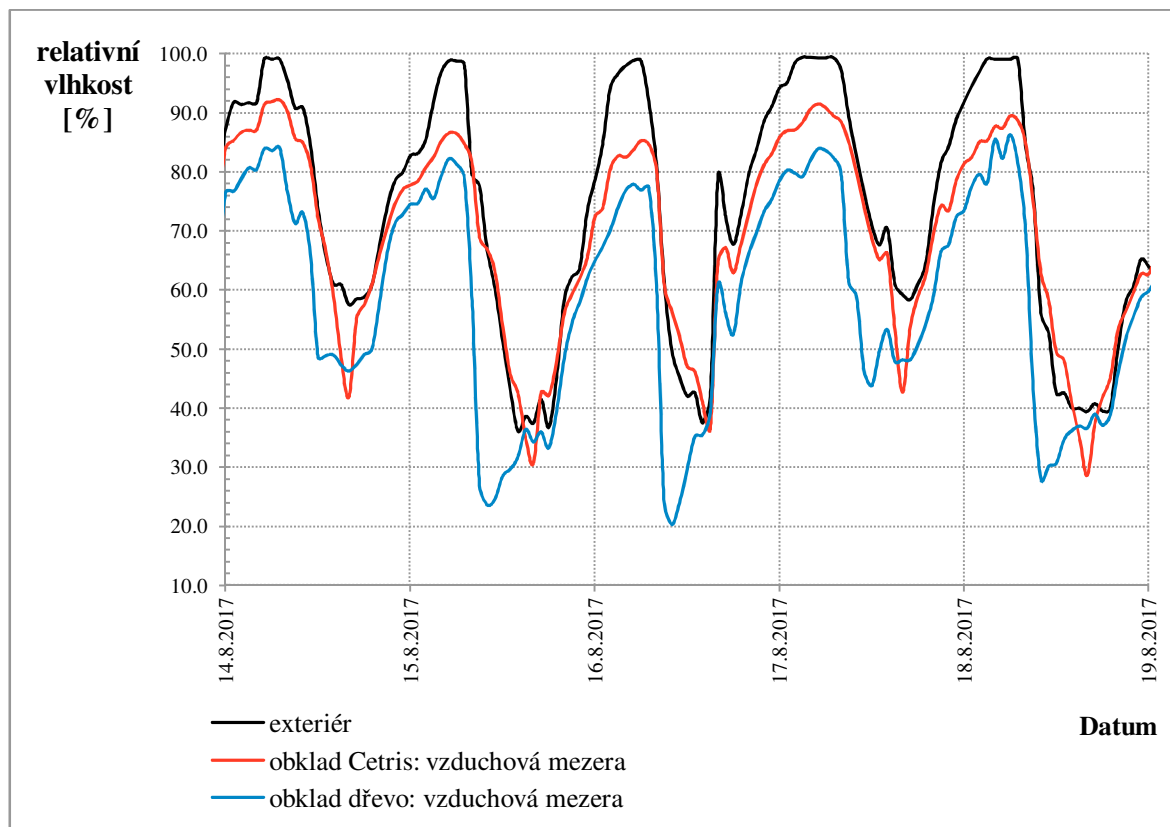


Obr. 38: Průběh rovnocenné sluneční teploty vzduchu pro výpočet tepelných zisků konstrukcí (západní orientace fasády – konstrukce s obkladem z cementotřískových desek Cetris)

Z výsledků je patrné, že pro výpočet tepelné zátěže je zásadní zohlednění vlivu solárního záření a to nejen pro případy průsvitných konstrukcí. Lze konstatovat, že výpočet tepelných zisků stěnami dle ČSN 73 0548 [48] je na stranu bezpečnou. Bylo zjištěno, že teploty na povrchu obkladu jsou v denních maximech výrazně nižší než rovnocenná sluneční teplota vzduchu t_r . V případě dvouplášťových konstrukcí je však tepelná zátěž konstrukce odezvou na teplotu v samotné provětrávané vzduchové mezeře. Použití rovnocenné sluneční teploty vzduchu je proto vhodné spíše pro konstrukce s kontaktním zateplením.

Analýza relativních vlhkostí

Výsledky měření relativních vlhkostí uvnitř větrané mezery provětrávaných fasád jsou uvedeny na Obr. 39. Z výsledků je prokazatelná výrazně nižší relativní vlhkost vzduchu ve vzduchových mezerách v porovnání s relativní vlhkostí venkovního vzduchu. Tato skutečnost souvisí s teplotami uvnitř vzduchových mezer, které jsou vyšší než teplota venkovního vzduchu viz Obr. 32 a Obr. 33. Za předpokladu proudění vzduchu uvnitř vzduchové mezery má tato skutečnost pozitivní vliv na roční bilanci vlhkosti v konstrukcích.



Obr. 39: Průběhy relativních vlhkostí na vnější straně obvodových konstrukcí v letním období

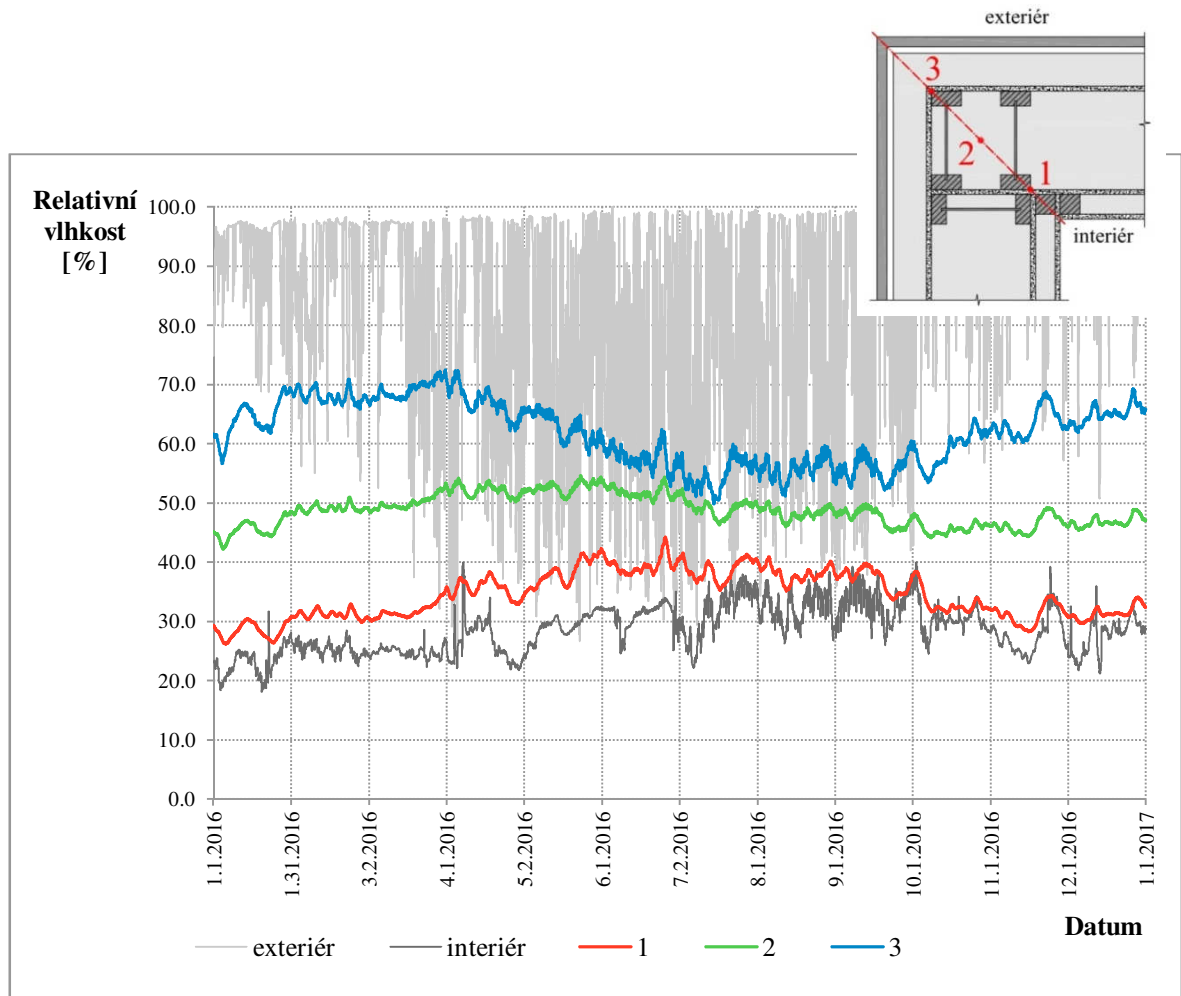
d) Analýza výsledků měření relativních vlhkostí uvnitř konstrukcí

Pro vyhodnocení bilance relativních vlhkostí uvnitř konstrukcí byl zvolen jako referenční období rok 2016. Vyhodnocením naměřených dat bylo zjištěno, že v konstrukcích ve sledovaných místech nedochází ke kondenzaci vodních par, což je základní podmínkou správné funkce takovýchto konstrukcí. Zde je na místě připomenout, že skladby konstrukcí jsou řešeny jako difúzně otevřené, tedy vodní páry mohou konstrukcí volně prostupovat, jelikož ve skladbě konstrukcí není použita parozábrana.

Relativní vlhkosti byly vyhodnoceny pro tyto řezy konstrukcemi:

- obvodová stěna s kontaktním zateplením opatřeným omítkou, v ose,
- obvodová stěna s provětrávanou fasádou:
 - a) s dřevěným obkladem, v ose,
 - b) s dřevěným obkladem, v místě nosníku Steico,
 - c) s obkladem z cementotřískových desek Cetris, v ose,
- obvodová stěna – kout (místo tepelné vazby),
- dvouplášťová střecha.

Jako nejkritičtější místo byl vyhodnocen kout, který je tepelnou vazbou. Proto zde uvádím průběh relativních vlhkostí pro toto místo konstrukce. Roční průběhy relativních vlhkostí uvnitř konstrukcí pro ostatní řezy konstrukcemi jsou uvedeny v Příloze 13.4. Výsledky měření v místě koutu jsou uvedeny na následujícím obrázku Obr. 40. Maximální relativní vlhkost, která byla ve sledovaných místech zjištěna, je 72,2 % a to 6. 4. 2016. Jak je však patrné, relativní vlhkosti uvnitř vnitřního prostředí budovy je velmi nízká a prakticky nestoupá nad 40 %. Je to dáno skutečností, že hodnocená budova je experimentální a není standardně užívána.



Obr. 40: Roční průběhy relativních vlhkostí uvnitř konstrukce obvodové stěny v místě koutu

4.2. Teoretická analýza chování lehkých obvodových konstrukcí

V rámci teoretické analýzy chování lehkých obvodových konstrukcí bylo využito analytických a numerických výpočtových metod. Obě metody jsou použitelné pro homogenní i nehomogenní stavební konstrukce.

Analytické metody poskytují exaktní řešení úloh, nicméně pro složitější úlohy jsou výsledky zatíženy chybou vzniklou odvozením ze zjednodušujícího předpokladu. Proto jsou vhodné pouze pro geometricky jednoduché modely. Pomocí analytických metod nelze hodnotit konstrukce za nestacionárních okrajových podmínek, které odpovídají skutečným podmínkám vnitřního a vnějšího prostředí, které na stavební konstrukce reálně působí

Numerické metody naopak poskytují pouze přibližné řešení úloh. V případě komplikovanějších úloh je však lze považovat za metody poskytující přesnější výsledky ve vztahu k metodám analytickým.

4.2.1. Analytické metody výpočtu šíření tepla

Analytické metody výpočtu tepelně-technické úlohy značně zjednodušují, nicméně pro účely tepelně-technické praxe jsou výsledky těchto výpočtů dostatečné [28]. Jedná se o metody, které se ve stavební praxi běžně používají pro hodnocení a posuzování stavebních konstrukcí. Analytické metody výpočtu lze aplikovat pouze na výpočty ustáleného teplotního stavu, tedy pro stacionární vedení tepla. Tyto metody se používají pro:

- plošně homogenní konstrukce, ve kterých probíhají izotermy rovnoběžně s povrchem konstrukce
- plošně nehomogenní konstrukce, které jsou složeny v rovnoběžném i kolmém směru na směr tepelného toku z různých materiálů. V takových konstrukcích se teplo šíří ve dvou směrech (dvourozměrné teplotní pole).

Analytické řešení úloh lze aplikovat pouze na výpočty jednorozměrného šíření tepla. Z toho vyplývá, že pro případy plošně nehomogenních konstrukcí není analytický způsob výpočtu možný, jelikož zde dochází k vícerozměrnému šíření tepla, jak bylo uvedeno výše. V případě plošně nehomogenních konstrukcí se proto využívají pouze přibližné analytické metody výpočtu, které problém dvourozměrného šíření tepla transformují na jednorozměrné šíření tepla [32]. Základním předpokladem analytických metod je skutečnost, že teploty v jednotlivých bodech jsou pouze funkcí jejich polohy $t = f(x)$. Analytické metody lze využít pro stanovení průběhu teplot v konstrukcích, povrchových teplot a prostupu tepla. Níže uvedené vztahy jsou odvozeny na základě prvního a druhého Fourierova zákona, kterému je pozornost blíže věnována v kap. 2.3.1.

Základním předpokladem pro analytické výpočty je skutečnost, že při šíření tepla konstrukcí se hustota tepelného toku nemění, tedy:

$$q_i = q = q_e \quad (38)$$

a) Plošně homogenní konstrukce

Matematickým vyjádřením hustoty tepelného toku q a dosazením okrajových podmínek byly dále odvozeny níže uvedené veličiny. Nejčastěji používanou veličinou, pomocí které se ve stavební praxi hodnotí tepelně-technické vlastnosti konstrukcí, je součinitel prostupu tepla U . Na základě analytických metod se pro plošně homogenní konstrukce vypočte dle vztahu (39).

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}, \quad (39)$$

kde je

- U součinitel prostupu tepla ($W/(m^2 \cdot K)$),
- R_T odpor konstrukce při prostupu tepla ($(m^2 \cdot K)/W$),
- R_{si} odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ($(m^2 \cdot K)/W$),
- R_{se} odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce ($(m^2 \cdot K)/W$),
- R tepelný odpor konstrukce při prostupu tepla ($(m^2 \cdot K)/W$).

Pojem tepelného odporu stavební konstrukce je odvozen pro jednorozměrné šíření tepla za předpokladu ustáleného teplotního stavu [36]. Tepelný odpor konstrukce při prostupu tepla R je její jednoznačnou vlastností, která je dána skladbou jejich vrstev a vypočte se dle vztahu (40). Vrstvy stavebních konstrukcí lze rozdělit na:

- hmotné vrstvy: tepelný odpor jednotlivých vrstev je dán jejich tloušťkou a tepelnou vodivostí,
- uzavřené a slabě větrané vzduchové vrstvy: tepelný odpor nevětraných vzduchových vrstev je dán součinitelem přestupu tepla vedením, prouděním a sáláním v dané vrstvě,
- silně větrané vzduchové vrstvy: v těchto vrstvách dochází k významné výměně vzduchu s venkovním prostředím a z toho důvodu nelze její odpor zahrnout do výpočtu tepelného odporu konstrukce při prostupu tepla R .

$$R = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum R_{cav}, \quad (40)$$

kde je

- d_j tloušťka j -té vrstvy konstrukce (m),
- λ_j součinitel tepelné vodivosti j -té vrstvy konstrukce ($W/(m \cdot K)$),
- R_{cav} tepelný odpor nevětraných či slabě větraných vzduch. vrstev ($(m^2 \cdot K)/W$).

Odpor při přestupu tepla na vnější (R_{se}) a vnitřní (R_{si}) straně konstrukce na rozdíl od tepelného odporu při prostupu tepla charakterizuje výměnu tepla mezi okolím a povrchem konstrukce, která je dána prouděním vzduchu okolo povrchu konstrukce a sáláním mezi povrchem konstrukce a okolím, viz vztah (41) [49].

$$R_s = \frac{1}{h} = \frac{1}{h_c + h_r}, \quad (41)$$

kde je

- R_s odpor při přestupu tepla ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$),
- h součinitel přestupu tepla ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- h_c součinitel přestupu tepla prouděním ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
- h_r součinitel přestupu tepla sáláním ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

Pro praktické tepelně-technické výpočty se hodnoty odporu při přestupu tepla běžně stanovují podle normy ČSN 73 0540-4 viz Tab. 2.

Tab. 3: Odpor při přestupu tepla dle ČSN 73 0540-3 [50]

| Klimatické období | Povrch stavební konstrukce | Tvar a orientace povrchu konstrukce | | Odpor při přestupu tepla R_{si}, R_{se} ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$) | |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| | | | | Pro výpočty povrchových teplot a šíření vlhkosti | Pro výpočty šíření tepla |
| zimní | vnější* | - | | 0,04 | 0,04 |
| letní | | | | 0,07 | 0,07 |
| zimní i letní | vnitřní | svislý povrch | | 0,25 | 0,13 |
| | | vodorovný povrch | tep. tok zdola nahoru | 0,25 | 0,10 |
| | | | tep. tok shora dolů | 0,25 | 0,13 |

*Pro konstrukce s odvětrávanou vzduchovou mezerou se tepelný odpor na vnější straně konstrukce R_{se} uvažuje shodný s tepelným odporem na vnitřní straně konstrukce R_{si} .

Pro hustotu tepelného toku q platí vztah (42):

$$q = (\theta_i - \theta_e) / R_T = U \cdot (\theta_i - \theta_e), \quad (42)$$

kde je

- q hustota tepelného toku (W/m^2),
- U součinitel prostupu tepla ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),

- R_T odpor konstrukce při prostupu tepla ($(m^2 \cdot K)/W$),
- θ_i teplota na vnitřní straně konstrukce ($^{\circ}C$),
- θ_e teplota na vnější straně konstrukce ($^{\circ}C$).

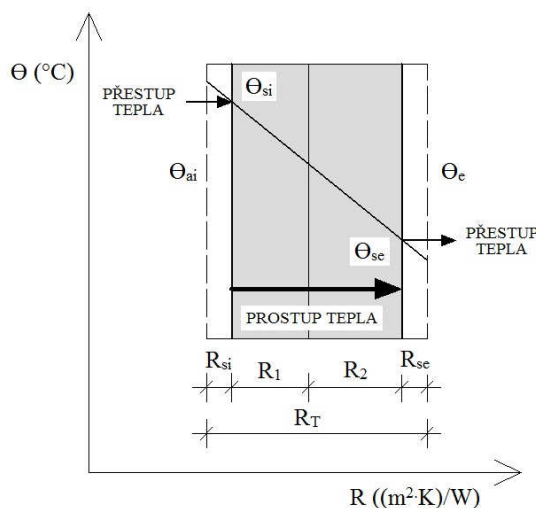
Průběh teplot uvnitř konstrukce je pak ve vztahu k tepelnému odporu jednotlivých vrstev lineární, tedy platí $\theta_x = f(R_x)$, jak je schematicky znázorněno na Obr. 41. S ohledem na tuto skutečnost je možné pro určení průběhu teplot při jednorozměrném šíření tepla v konstrukcích kromě početních metod využít také metodu graficko-početní. Pro analytický výpočet vnitřní povrchové teploty konstrukce platí vztah (43), obdobně lze určit teplotu v jakémkoliv místě konstrukce dle vztahu (44). Znalost teploty v jakémkoliv místě konstrukce je zásadní pro výpočet parciálních tlaků vodních par uvnitř konstrukcí a následné vyhodnocení kondenzace vodních par uvnitř konstrukcí.

$$\theta_{si} = \theta_{ai} - U \cdot R_{si} \cdot (\theta_{ai} - \theta_e), \quad (43)$$

$$\theta_x = \theta_{ai} - U \cdot (\theta_{ai} - \theta_e) \cdot (R_{si} - R_x), \quad (44)$$

kde je

- θ_{si} vnitřní povrchová teplota konstrukce ($^{\circ}C$),
- θ_{ai} návrhová teplota vnitřního vzduchu ($^{\circ}C$), stanovená jako $(\theta_i + \Delta\theta_{ai})$,
- U součinitel prostupu tepla ($W/(m^2 \cdot K)$), stanovený pro odpory při přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce pro výpočet povrchových teplot
- R_x tepelný odpor od vnitřní strany konstrukce po místo x v konstrukci, kde stanovujeme teplotu ($(m^2 \cdot K)/W$).



Obr. 41: Schematické znázornění prostupu a přestupu tepla konstrukcí v závislosti na tepelných odporech

b) Plošně nehomogenní konstrukce

Pro plošně nehomogenní konstrukce, tedy takové, kde dochází k vícerozměrnému šíření tepla, lze využít pouze **přibližných** analytických metod. Pro nehomogenní konstrukce je typický výskyt tzv. tepelných mostů, což jsou místa v konstrukci, kde dochází ke zvýšenému tepelnému toku. Těmto místům je nutno věnovat pozornost s ohledem na možnou nižší vnitřní povrchovou teplotu konstrukce v místě tepelného mostu a s tím souvisejícím možným výskytem poruch (např. růst plísní) a zároveň s ohledem na výpočet energetické náročnosti budovy. Ve stavební praxi je zohlednění vlivu tepelných mostů mnohdy přehlíženo, což je zásadní chyba. Mezi nehomogenní konstrukce lze zařadit:

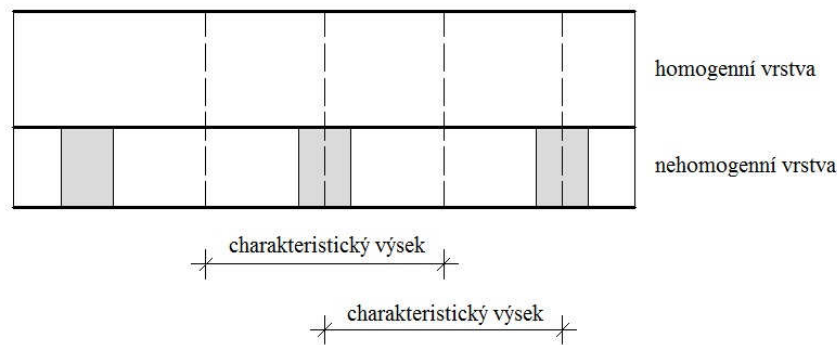
- konstrukce se systematickými tepelnými mosty
 - takové, kde se tepelné mosty pravidelně opakují (např. krokve ve střešní konstrukci, nosné prvky lehkých obvodových konstrukcí atd.)
- konstrukce s nesystematickými tepelnými mosty
 - takové tepelné mosty, které se v konstrukci objevují nepravidelně

Jelikož je disertační práce zaměřena na lehké obvodové konstrukce, pro které je charakteristický výskyt systematických tepelných mostů, jsou následující odstavce věnovány blíže metodám analytických výpočtů nehomogenních konstrukcí. Výčet metod tepelně-technických výpočtů pro nehomogenní konstrukce je uveden v Tab. 4.

Tab. 4: Metody výpočtu součinitele prostupu tepla plošně nehomogenních konstrukcí

| Typ tepelných mostů | Metody výpočtu | | |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Nesystematické | Metody charakteristických tepelných mostů (numerické metody) | | |
| Systematické | Metody charakteristického výseku | Přibližné (analytické) | Metoda horní a dolní meze |
| | | | Fokinova metoda |
| | | Pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti nehomogenní vrstvy | |
| | | Přesné (numerické) | Metoda řešení pomocí teplotního pole |

Jak již bylo zmíněno dříve, analytické metody výpočtu nehomogenních konstrukcí využívají zjednodušení a to převedení úloh dvourozměrného vedení tepla na jednorozměrné. Tyto metody lze použít pro konstrukce se systematickými tepelnými mosty, kdy je zvolen pravidelně se opakující úsek v konstrukce (viz Obr. 42) a tento je výpočtově hodnocen. K numerickým metodám je blíže pojednáno v kap. 4.2.1.



Obr. 42: Schematické znázornění konstrukce se systematickými tepelnými mosty

Metoda horní a dolní meze

Pomocí metody horní a dolní meze je stanoven přibližně odpor konstrukce při prostupu tepla R_T dle vztahu (45) a následně je vypočtena hodnota součinitele prostupu tepla U dle vztahu (39).

$$R_T = (R'_T + R''_T)/2, \quad (45)$$

kde je

R'_T horní mez odporu při prostupu tepla ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$), stanovená z výseků konstrukce rovnoběžných na směr tepelný tok (ideální výsek konstrukce a výsek konstrukce s tepelným mostem) v závislosti na poměrných plochách daných výseků,

R''_T dolní mez odporu při prostupu tepla ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$), stanovená z vrstev konstrukce kolmých na směr tepelného toku, tepelný odpor nehomogenních vrstev je stanoven v závislosti na poměrných plochách.

Fokinova metoda

Pomocí Fokinovy metody je stanoven přibližně tepelný odpor konstrukce R dle vztahu (46), následně je stanoven odpor konstrukce při prostupu tepla R_T a je vypočtena hodnota součinitele prostupu tepla U dle vztahu (39).

$$R = (R' + 2 \cdot R'')/3, \quad (46)$$

kde je

R' horní mez tepelného odporu konstrukce ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$), stanovená z výseků konstrukce rovnoběžných na směr tepelný tok (ideální výsek konstrukce a výsek konstrukce s tepelným mostem) v závislosti na poměrných plochách daných výseků,

R'' dolní mez tepelného odporu konstrukce ($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$), stanovená z vrstev konstrukce kolmých na směr tepelného toku, tepelný odpor nehomogenních vrstev je stanoven v závislosti na poměrných plochách.

Ekvivalentní tepelná vodivost nehomogenní vrstvy

Jedná se o nejjednodušší metodu, kdy se vypočte pouze hodnota součinitele tepelné vodivosti nehomogenní vrstvy, tzv. ekvivalentní tepelná vodivost nehomogenní vrstvy, na základě váženého průměru součinitelů tepelné vodivosti jednotlivých materiálů (viz vztah (47)) a dále se postupuje dosazením do vztahů (39, 40).

$$\lambda_{ev} = (\lambda_1 \cdot A_1 + \dots + \lambda_n \cdot A_n) / (A_1 + \dots + A_n) , \quad (47)$$

kde je

- λ_{ev} ekvivalentní tepelná vodivost nehomogenní vrstvy (W/(m·K)),
- λ součinitel tepelné vodivosti jednotlivých materiálů v dané nehomogenní vrstvě (W/(m·K)),
- A plochy jednotlivých materiálů v charakteristickém výseku (m²).

4.2.2. Analytické metody výpočtu šíření vlhkosti

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.4, mezi vedením tepla a difúzí vodní páry existuje analogie fyzikálních jevů. Z toho vyplývá, že všechny zásady, které platí pro šíření tepla, platí také pro šíření vodních par v konstrukci. Proto vztahy, které popisují šíření vlhkosti stavebními konstrukcemi, jsou velmi podobné vztahům, uvedeným v předchozí kapitole. Stejně tak lze šíření vlhkosti konstrukcí rozdělit na stacionární a nestacionární a také na jednorozměrné a vícerozměrné šíření vlhkosti pro nehomogenní konstrukce. Analytické metody výpočtu šíření vodních par platí pouze pro ustálený stav a pro plošně homogenní konstrukce.

Výpočty šíření vodní páry v konstrukci jsou důležité pro stanovení případné kondenzace uvnitř konstrukce a určení množství zkondenzované vodní páry v konstrukci. S ohledem na výsledky těchto výpočtů jsou případně do skladeb konstrukcí navrhovány tzv. parozábrany, které zabraňují šíření vlhkosti dovnitř konstrukcí, u kterých by případná kondenzace vodní páry mohla ohrozit její požadovanou funkci. Obdobně jako je pro šíření tepla definován tepelný odpor stavební konstrukce, je pro šíření vlhkosti konstrukcí definován tzv. difúzní odpor konstrukce Z_p . Pro vícevrstvou konstrukci platí vztah (48).

$$Z_p = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\delta_{p,j}} = \sum_{j=1}^n \frac{s_{d,j}}{\delta_o} , \quad (48)$$

kde je

- Z_p difúzní odpor konstrukce (m/s),
- d_j tloušťka j-té vrstvy konstrukce (m),
- $\delta_{p,j}$ součinitel difúzní vodivosti j-té vrstvy konstrukce (s),
- $s_{d,j}$ ekvivalentní difúzní tloušťka j-té vrstvy konstrukce (m), viz vztah (49),
- δ_o součinitel difúzní vodivosti vzduchu (s),
(pro průměr. teplotu materiálů $\theta_{j,m} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ se uvádí hodnota $\delta_o = 2 \cdot 10^{-10} \text{ s}$).

Ekvivalentní difúzní tloušťka s_d je po součiniteli difúzní vodivosti δ_p a faktoru difúzního odporu μ , blíže viz kap. 2.4.1, další veličinou, která popisuje difúzní vlastnosti materiálu ve vztahu k difúzním vlastnostem vzduchu. Udává, jaká by musela být tloušťka vzduchové vrstvy, aby měla stejný difúzní odpor jako vrstva daného materiálu. Jedná se o další z veličin, kterou mnohdy výrobci stavebních materiálů deklarují jejich schopnost propouštět vodní páru. Ekvivalentní difúzní tloušťka se vypočte ze vztahu (49):

$$s_d = \mu \cdot d, \quad (49)$$

kde je

- s_d ekvivalentní difúzní tloušťka (m),
- μ faktor difúzního odporu (-),
- d tloušťka vrstvy (m).

Dále lze stanovit také **odpor při prostupu vodní páry** jako:

$$Z_{pT} = Z_{pi} + Z_p + Z_{pe}, \quad (50)$$

kde je

- Z_{pT} odpor při prostupu vodní páry (m/s),
- Z_p difúzní odpor konstrukce (m/s),
- Z_{pi} odpor při přestupu vodní páry na vnitřní straně konstrukce (m/s),
- Z_{pe} odporu při přestupu vodní páry na vnější straně konstrukce (m/s).

Odpor při přestupu vodní páry na vnější straně konstrukce, resp. vnitřní straně konstrukce, se stanoví dle vztahu (51) jako:

$$Z_p = \frac{1}{h_p}, \quad (51)$$

kde je

- Z_p odpor při přestupu vodní páry (m/s),
- h_p součinitel přestupu vodní páry (s/m).

Tab. 5: Odpor při přestupu vodní páry dle ČSN 73 0540-3 [50]

| Povrch stavební konstrukce | Odpor při přestupu vodní páry* Z_{pi}, Z_{pe} (m/s) |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|
| vnější | $0,05 \cdot 10^9$ |
| vnitřní | $0,10 \cdot 10^9$ |

*Hodnoty odporu při přestupu vodní páry na vnitřní a vnější straně konstrukce jsou v porovnání s difúzním odporem konstrukcí velmi malé a standardně se při výpočtech šíření vodní páry konstrukcí zanedbávají.

Pro hustotu difúzního toku vodní páry g_v platí vztah (52), na základě kterého lze odvodit vztahy pro výpočet parciálních tlaků vodní páry uvnitř konstrukce.

$$g_v = (p_i - p_e) / Z_p, \quad (52)$$

kde je

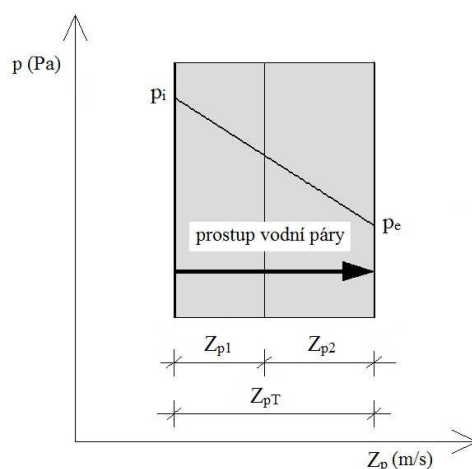
- g_v hustota difúzního toku vodní páry ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),
- Z_p difúzní odpor konstrukce (m/s),
- p_i částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnitřní straně konstrukce (Pa),
- p_e částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnější straně konstrukce (Pa).

Průběh částečného tlaku vodních par v konstrukci je lineární, tedy $p_x = f(Z_x)$, jak je schematicky znázorněno na Obr. 39. S ohledem na tuto skutečnost je opět možné pro určení průběhu částečného tlaku vodních par při jednorozměrném šíření tepla v konstrukcích kromě početních metod využít také metodu graficko-početní. Pro analytický výpočet částečných tlaků vodní páry uvnitř konstrukce platí vztah (53). Znalost této veličiny v jakémkoliv místě konstrukce je zásadní pro určení případné kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce.

$$p_x = p_i - \frac{(Z_{pi} + Z_{px})}{Z_{pT}} \cdot (p_i - p_e), \quad (53)$$

kde je

- p_x částečný tlak vodní páry v místě x konstrukce (Pa),
- p_i částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnitřní straně konstrukce (Pa),
- p_e částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnější straně konstrukce (Pa),
- Z_{pi} odpor při přestupu vodní páry na vnitřní straně konstrukce (m/s),
- Z_{px} odpor při přestupu vodní páry od vnitřní strany konstrukce po místo x v konstrukci, kde stanovujeme částečný tlak vodní páry (m/s),
- Z_{pT} odpor při prostupu vodní páry (m/s).



Obr. 43: Schematické znázornění prostupu vodních par konstrukcí v závislosti na difúzních odporech

Jak již bylo zmíněno, průběh parciálních tlaků vodní páry uvnitř konstrukce je důležitý pro stanovení případné kondenzace v konstrukci. Ke kondenzaci vodních par v konstrukci dochází v případě, že je částečný tlak vodních par v kterémkoliv místě konstrukce vyšší nebo roven částečnému tlaku nasycené vodní páry, tedy pokud platí podmínka:

$$p_x \geq p_{sat,x}, \quad (54)$$

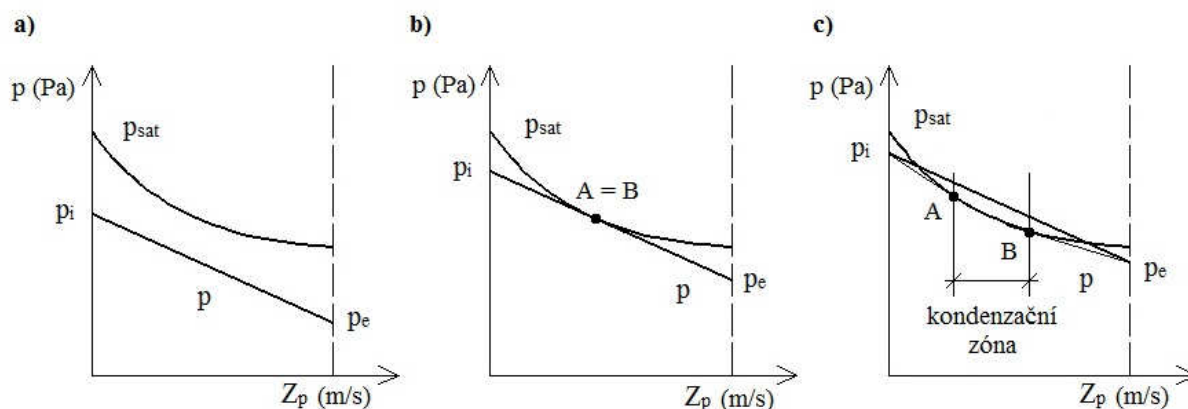
kde je

p_x částečný tlak vodní páry v místě x konstrukce (Pa),

$p_{sat,x}$ částečný tlak nasycené vodní páry v místě x konstrukce (Pa).

Ke zjišťování případné kondenzace v konstrukci se standardně používá výpočetní technika, přestože je možný také ruční výpočet, ten je však časově velmi náročný. V zásadě mohou nastat tři stavy, které jsou patrné z Obr. 44:

- a) ke kondenzaci v konstrukci nedochází,
- b) ke kondenzaci v konstrukci dochází pouze v ploše,
- c) ke kondenzaci v konstrukci dochází v kondenzační zóně.



Obr. 44: Zjištění výskytu kondenzace vodní páry v konstrukci

Množství zkondenzované vodní páry v konstrukci, které je důležité pro vyhodnocení požadavku ČSN 73 0540-2 [8] „šíření vlhkosti konstrukcí“ viz kapitola 2.1.1. , lze stanovit jako rozdíl difúzních toků mezi místy A a B dle vztahu (55).

$$\Delta g = g_a - g_b, \quad (55)$$

kde je

g_a hustota difúzního toku vodní páry do místa A ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) dle vztahu (56),

g_b hustota difúzního toku vodní páry z místa B ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) dle vztahu (57).

$$g_a = \frac{(p_i - p_A)}{Z_A}, \quad (56)$$

$$g_b = \frac{(p_B - p_e)}{Z_B}, \quad (57)$$

kde je

- p_i částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnitřní straně konstrukce (Pa),
- p_e částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnější straně konstrukce (Pa),
- p_A, p_B částečný tlak vodní páry v místě A, resp. B, konstrukce (Pa),
- Z_A difúzní odpor konstrukce od vnitřního povrchu konstrukce po bod A (m/s),
- Z_B difúzní odpor konstrukce od bodu B po vnější povrch konstrukce (m/s).

4.2.3. Analytické metody výpočtu větraných vzduchových vrstev

Na rozdíl od uzavřených vzduchových mezer, jsou větrané vzduchové mezery propojené s vnějším vzduchem a uvnitř dochází k proudění vzduchu, což je také základním předpokladem jejich správné funkce. Tepelný odpor větrané vzduchové mezery je proto podstatně menší než v případě uzavřených vzduchových mezer. Proudění vzduchu uvnitř větrané vzduchové mezery je způsobeno:

- tlakovým spádem na základě rozdílných hustot vzduchu (pro svislé a šikmé vrstvy),
- přeměnou pohybové energie na tlakovou (pro vodorovné vrstvy).

Při běžných tepelně-technických výpočtech se tepelný odpor větraných vzduchových vrstev zanedbává. Výpočty se provádějí pouze pro část konstrukce vnitřního pláště bez vzduchové mezery a vnějšího pláště. Vliv větrané vzduchové mezery na hodnocenou konstrukci se zohledňuje pouze pomocí tepelného odporu při přechodu tepla na vnější straně konstrukce, kdy se tento uvažuje roven tepelnému odporu při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce, tedy $R_{se} = R_{si}$. Pomocí analytických metod výpočtů je však možné určit tepelný odpor větrané vzduchové mezery, tepelný tok a také průběh teplot uvnitř mezery. Tento výpočet je pro stavební praxi důležitý především z důvodu posuzování větrané vzduchové mezery z hlediska kondenzace vodní páry, ke které nesmí uvnitř vzduchové mezery docházet. Vodní páry, které do vzduchové mezery vstupují z vnitřního prostředí přes vnitřní plášť konstrukce, musí být spolehlivě větranou vzduchovou mezerou odvedeny do venkovního prostředí.

Analytický způsob výpočtu větraných vzduchových mezer uvádí ČSN 73 0540-4 [11]. Hlavní nevýhodou tohoto výpočtu je fakt, že uvažuje větrací otvory pouze ze dvou stran konstrukce – tento způsob výpočtu je tedy vhodný pouze pro střešní dvouplášťové konstrukce a pro větrané obvodové stěny, kde vnější plášť tvoří kompaktní povrch. V následujících odstavcích je popsán základní princip tohoto výpočtu, jehož se využívá při tepelně-technickém hodnocení konstrukcí s větranou vzduchovou mezerou pro účely vyloučení poruch. K výpočtu lze použít např. program MEZERA 2015 [51] z balíčku tepelně-technických programů “Svoboda software”.

Průběh teplot uvnitř větrané vzduchové mezery souvisí s problematikou tepelných toků v dvouplášťové konstrukci. Tepelný tok z vnitřního prostředí lze v rámci dvouplášťové konstrukce rozdělit na:

- Q_1 (W), což je tepelný tok, který se šíří z vnitřního prostředí do větrané vzduchové mezery a stanoví se dle vztahu (58),
- Q_2 (W), což je tepelný tok, který se šíří z větrané vzduchové mezery do venkovního prostředí a stanoví se dle vztahu (59),
- Q_3 (W), což je tepelný tok potřebný ke změně teploty vzduchu uvnitř větrané vzduchové mezery a stanoví se dle vztahu (60).

$$Q_1 = U_i \cdot (\theta_i - \theta_x) dx, \quad (58)$$

$$Q_2 = U_e \cdot (\theta_x - \theta_e) dx, \quad (59)$$

$$Q_3 = G_m \cdot c \cdot dt = (d_{cav} \cdot v_{cav} \cdot \rho_{cav}) \cdot c \cdot dt, \quad (60)$$

kde je

- U_i součinitel prostupu tepla vnitřního pláště (W/(m² · K)),
- U_e součinitel prostupu tepla vnějšího pláště (W/(m² · K)),
- θ_i teplota vnitřního vzduchu (°C),
- θ_e teplota vnějšího vzduchu (°C),
- θ_x teplota ve vzdálenosti x od počátku vzduchové mezery (°C),
- dx přírůstek po délce vzduchové mezery (m),
- dt přírůstek teploty, o němž se mění teplota v daném místě mezery (°C),
- G_m hmotnostní tok vzduchu na 1 m šířky vzduchové mezery (kg/(m · s)),
- c měrná tepelná kapacita (J/(kg · K)),
- d_{cav} tloušťka vzduchové mezery (m),
- v_{cav} rychlost proudění vzduchu uvnitř větrané vzduchové mezery (m/s),
- ρ_{cav} objemová hmotnost vzduchu (kg/m³).

Při předpokladu zachování rovnováhy tepelných toků, tedy $Q_3 = Q_1 - Q_2$, a po provedení matematických úprav lze odvodit vztah (61) pro výpočet teploty vzduchu v kterémkoliv místě uvnitř větrané vzduchové mezery θ_x .

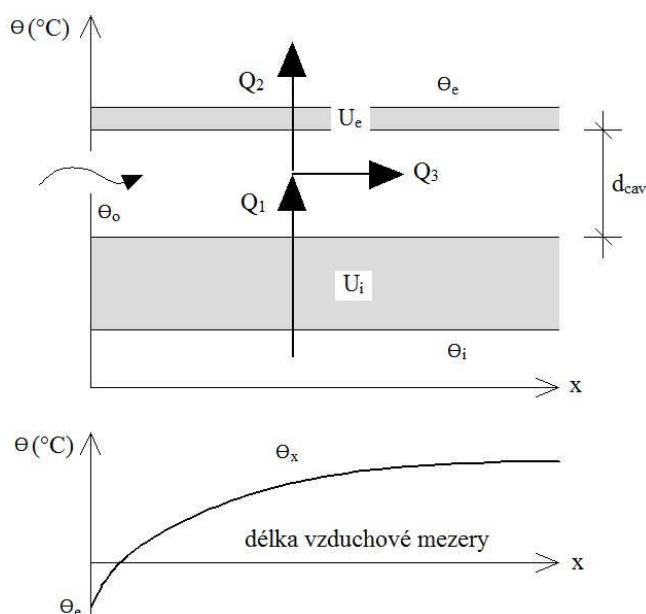
$$\theta_x = \theta_{cav} + (\theta_e - \theta_{cav}) / \exp\left(x \frac{U_i + U_e}{1300 \cdot d_{cav} \cdot v_{cav}}\right), \quad (61)$$

kde
$$\theta_{cav} = \frac{U_i \cdot \theta_{ai} + U_e \cdot \theta_e}{U_i + U_e}, \quad (62)$$

kde je

- θ_{cav} teplota na konci vzduchové mezery (°C),
- x vzdálenost od počátku vzduchové mezery (m).

Schéma k výpočtu průběhu teplot uvnitř vzduchové mezery odvozené na základě vztahu (61) je patrné z Obr. 45. Je zřejmé, že se vzdáleností od vstupního otvoru dochází postupně k exponencionálnímu nárůstu teploty uvnitř vzduchové mezery. Nejvyšší teploty vzduchu je tedy dosaženo na konci vzduchové mezery. Teplota uvnitř vzduchové mezery závisí především na rychlosti proudění vzduchu uvnitř mezery a na tepelně-technických vlastnostech vnitřního i vnějšího pláště provětrávané konstrukce. Rychlost proudění vzduchu uvnitř mezery závisí na plochách průřezů větracích otvorů, délce vzduchové mezery, na aerodynamických vlastnostech mezery a samozřejmě také na rychlosti větru v exteriéru. Pro běžné případy se stanovuje pouze přibližnými metodami na základě ploch průřezů otvorů a rychlosti venkovního vzduchu. Pro přesnější posouzení lze využít také sofistikovanějších výpočtů. Bližší rozbor metod výpočtu však není předmětem této disertační práce.



Obr. 45: Schéma větrané vzduchové mezery vč. průběhu teplot

4.2.4. Vyhodnocení výsledků teoretických výpočtů analytickými metodami

Předmětem této kapitoly je vyhodnocení výsledků analytických výpočtů vedení tepla a vodních par za stacionárních okrajových podmínek. Pro účely těchto výpočtů byl použitý program TEPLO 2015 [52]. Pro výpočet byly použity okrajové podmínky III. typu Newtonovy, které jsou definovány tepelně-technickými normami [49, 50] a jsou standardně používané pro tepelně-technické výpočty ve stavební praxi. Použité okrajové podmínky pro výpočet jsou uvedeny v Tab. 6. Vnitřní okrajové podmínky byly zvoleny typické pro prostory obytných budov – obytné místnosti. Vnější zimní okrajové podmínky byly zvoleny pro Ostravu, což odpovídá umístění experimentální budovy.

Tab. 6: Okrajové podmínky použité pro stacionární výpočet vedení tepla a vodních par

| Povrch stavební konstrukce | | Vnitřní | Vnější |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Návrhová relativní vlhkost vzduchu | | 50 + 5 % | 84 % |
| Teplota | Pro výpočty povrchových teplot a šíření vlhkosti | $\theta_{ai} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\theta_i = -15 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | Pro výpočty šíření tepla | $\theta_i = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ | |
| Odpor při přestupu tepla R_{si}, R_{se} ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) | Pro výpočty povrchových teplot a šíření vlhkosti | 0,25 | 0,04* |
| | Pro výpočty šíření tepla | 0,13 (stěna) | |
| | | 0,10 (střecha) | |
| Součinitel přestupu tepla h_{si}, h_{se} ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) | Pro výpočty povrchových teplot a šíření vlhkosti | 4 | 25* |
| | Pro výpočty šíření tepla | 7,7 (stěna) | |
| | | 10 (střecha) | |

*Ve větrané vzduchové mezeře je uvažováno dle ČSN 73 0540-3 [50] shodné jako na vnitřní straně konstrukce

Analytické výpočty byly modelovány tyto konstrukce:

- A) Obvodová stěna s kontaktním zateplením
- B) Obvodová stěna s provětrávanou fasádou
- C) Střecha

Tepelně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

Disertační práce

Tepelně-technické parametry materiálů, použitých ve skladbách hodnocených konstrukcí jsou uvedeny v Tab. 7 a 8. Pro teoretickou analýzu bylo při výpočtech uvažováno s návrhovými parametry těchto veličin.

Tab. 7: Materiálové charakteristiky – obvodová stěna

| Materiál | | Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti λ_d [W/(m·K)] | Objemová hmotnost ρ [kg/m ³] | Měrná tepelná kapacita c [J/(kg·K)] | Faktor difúzního odporu μ [-] | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|-----|
| 1. | Sádrovláknitá deska Fermacell | 0,320 | 1250 | 1000 | 13 | |
| 2. | Tepelná izolace mezi sloupky | Steico Flex | 0,038 | 50 | 2100 | 2 |
| | | Dřevěné sloupky (60 x 60 mm) | 0,180 | 400 | 2510 | 157 |
| 3. | Sádrovláknitá deska Fermacell Vapor | 0,320 | 1250 | 1000 | 200 | |
| 4. | Tepelná izolace mezi nosníky Steico Wall SW90 | Steico Flex | 0,038 | 50 | 2100 | 2 |
| | | Stojina (6 x 240 mm): dřevovláknitá deska | 0,130 | 650 | 1700 | 50 |
| | | Pásnice (90 x 45 mm): Lepené dřevo | 0,180 | 400 | 2510 | 157 |
| 5. | Sádrovláknitá deska Fermacell | 0,320 | 1250 | 1000 | 13 | |
| - | a) Obvodová stěna s kontaktním zateplením | | | | | |
| 6. | Tepelná izolace Steico Therm | 0,039 | 160 | 2100 | 5 | |
| 7. | Tepelná izolace Steico Protect | 0,048 | 265 | 2100 | 5 | |
| 8. | Tenkvrstvá omítka Baumit | 0,800 | 1800 | 850 | 12 | |
| - | b) Obvodová stěna s provětrávanou fasádou (dřevěný obklad, obklad z Cetrís desek) | | | | | |
| 6. | Tepelná izolace Steico Special | 0,046 | 240 | 2100 | 5 | |
| 7. | Větraná vzduchová mezera | - | - | - | - | |
| 8. | Obklad | - | - | - | - | |

Tab. 8: Materiálové charakteristiky – střecha

| Materiál | | Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti | Objemová hmotnost | Měrná tepelná kapacita | Faktor difuzního odporu | |
|----------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-----|
| | | λ_d [W/(m·K)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·K)] | μ [-] | |
| 1. | Sádrokarton | 0,220 | 800 | 1060 | 2,5 | |
| 2., 3. | Tepelná izolace v SDK roštu | Steico Flex | 0,038 | 50 | 2100 | 2 |
| | | Dřevěný rošt | 0,180 | 400 | 2510 | 157 |
| 4. | Sádrovláknitá deska Fermacell Vapor | 0,320 | 1250 | 1000 | 200 | |
| 5. | Tepelná izolace mezi nosníky Steico Joist SJ60 | Steico Flex | 0,038 | 50 | 2100 | 2 |
| | | Stojina (8 x 180 mm): dřevovláknitá deska | 0,130 | 650 | 1700 | 50 |
| | | Pásnice (60 x 45 mm): Lepené dřevo | 0,180 | 400 | 2510 | 157 |
| 6. | Tepelná izolace Steico Therm | 0,039 | 160 | 2100 | 5 | |
| 7. | Tepelná izolace Steico Universal | 0,048 | 270 | 2100 | 5 | |
| 8. | Větrotěsná pojistná folie | - | - | - | - | |
| 10. | Větraná vzduchová mezera (latě + kontralatě) | - | - | - | - | |
| 8. | Střešní krytina | - | - | - | - | |

Pro všechny uvedené konstrukce byl proveden výpočet vnitřních povrchových teplot, pomocí kterých se hodnotí plnění požadavku [8] na nejnižší vnitřní povrchovou teplotu a které ve své podstatě zároveň charakterizují tepelně-izolační vlastnosti konstrukcí. Zde je nutno uvést, že použití analytických metod výpočtu vnitřních povrchových teplot pro nehomogenní konstrukce však není zcela správné. Pomocí analytického výpočtu není možné stanovit přesně teploty na povrchu v daných místech konstrukce. Proto je pro posouzení požadavku na nejnižší vnitřní povrchovou teplotu vždy nutné provádět výpočet pomocí numerických metod a stanovit tedy nejnižší vnitřní povrchovou teplotu, která se bude nacházet v místě tepelného mostu. Analytické metody výpočtu povrchových teplot lze použít pouze pro orientační stanovení tzv. průměrné vnitřní povrchové teploty. Zároveň byl proveden výpočet částečných tlaků vodní páry uvnitř hodnocených konstrukcí za účelem posouzení případného rizika kondenzace uvnitř skladby konstrukcí. Stejně jako v případě hodnocení vnitřních povrchových teplot nelze výsledkem analytických výpočtů pro nehomogenní konstrukce deklarovat vyloučení vzniku kondenzace uvnitř konstrukce. Nejslabším místem je ve většině případů místo tepelného mostu a je tedy vhodné posoudit konstrukci pomocí numerických metod

a vyloučit riziko kondenzace v těchto místech. Na základě výsledků výpočtu analytickými metodami však v hodnocených konstrukcích ke kondenzaci nedochází.

V následující Tab. 9 jsou uvedeny výsledky výpočtů průměrných vnitřních povrchových teplot pro jednotlivé konstrukce a také orientačně uvádím výsledky výpočtu pro fiktivní řezy místem tepelného mostu a v ose mimo tepelný most. Jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, nejedná se o vhodnou metodu výpočtů a především v případě, kdy tepelné mosty nejsou eliminovány, by byly výsledky výrazně odlišné v porovnání se skutečným stavem.

Tab. 9: Výsledky tepelně-technických výpočtů analytickými metodami

| Ozn. | Součinitel prostupu tepla konstrukce U ($W/(m^2 \cdot K)$) | | Vnitřní povrchová teplota θ_{si} ($^{\circ}C$) | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | S vlivem tepelného mostu | Bez vlivu tepelného mostu* ¹ | Průměrná p. t. $\theta_{si,m}$ ($^{\circ}C$) S vlivem tepelného mostu | V místě tepelného mostu* ² | V ose mimo tepelný most* ² |
| A | 0,088 | 0,082 | 19,2 | 18,5 | 19,3 |
| B | 0,096 | 0,089 | 19,2 | 18,2 | 19,2 |
| C | 0,090 | 0,086 | 19,2 | 18,8 | 19,3 |

*¹ Hodnoty součinitele prostupu tepla jsou stanoveny pro ideální výsek konstrukce. Tento postup je uveden pouze pro účely posouzení vlivu tepelného mostu na tepelně-technické vlastnosti konstrukcí. Nejedná se však o korektní způsob výpočtu součinitele prostupu tepla nehomogenní konstrukce a nelze jím deklarovat tepelně-technické vlastnosti konstrukce.

*² Hodnoty jsou uvedeny pouze pro ilustraci. Tento způsob stanovení povrchových teplot v rámci jednotlivých průřezů není z tepelně-technického hlediska korektní.

Součinitelé prostupu tepla vykazují výborné tepelně-izolační vlastnosti. Lehké obvodové konstrukce, které tvoří hranici obálky experimentální budovy na kontaktu s vnějším vzduchem vykazují hodnoty součinitele prostupu tepla nižší než $0,10 W/(m^2 \cdot K)$, přičemž dle ČSN 73 0540-2 [8] jsou doporučené hodnoty pro pasivní budovy v rozmezí $0,18 - 0,12 W/(m^2 \cdot K)$ pro střechy a $0,15-0,10 W/(m^2 \cdot K)$ pro stěny. V současnosti se nejedná o hodnoty, kterých by bylo běžně dosaženo při navrhování obvodových konstrukcí novostaveb. V souladu se zvyšujícími se nároky na energetickou náročnost budov a osvětou investorů lze ovšem předpokládat, že se stanou konstrukce s takto vysokým tepelným odporem běžným standardem. S tím úzce souvisí zvyšování procentuálního podílu dřevostaveb na trhu, jelikož jsou tyto stavební systémy vhodné z hlediska dosažení minimální tloušťky konstrukcí při zachování výborných tepelně-izolačních vlastností.

4.2.5. Numerické metody

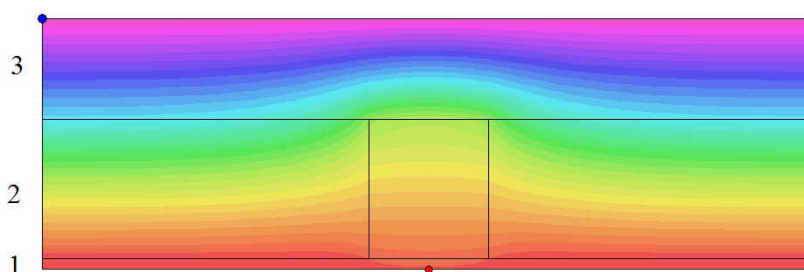
Numerické metody umožňují provádět tepelně-technické úlohy vícerozměrných teplotních polí s vyšší přesností [28] ve srovnání s přibližnými analytickými výpočty, které tyto úlohy zjednodušují na jednorozměrné vedení tepla, jak je blíže uvedeno v předchozí kapitole. Tepelně-technické výpočty se v tomto případě provádějí tzv. **metodou teplotních polí**, která mohou být plošná nebo prostorová.

- **Plošné teplotní pole** je takové, ve kterém se teplota mění pouze ve směru osy x a y, tedy dochází k dvourozměrnému šíření tepla (do numerického výpočtu vstupuje 2D model).
- **Prostorové teplotní pole** je takové, ve kterém se teplota mění ve směru osy x, y a z, tedy dochází k trojrozměrnému šíření tepla (do numerického výpočtu vstupuje 3D model).

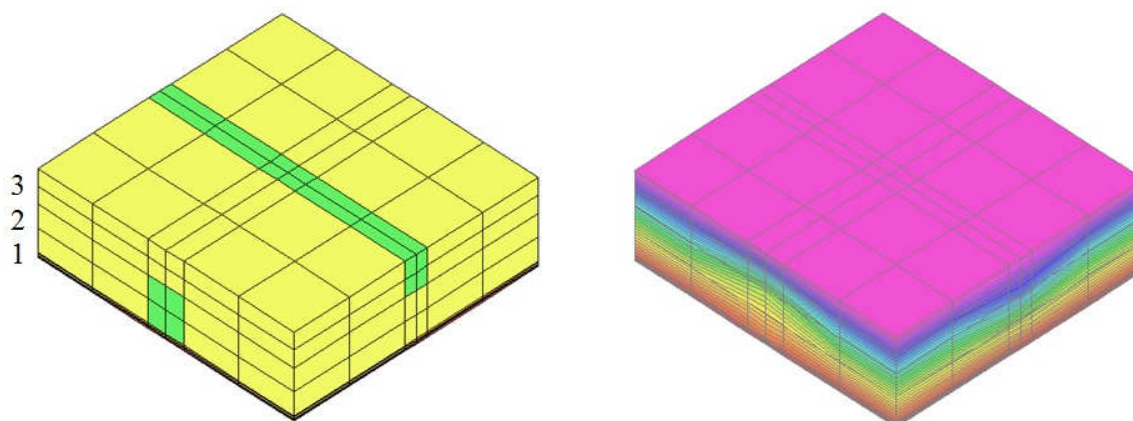
Pro ilustraci plošného a prostorového teplotního pole uvádím Obr. 46 a 47, 2D a 3D teplotní pole střešní konstrukce ve skladbě:

1. Sádrokartonový podhled
2. Tepelná izolace mezi krokviemi
3. Tepelná izolace mezi roštem křížem na krokve.

Jelikož se tepelné mosty nacházejí ve dvou vrstvách, které jsou na sebe kolmé, je nutné v případě výpočtu pomocí dvourozměrného teplotního pole jednu vrstvu zohlednit pouze přibližně pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti této vrstvy (v uvedeném případě vrstva č. 3. Jinak je tomu v případě trojrozměrného teplotního pole, kdy lze zadat obě vrstvy s tepelnými mosty dle skutečné geometrie a tudíž zpřesnit výsledek výpočtu. Jak je však patrné z Obr. 47 dle připraveného trojrozměrného modelu, je postup vytvoření 3D modelu konstrukce v porovnání s dvourozměrným modelem poměrně časově náročný a z toho důvodu nemá pro běžnou praxi příliš využití. Geometrické modely konstrukcí musí být vždy vytvořeny v souladu normou ČSN EN ISO 10211[53].



Obr. 46: výstup ze softwaru AREA 2015 [54]: dvourozměrné teplotní pole



Obr. 47: výstup ze softwaru CUBE 3D [55]: výpočetní model a trojrozměrné teplotní pole

V oblasti stavební tepelné techniky nacházejí numerické metody uplatnění především při hodnocení stavebních detailů, které lze pomocí analytických metod hodnotit pouze s velmi nízkou přesností. Přibližné analytické metody se v praxi často uplatňují při výpočtech tepelně-technických vlastností konstrukcí s vlivem systematických tepelných mostů, konkrétně pro hodnocení součinitele prostupu tepla. Pro hodnocení stavebních detailů, kde vznikají tzv. tepelné vazby, je však nutné aplikovat numerické metody výpočtů. Stejně tak při hodnocení požadavku na splnění nejnižší povrchové teploty konstrukce v případě konstrukcí se systematickými tepelnými mosty, je nutno provést výpočet pomocí numerických metod. V opačném případě, při použití metod analytických, je výstupem pouze tzv. průměrná vnitřní povrchová teplota, kterou nelze deklarovat splnění požadavku, jelikož nejnižší vnitřní povrchovou teplotu je nutné hodnotit v nejkritičtějším místě konstrukce.

Tepelné vazby jsou místa, kde vzniká deformované teplotní pole vlivem styku dvou či více druhů stavebních konstrukcí. Jedná se tedy o rozhraní mezi dvěma či více konstrukcemi, kde je tepelný tok výrazně změněn jejich vzájemným působením [33]. Typickým příkladem může být např. styk obvodové stěny a podlahy či obvodové stěny a střechy v místě atiky. Veřejností a některými přejímanými normami jsou však tepelné vazby mnohdy špatně nazývány tepelnými mosty. Tepelné vazby lze rozdělit na:

- **Lineární** - v jednom směru mají shodné řezy,
- řeší se pomocí dvourozměrného teplotního pole,
- **Bodové** - v žádném směru nejsou shodné řezy,
- řeší se pomocí trojrozměrného teplotního pole.

Tepelně-technické výpočty tepelných vazeb jsou podstatné pro spolehlivé vyhodnocení vnitřních povrchových teplot, které zde mohou být výrazně nižší než v ploše konstrukce a tudíž může v těchto místech docházet k poruchám, ale také pro přesnější stanovení tepelně-technických parametrů obálky budovy a s tím související energetickou náročností budovy. Toto může být zásadní především u budov s velmi nízkou energetickou

náročností, kde jsou tepelné vazby důkladně řešeny a zahrnutí tepelných vazeb paušální přírůžkou pomocí průměrného vlivu tepelných vazeb mezi ochlazovanými konstrukcemi na systémové hranici ΔU_{ibm} může nepříznivě ovlivnit výsledek výpočtu energetické náročnosti budovy.

Výstupem numerických výpočtů je, jak již bylo zmíněno dříve, teplotní pole, které popisuje rozložení teplot v hodnoceném modelu konstrukce. Ty se zjišťují převodem parciálních diferenciálních rovnic, definujících vedení tepla viz kap. 2.3.1. na soustavu lineárních rovnic a jejich následným řešením [33]. Početní řešení je tedy stejně jako v případě analytických metod založeno na zákonu zachování energie, který je aplikován pro tepelně technické jevy jako Fourierův zákon [33]. Mezi numerické metody výpočtů lze zařadit například tyto metody:

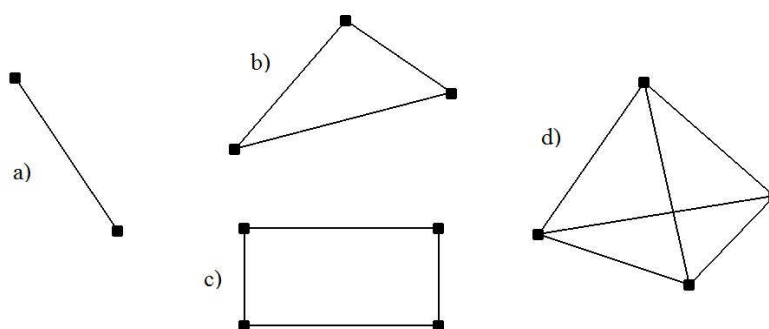
- Metoda konečných prvků (FEM – Finite Elements Method),
- Metoda konečných objemů (FVM – Finite Volume Method),
- Metoda konečných rozdílů (FDM – Finite Difference Method), jinak také metoda sítí,
- Metoda hraničních prvků (BEM – Boundary Elements Method),
- Metoda oddělených elementů (DEM - District Elements Method).

Numerické výpočty, zpracované v této disertační práci, byly provedeny s pomocí výpočtových softwarů na základě řešení teplotního pole metodou konečných prvků [56]. Z toho důvodu jsou následující odstavce věnovány pouze této metodě.

Metoda konečných prvků (FEM)

K zásadnímu rozvoji této iterační metody došlo v souvislosti s rozvojem výpočetní techniky, a maticových metod, které umožnily vytvoření výpočtových systémů. Ty jsou účinným a univerzálním prostředkem pro analýzu konstrukcí [56], zároveň jsou dnes již velmi uživatelsky komfortní.

Jedná se o variační metodu, jejíž základním principem je rozdělení spojitě oblasti do množiny samostatných podoblastí, tzv. **konečných prvků**. Zjišťované parametry jsou pak určovány v jednotlivých uzlových bodech těchto prvků. Konečné prvky lze rozdělit na mnoho typů, základní typy jsou uvedeny v Obr. 48.



Obr. 48: Příklad konečných prvků: a) úsečka (1D), b) trojúhelník (2D), obdélník (2D), čtyřstěn (3D)

Aplikace metody konečných prvků na úlohy šíření tepla

Fyzikální jev ustáleného šíření tepla do výpočtu vstupuje matematicky vyjádřen pro dvourozměrné teplotní pole jako parciální diferenciální rovnice dle vztahu (63), odvozená na základě Fourierova zákona (viz kap. 2.3.1.). Pro tuto diferenciální rovnici zároveň platí okrajová podmínka dle vztahu (64). Vyjádření pro trojrozměrné teplotní pole je analogické.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda(x, y) \left[\frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda(x, y) \left[\frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \right] \right\} = 0, \quad (63)$$

$$-\lambda(x, y) \left[\frac{\partial \theta(x, y)}{\partial n} \right] = h \cdot (\theta - \bar{\theta}), \quad (64)$$

kde je

- (x, y) souřadnice bodu v rovině (m),
- λ součinitel tepelné vodivosti (W/(m.K)),
- θ teplota v bodě (K),
- $\bar{\theta}$ teplota v okolním prostředí (K),
- h součinitel přestupu tepla (W/(m².K)),
- $\partial x, \partial y$ derivace podle x a y,
- ∂n derivace podle normály.

Principem metody je dále převedení parciální diferenciální rovnice na soustavu lineárních algebraických rovnic pro hledané hodnoty potenciálu v uzlových bodech konečných prvků. Jelikož se jedná o iterační metodu, je na začátku výpočtu zvolen nejprve odhad řešení a následně se pomocí postupných iterací (zpřesňování) hledá řešení rovnic. Iterační proces se zastaví v momentě, kdy je dosaženo předem stanovené nepřesnosti, což je rozdíl mezi zjištěnými teplotami daného a předchozího iteračního kola ve všech uzlových bodech. V případě použití výpočtové techniky je možné zvolit velmi nízké hodnoty nepřesnosti a z tohoto důvodu jsou tyto metody někdy nesprávně označovány jako „přesné“. V případě ručního výpočtu by s ohledem na časovou náročnost nebylo možné takové přesnosti výsledků dosáhnout.

Aplikace metody konečných prvků na úlohy šíření vodní páry

Fyzikální jev šíření vodní páry konstrukce je obdobou šíření tepla a z toho důvodu je matematické vyjádření pro dvourozměrné tlakové pole prakticky stejné, pouze jsou uvažovány jiné vstupní veličiny a to součinitel difúze vodní páry namísto součinitele tepelné vodivosti a součinitel přestupu vodní páry namísto součinitele přestupu tepla. Parciální diferenciální rovnice a okrajová podmínka pak jsou:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \delta_p(x, y) \left[\frac{\partial p_v(x, y)}{\partial x} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \delta_p(x, y) \left[\frac{\partial p_v(x, y)}{\partial y} \right] \right\} = 0, \quad (65)$$

$$-\delta_p(x, y) \left[\frac{\partial p_v(x, y)}{\partial n} \right] = h_p \cdot (p_v - \bar{p}_v), \quad (66)$$

kde je

- (x, y) souřadnice bodu v rovině (m),
- δ_p součinitel difúzní vodivosti (s),
- p_v skutečný částečný tlak vodní páry v bodě (Pa),
- \bar{p}_v skutečný částečný tlak vodní páry v okolním prostředí (Pa),
- h_p součinitel přestupu vodní páry (s/m),
- $\partial x, \partial y$ derivace podle x a y,
- ∂n derivace podle normály.

Postup řešení tepelně-technických úloh metodou FEM

Postup řešení metodou FEM lze rozdělit na tři základní fáze a to:

1. **Preprocessing** – příprava modelu, diskretizace,
2. **Processing** – samotný výpočet („solver“),
3. **Postprocessing** – zobrazení výsledků výpočtu.

Preprocessing

- Volba typu konečných prvků

Pro každou úlohu je nutné zvolit typ konečných prvků. Volba typu konečných prvků závisí na typu úlohy (2D a 3D) a řešené úloze. Nesprávná volba typu konečných prvků může u nezkušených uživatelů vést k chybným výsledkům výpočtů či jejich interpretaci. Možnost zadání typu konečných prvků je umožněna pouze v případě univerzálních výpočtových softwarů. U specializovaných softwarů většinou není volba typu konečných prvků umožněna, jelikož je již vhodný typ dán na základě daného výpočtu, který systém umožňuje a pro který je určen.

- Vytvoření geometrie modelu

Zvolený geometrický model hodnoceného detailu stavební konstrukce musí být vytvořen tak, aby co nejlíže odpovídal skutečnosti. V případě tepelně-technických úloh musí geometrický model splňovat parametry dané příslušnou normou [53]. Zadání geometrie modelu je různě časově náročné v závislosti na složitosti detailu a také na zvoleném výpočtovém softwaru.

- Zadání vlastností použitých materiálů
Pro každou oblast geometrického modelu je dále nutné definovat materiálové charakteristiky. Rozsah zadání materiálových charakteristik závisí na požadovaných výstupech výpočtů. Mezi základní fyzikální vyžadované vlastnosti lze zařadit objemovou hmotnost, součinitele tepelné vodivosti, měrnou tepelnou kapacitu, difúzní odpor, součinitel difúzní vodivosti a další.
- Vytvoření sítě konečných prvků „Meshování“
Síť konečných prvků je nutno vytvořit ve dvou krocích a to určení parametry sítě (hustota dělení) a následně provést samotné generování sítě. Geometrie sítě má zásadní vliv na přesnost výsledků výpočtů.
- Zadání okrajových podmínek
Posledním krokem preprocessingu je zadání okrajových podmínek, které mohou být stacionární či nestacionární, pokud to daný software umožňuje. Okrajové podmínky určují tzv. zatěžovací stav. V případě tepelně-technických výpočtů se zadávají okrajové podmínky, které na konstrukci působí většinou na její vnější a vnitřní straně. V případě některých výpočtových programů je nutné také zadání adiabatické okrajové podmínky, tedy v té části geometrického modelu, kde nedochází k výměně tepla či vodních par.

Processing

V této fázi proběhne samotný výpočet soustavy lineárních algebraických rovnic a jsou určeny zjišťované parametry v uzlových bodech s předem danou přesností.

Postprocessing

V této fázi jsou načteny výsledky výpočtu pro jejich následné vyhodnocení. Výpočtové programy obvykle poskytují grafické výstupy výsledků výpočtu, v tomto případě teplotní a vlhkostní pole. Pro výpočty nestacionárního vedení tepla, resp. vlhkosti, jsou pak výstupem animace teplotních (resp. vlhkostních) polí.

K tepelně-technickým výpočtům nehomogenních konstrukcí byly v rámci této disertační práce použity tyto softwary, pracující s metodou FEM:

Area 2015 [54]:

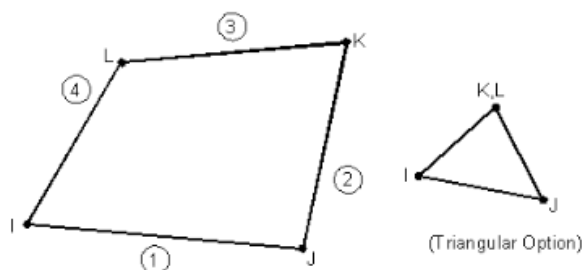
Software je určen pouze pro tepelně-technické výpočty. Zadání geometrického modelu v rámci grafického editoru je poměrně nenáročné a intuitivní. Vytvoření vstupních dat není ve srovnání s ostatními použitými softwary časově náročné. Z tohoto pohledu se jedná o program, který je vhodný pro použití odbornou veřejností. Jako konečný prvek je pro tento software použitý rovinný trojúhelník. Hlavní nevýhodou tohoto softwaru

je skutečnost, že je možný pouze výpočet stacionárního vedení tepla a vodních par a tudíž není vhodný pro porovnání výsledků výpočtu s výsledky experimentální analýzy. Pro praktické využití a posouzení tepelně-technických parametrů stavebních konstrukcí jsou však výsledky dostačující.

Ansys R16.0 [57]:

Jedná se o velmi komplexní software, který je určen pro analýzu konstrukcí. Program je vyvíjen již od roku 1970 a dnes je instalován a využíván v tisících firem a univerzitních pracovištích [56]. Program je velice rozsáhlý a je možné pomocí něj řešit spoustu úloh z oblasti fyziky, mechaniky, dynamiky a mnoha dalších. Uplatnění nachází například také v oblasti biomechaniky při návrhu komponent. Jelikož se jedná o univerzální program, je nutné, aby byl jeho uživatel zkušený. Pro úlohy běžné tepelně-technické praxe je právě z tohoto důvodu nevhodný.

V případě tohoto programu je možné volit z velkého množství konečných prvků dle typu řešené úlohy. Pro dvourozměrné tepelně-technické úlohy je určen prvek Plane 55 (Thermal Solid). Tvorba geometrického modelu posuzovaného detailu je v případě složitějších detailů poměrně časově náročná, jelikož se provádí zadáním souřadnic bodů, kterých může být pro složitější detaily velké množství. V případě velmi složitých 2D a 3D geometrických modelů však lze využít možnosti importu modelu z jiných vhodných softwarů. Na rozdíl od předchozího softwaru však umožňuje výpočet za nestacionárních okrajových podmínek a je tedy možné následné porovnání výsledků výpočtu s měřeními daty.



Obr. 49: Rovinný element Plane 55

Wufi 2D [58]:

Jedná se o specializovaný software pro dynamické modelování dvourozměrného šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích. Program je určen výzkumným pracovníkům a také specialistům na stavební fyziku – tepelnou techniku. Program Wufi 2D [58] byl vyvinut na základě disertační práce H. M. Künzela [59] v roce 1995. Numerický výpočetní model splňuje požadavky normy ČSN EN 15026 [60]. V současné době je vyvíjen ve Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) v Německu [61]. Program využívá unikátně vyvinutých diferenciálních rovnic, které zahrnují další fyzikální jevy jako např. orientaci konstrukce ke světovým stranám, sklon vůči horizontální rovině, vliv barvy povrchu stavební konstrukce a mnoho dalších. Program je určen pro analýzu stavebních

konstrukcí za nestacionárních okrajových podmínek, kdy lze využít databázi okrajových podmínek pro různá místa na celém světě a umožňuje také zadat své vlastní vnější a vnitřní okrajové podmínky.

Grafické prostředí programu je velmi dobře přizpůsobené uživatelům, vytvoření geometrického modelu je v porovnání se zadáním v programu Ansys R16.0 [57] poměrně rychlé. Avšak pro běžnou stavební praxi je však program poněkud komplikovaný s ohledem na množství parametrů, které jsou ve výpočtu zohledněny. Výpočet tepelně-vlhkostních dějů je v tomto případě velmi sofistikovaný a proto se hodí pro použití spíše ve vědní sféře.

Postup řešení nestacionárních úloh

Výstupem nestacionárních úloh vedení tepla je rozložení teplot v konstrukci v průběhu času při zohlednění proměnných okrajových podmínek, které na konstrukci během analyzovaného období působí. Na rozdíl od stacionárních úloh je rozložení teplot v konstrukci v každém kroku výpočtu závislé na rozložení teplot v konstrukci v kroku předešlém. Základní fyzikální veličinou, charakterizující materiály skladby konstrukce, je součinitel tepelné vodivosti λ . Rozložení teplot v konstrukci je pak lineární v závislosti na tepelném odporu konstrukci R . Takového stavu rozložení teplot v konstrukci by bylo možné dosáhnout pouze při dlouhodobém zatížení konstrukce konstantními okrajovými podmínkami, kdy by došlo k ustálení teplotního stavu v konstrukci. Takový stav však reálně ve stavebních konstrukcích nikdy nenastane.

Při nestacionárních úlohách je dle druhého Fouriérova zákona fyzikální veličinou, která ovlivňuje rozložení teplot v konstrukci při působení proměnných okrajových podmínek, tzv. součinitel teplotní vodivosti a , jenž lze stanovit dle vztahu (16). Tato veličina vyjadřuje rychlost vyrovnávání teplot v látkách a závisí na součiniteli tepelné vodivosti λ , objemové hmotnosti ρ a měrné tepelné kapacitě c látky. Při vytvoření výpočetního modelu pro nestacionární úlohy vedení tepla je tedy kromě samotné geometrie nutné zadat také tyto fyzikální vlastnosti materiálů. Při nestacionárních výpočtech je tedy nutné definovat tyto materiálové charakteristiky, proměnné okrajové podmínky v závislosti na čase a také počáteční stav rozložení teplot v konstrukci. Ten zásadním způsobem ovlivňuje výsledky samotného výpočtu. Při dlouhodobých analýzách konstrukcí, např. roční hodnocení konstrukcí, které lze provádět např. pomocí programu WUFI 2D [58], je možné zadat počáteční stav jako konstantní rozložení teplot shodné s teplotou okolí. Při krátkodobých analýzách, jako jsou například laboratorní měření, je však nutné počáteční rozložení teplot v konstrukci stanovit co nejbližší skutečnosti. To lze provést stanovením teplotního pole pomocí stacionárního výpočtu se zadáním okrajových podmínek tak, aby výsledné pole teplot co nejbližší odpovídalo skutečnému rozložení teplot v konstrukci na počátku nestacionární simulace.

4.2.6. Vyhodnocení výsledků teoretických výpočtů numerickými metodami pro stacionární okrajové podmínky

Předmětem této kapitoly je vyhodnocení výsledků numerických výpočtů vedení tepla za stacionárních okrajových podmínek. Pro účely těchto výpočtů byly použity softwary Area 2015 [54], Ansys R16.0 [57] a WUFI 2D [58]. Pro výpočet byly použity okrajové podmínky III. typu Newtonovy, stejně jako v případě analytických výpočtů viz kap. 4.2.4. Použité okrajové podmínky pro výpočet jsou uvedeny v Tab. 5. Jelikož je software WUFI 2D [58] primárně určen k hodnocení konstrukcí za nestacionárních okrajových podmínek, pro možnost porovnání bylo nutné provést zadání konstantních okrajových podmínek a následně po dostatečném časovém kroku model vyhodnotit. Na počátku simulace je nutno zadat počáteční rozložení teplot v detailu a následně nechat na konstrukci působit daný zatěžovací stav. Jako počáteční rozložení teplot v detailu bylo zvoleno 20 °C, následně byly sledovány změny teplot způsobené zatěžovacím stavem a v momentě, kdy došlo k vyrovnání teplot a jejich průběh již zůstal konstantní, bylo teplotní pole vyhodnoceno jako stacionární.

V rámci numerických výpočtů byly modelovány tyto stavební detaily:

- A) Obvodová stěna s kontaktním zateplením (charakteristický výsek konstrukce)
- B) Obvodová stěna s provětrávanou fasádou (charakteristický výsek konstrukce)
- C) Střecha (charakteristický výsek konstrukce)
- D) Kout – obvodová stěna s provětrávanou fasádou

Pro všechny uvedené detaily byl proveden výpočet vnitřních povrchových teplot, výpočet šíření tepla pro stanovení průběhu teplot uvnitř stavebních konstrukcí a výpočet částečných tlaků vodní páry uvnitř hodnocených konstrukcí. Výpočet částečných tlaků vodních par byl proveden pouze pomocí programu AREA 2015 [54] za účelem posouzení případného rizika kondenzace uvnitř skladby konstrukcí.

V následující Tab. 10 jsou uvedeny výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot pro jednotlivé stavební detaily. Uvádím zároveň výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot analytickými metodami pomocí programu TEPLA 2015 [52] pro účely porovnání s výsledky numerických výpočtů. Pro názornost jsou výsledky numerických výpočtů patrné také z následujících Obr. 50 - 53. Povrchové teploty byly hodnoceny vždy v těchto místech konstrukcí:

- mimo tepelný most v ose konstrukce
- v místě tepelného mostu
- pro detail D v místě koutu

Tab. 10: Výsledky výpočtu vnitřních povrchových teplot

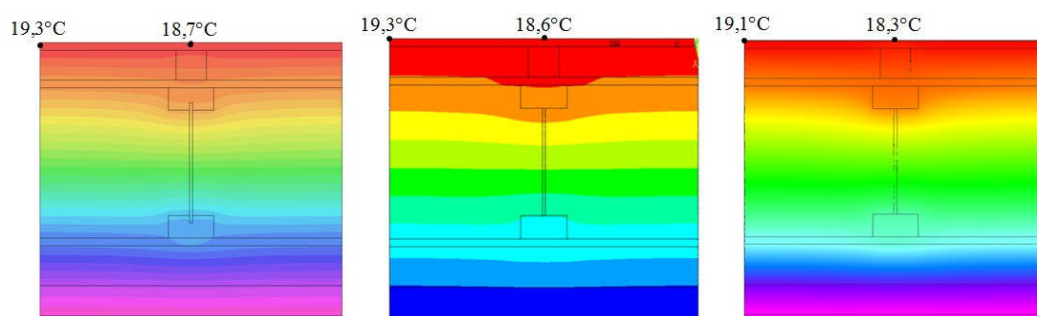
| Detail | Vypočteno v programu | Vnitřní povrchová teplota θ_{si} (°C) | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| | | V místě tepelného mostu | V ose mimo tepelný most |
| A | AREA 2015 | 18,7 | 19,3 |
| | ANSYS R16.0 | 18,6 | 19,3 |
| | WUFI 2D | 18,3 | 19,1 |
| | TEPLO 2015 (řezy danými místy ^{*1}) | 18,5 | 19,3 |
| | TEPLO 2015 (tepelné mosty zahrnuté pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti ^{*2}) | 19,2 | |
| B | AREA 2015 | 18,6 | 19,6 |
| | ANSYS R16.0 | 18,7 | 19,3 |
| | WUFI 2D | 18,2 | 19,0 |
| | TEPLO 2015 (řezy danými místy) | 18,2 | 19,2 |
| | TEPLO 2015 (tepelné mosty zahrnuté pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti) | 19,2 | |
| C | AREA 2015 | 19,2 | 19,3 |
| | ANSYS R16.0 | 19,2 | 19,3 |
| | WUFI 2D | 19,0 | 19,0 |
| | TEPLO 2015 (řezy danými místy) | 18,8 | 19,3 |
| | TEPLO 2015 (tepelné mosty zahrnuté pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti) | 19,2 | |
| D | | V místě koutu | |
| | AREA 2015 | 16,4 | |
| | ANSYS R16.0 | 16,4 | |
| | WUFI 2D | 15,8 | |
| | TEPLO 2015 (analyticky) | - | |

^{*1} Teploty jsou stanovené pro řez daným místem v konstrukci. Tento způsob výpočtu je zde uveden pouze pro ilustraci. Z tepelně-technického hlediska se nejedná o korektní postup výpočtu.

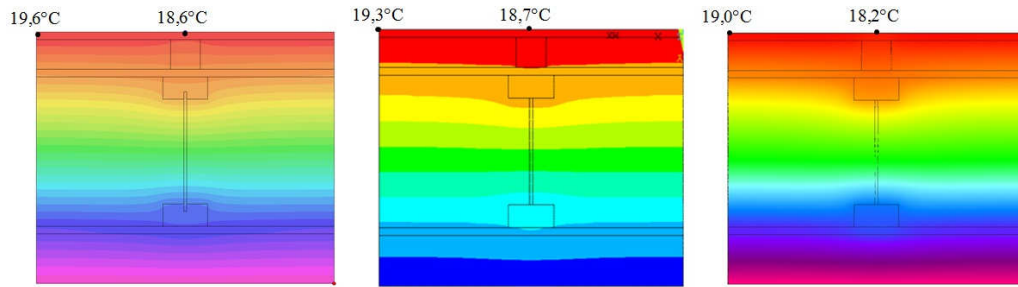
*² Teploty stanovené analytickou metodou pomocí programu TEPLLO 2015 [52] jsou vypočteny se zahrnutím tepelných mostů pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti nehomogenní vrstvy viz kap. 4.2.1. Jedná se o tzv. průměrnou vnitřní povrchovou teplotu $\theta_{si,m}$, kterou nelze použít pro účely hodnocení nejnižší vnitřní povrchové teploty $\theta_{si,min}$.

Z uvedených výsledků výpočtů vnitřních povrchových teplot je zřejmé, že při použití různých metod tepelně-technických výpočtů (numerické vs. analytické) pro posouzení konstrukcí s vlivem tepelných mostů je dosaženo velmi malých odchylek ve výsledcích, rozdíly jsou řádově pouze v desetínách °C. Přesnost výpočtů pro účely posuzování stavebních konstrukcí v běžné technické praxi je tedy dostatečná. Nepatrné rozdíly ve výsledcích výpočtů numerickými metodami pomocí programů AREA 2015 [54] a ANSYS R16.0 [57] jsou dány rozdílnou volbou rovinných elementů, pro program AREA 2015 [54] je plošným elementem trojúhelník, v případě programu ANSYS R16.0 [57] byl zvolen čtyřúhelníkový rovinný element Plane 55, což vede k vyšší přesnosti výpočtu. Výsledky výpočtu programem WUFI 2D vykazují větší odchylku, vnitřní povrchové teploty jsou v porovnání s ostatními výpočty znatelně nižší. V tomto případě je však nutno upozornit, že se jedná o specializovaný software pro dynamické modelování stavebních konstrukcí a probíhá na základě odlišného výpočetního modelu [59].

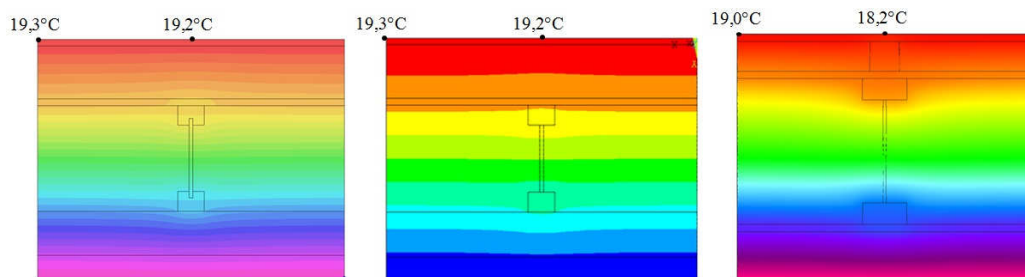
Dále byla ověřena možnost výpočtu analytickými metodami za využití přibližné metody výpočtu konstrukcí s nehomogenními vrstvami, které byly do výpočtu zahrnuty pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti nehomogenních vrstev. Vypočtenou teplotu však lze považovat pouze za průměrnou vnitřní teplotu a nelze pomocí této teploty deklarovat splnění požadavku na nejnižší vnitřní teplotu. Ve všech případech leží takto vypočtená vnitřní povrchová teplota mezi hodnotami vnitřních povrchových teplot určených numerickými metodami pro místo tepelného mostu a mimo tepelný most, což odpovídá předpokladu. Tím je potvrzena správnost numerických metod výpočtů, které na rozdíl od analytických metod, myšleno pro výpočty jednorozměrného vedení tepla, nelze z matematického hlediska považovat za metody, vedoucí k exaktním výsledkům.



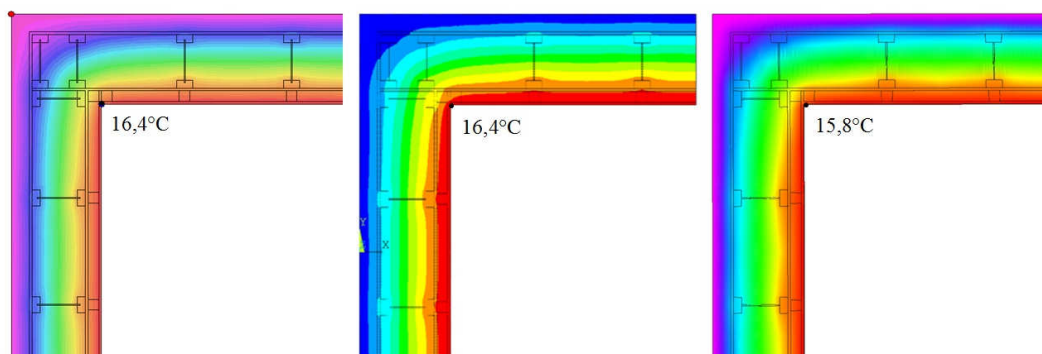
Obr. 50: Obvodová stěna s kontaktním zateplením (A) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D)



Obr. 51: Obvodová stěna s provětrávanou fasádou (B) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D)



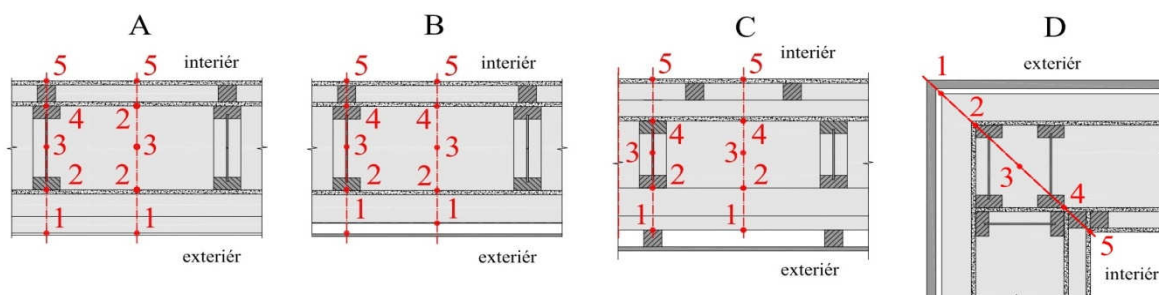
Obr. 52: Střecha (C) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D)



Obr. 53: Kout obvodové stěny s provětrávanou fasádou (D) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D)

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky výpočtů průběhů teplot pro jednotlivé stavební detaily. Pozice hodnocených bodů jsou patrné z Obr. 54. Průběhy teplot byly stejně jako povrchové teploty stanoveny v těchto místech konstrukcí:

- mimo tepelný most v ose konstrukce
- v místě tepelného mostu
- pro detail D v místě koutu



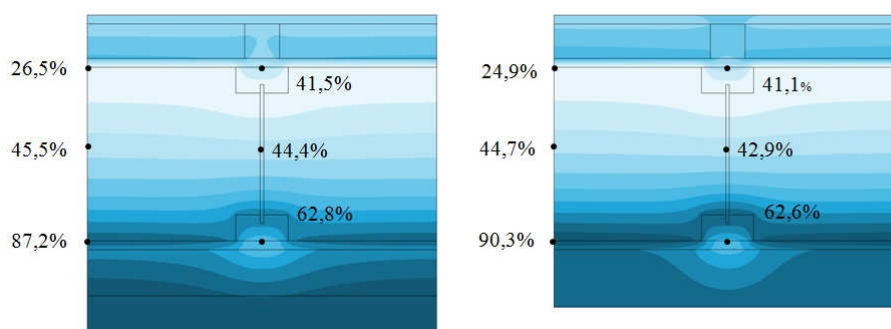
Obr. 54: Hodnocené detaily s vyznačením pozic pro hodnocení teplot

Tab. 11: Výsledky výpočtu průběhů teplot

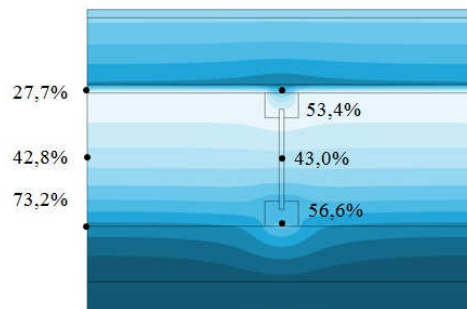
| Detail | Místo | Vypočteno v programu | Teplota v pozici θ (°C) | | | | |
|----------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|-------|------|------|------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A | V místě tepelného mostu | AREA 2015 | -14,9 | -4,3 | 5,6 | 16,1 | 19,3 |
| | | ANSYS R16.0 | -14,9 | -6,9 | 4,1 | 15,6 | 19,2 |
| | | WUFI 2D | -14,8 | -2,1 | 6,3 | 15,6 | 19,0 |
| | V ose mimo tepelný most | AREA 2015 | -14,9 | -5,3 | 5,2 | 15,5 | 19,7 |
| | | ANSYS R16.0 | -14,9 | -7,9 | 3,7 | 15,0 | 19,6 |
| | | WUFI 2D | -14,9 | -3,1 | 6,0 | 14,8 | 19,5 |
| B | V místě tepelného mostu | AREA 2015 | -14,5 | -6,7 | 4,2 | 15,7 | 19,2 |
| | | ANSYS R16.0 | -14,6 | -4,3 | 5,6 | 16,0 | 19,2 |
| | | WUFI 2D | -14,4 | -4,8 | 4,8 | 15,2 | 18,9 |
| | V ose mimo tepelný most | AREA 2015 | -14,6 | -7,4 | 3,8 | 15,1 | 19,6 |
| | | ANSYS R16.0 | -14,6 | -5,3 | 5,2 | 15,5 | 19,6 |
| | | WUFI 2D | -14,5 | -6,0 | 4,5 | 14,3 | 19,5 |
| C | V místě tepelného mostu | AREA 2015 | -14,7 | -2,7 | 3,9 | 12,4 | 19,7 |
| | | ANSYS R16.0 | -14,7 | -2,9 | 5,0 | 12,3 | 19,7 |
| | | WUFI 2D | -14,6 | -0,8 | 5,3 | 12,0 | 19,6 |
| | V ose mimo tepelný most | AREA 2015 | -14,7 | -4,3 | 4,5 | 13,2 | 19,7 |
| | | ANSYS R16.0 | -14,7 | -4,4 | 4,8 | 12,7 | 19,7 |
| | | WUFI 2D | -14,6 | -2,2 | 5,8 | 12,7 | 19,6 |
| D | Kout | AREA 2015 | -15,0 | -12,7 | -6,7 | 8,8 | 17,6 |
| | | ANSYS R16.0 | -15,0 | -12,6 | -6,2 | 8,7 | 17,6 |
| | | WUFI 2D | -15,0 | -11,6 | -7,2 | 8,1 | 17,2 |

Z uvedených výsledků výpočtů teplotních polí pro hodnocené detaily, jsou patrné rozdíly ve výsledcích numerických výpočtů pro jednotlivé použité výpočetní programy. V pozici 5 byly zjištěny pouze nepatrné rozdíly ve výsledcích výpočtů teplot, významné rozdíly nebyly zjištěny ani pro pozici 4. Jinak tomu ovšem je v případě pozic 3 a 2, tedy blíže vnějšímu povrchu konstrukce, kdy byly zjištěny významné rozdíly mezi teplotami, vypočtenými různými programy. Odchytky mezi výsledky jsou dány jednak použitím jiných konečných prvků, jak již bylo uvedeno při vyhodnocení povrchových teplot, ale především hustotou sítě konečných prvků. Ve všech případech byla síť vytvořena automaticky. Při hodnocení teplot uvnitř konstrukce je tedy velmi důležité, aby byla hustota sítě dostatečná a bylo tak dosaženo co nejpřesnějších výsledků.

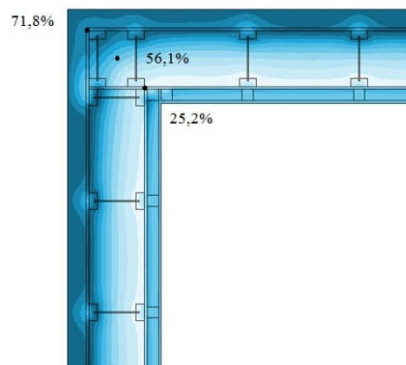
Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, numerické výpočty lze aplikovat na výpočty šíření vodní páry konstrukcí obdobným způsobem jako šíření tepla. Pro účely této disertační práce byl proveden výpočet šíření vodních par konstrukcí za stacionární okrajových podmínek pomocí programu AREA 2015 [54]. V porovnání s výsledky jednorozměrného šíření vodních par konstrukcí, které může vést k zavádějícím výsledkům, lze při vícerozměrném šíření vodních par lépe vyhodnotit místo případné kondenzace vodních par. V tomto případě jsou kritickými místy v konstrukci tepelné mosty, které jsou tvořeny nosnými prvky na bázi dřeva. Numerický výpočet lze tedy s výhodou použít právě pro tyto případy, kdy lze lépe vyhodnotit případné místo ohrožené kondenzací vodních par, což je často místo tepelného mostu. Výsledky výpočtů jsou patrné z následujících Obr. 55 - 57, které zobrazují dvourozměrné vlhkostní pole, tedy relativní vlhkosti uvnitř hodnocených detailů. Relativní vlhkost byla hodnocena ve 3 pozicích uvnitř skladby konstrukcí – dle Obr. 54 se jedná o pozice 2, 3 a 4.



Obr. 55: Výsledky výpočtu šíření vodních par – relativní vlhkosti v konstrukcích (vlevo detail A, vpravo detail B)



Obr. 56: Výsledky výpočtu šíření vodních par – relativní vlhkosti ve střeše (det. C)



Obr. 57: Výsledky výpočtu šíření vodních par – relativní vlhkosti v koutě (detail D)

Z uvedených výsledků a grafického znázornění vlhkostních polí je patrné, že při zimních návrhových okrajových podmínkách v těchto lehkých obvodových konstrukcích nedochází ke kondenzaci vodních par. Tato skutečnost byla zároveň ověřena experimentálním měřením relativních vlhkostí uvnitř konstrukcí viz kap. 4.1.4.

4.2.7. Vyhodnocení výsledků teoretických výpočtů numerickými metodami pro nestacionární okrajové podmínky

Předmětem této kapitoly je vyhodnocení výsledků numerických výpočtů vedení tepla za nestacionárních okrajových podmínek. Pro účely těchto výpočtů byl použit software Ansys R16.0 [57]. Pro nestacionární výpočet je možno rovněž použít program WUFI 2D [58], který je určen konkrétně k nestacionárním analýzám stavebních konstrukcí, avšak z důvodu sofistikovaného výpočtu je nutné zadat vstupní okrajové podmínky ve formě dat, která pro konkrétní umístění experimentální budovy nejsou k dispozici. Pro program ANSYS R16.0 [57] je možné pro numerickou simulaci zadat okrajové podmínky pouze ve formě teplot, které jsou k dispozici díky průběžnému monitorování experimentální budovy. Výsledky numerické simulace je pak možno porovnat s daty, která jsou získávána experimentálním měřením.

Pro nestacionární analýzu byl zvolen detail obvodové stěny s provětrávanou vzduchovou mezerou s dřevěným obkladem s východní orientací. To z toho důvodu, aby bylo možno analyzovat teploty uvnitř konstrukce v ose mimo tepelný most a také v místě tepelného mostu. V případě této konstrukce jsou pro tato místa prováděna experimentální měření. Následně je tedy možné porovnat výsledky numerické simulace s výsledky měření. Jako hodnocené období byly zvoleny dny 3. a 4. 1. 2016, kdy se teploty v průběhu daného intervalu blížily teplotám normovým, za kterých se konstrukce standardně dle ČSN 73 0540-2 [8] hodnotí. Délka numerické simulace byla zvolena 48 hod s časovým krokem 600 s. Okrajové podmínky pro výpočet byly použity III. typu Newtonovy. Jako nestacionární okrajové podmínky do výpočtu vstupují venkovní a vnitřní teplota. Tepelné odpory na vnitřní a vnější straně konstrukce byly zvoleny jako stacionární dle Tab. 5. Ve výpočtu tak není zohledněn vliv teploty vzduchu a jeho proudění při povrchu konstrukce na vnější a vnitřní straně na tepelný odpor při přestupu tepla. Pro účely této disertační práce však byly podmínky III. typu Newtonovy zvoleny jako dostatečně přesné. Rozložení teplot v konstrukci na počátku simulace bylo vypočteno pro stacionární okrajové podmínky. Pro porovnání vlivu počátečního stavu teplot v konstrukci na jejich další průběh byly numerické simulace provedeny pro 3 počáteční stavy a to:

- A) teplotní pole pro okrajové podmínky na počátku simulace,
- B) teplotní pole pro průměrné okrajové podmínky předešlého dne,
- C) teplotní pole pro průměrné okrajové podmínky předešlých 2 dní.

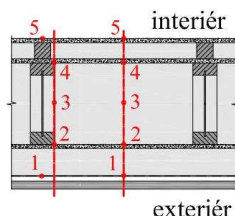
Vnější a vnitřní teploty, použité pro stanovení počátečního rozložení teplot v hodnocených detailech pomocí stacionárního výpočtu vedení tepla, jsou uvedeny v Tab. 12. Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce h_{si} a součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce h_{se} byl uvažován dle ČSN 73 0540-3 [50] viz Tab. 6.

Tab. 12: Vnitřní a vnější teploty – počáteční stacionární stav

| Počáteční stav | A | | B | | C | |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Teplota (°C) | θ_e | θ_i | θ_e | θ_i | θ_e | θ_i |
| | -11,7 | 19,5 | -8,8 | 20,9 | -6,5 | 21,8 |

Výsledky numerických simulací pro uvedené počáteční rozložení teplot v konstrukci jsou patrné z Tab. 12 pro místo v ose konstrukce mimo tepelný most a z Tab. 13 pro místo tepelného mostu. Pozice, ve kterých byly sledovány konkrétní teploty, jsou uvedeny na Obr. 58. Z výsledků je patrné, že pro krátkodobý simulační výpočet je zcela zásadní počáteční rozložení teplot v konstrukcích. Výsledky výpočtů se pro různé počáteční stavy výrazně liší. Jak již bylo zmíněno, simulační výpočet byl proveden pro časový interval 48 hodin. Je zřejmé, že s časem simulace dochází ke zmenšení odchylky ve výsledcích výpočtů teplot uvnitř konstrukcí pro jednotlivé počáteční stavy.

Nicméně ani po 48 hodinách simulace nebylo dosaženo stejného rozložení teplot v hodnoceném detailu. Tato skutečnost pouze upozorňuje na to, že výsledky stacionárních výpočtů nelze používat pro deklarování teplotního stavu uvnitř konstrukce, jelikož rozložení teplot v konstrukci je významně závislé na změnách okrajových podmínek v čase.



Obr. 58: Pozice hodnocených bodů

Tab. 13: Výsledky výpočtu teplot v hodnocených pozicích viz Obr. 58 pro řez konstrukcí v ose mimo tepelný most

| Řez | Počáteční stav | Pozice | Teplota θ (°C) | | | | | | | |
|-------------------------|----------------|--------|-------------------------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
| | | | Datum a čas | | | | | | | |
| | | | 3. 1. 2016 | | | | 4. 1. 2016 | | | |
| | | | 6:00 | 12:00 | 18:00 | 0:00 | 6:00 | 12:00 | 18:00 | 23:00 |
| | | | Čas od počátku simulace (hod) | | | | | | | |
| | | | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 47 |
| V ose mimo tepelný most | A | 1 | -12,3 | -12,6 | -12,9 | -15,1 | -13,1 | -9,6 | -7,0 | -7,4 |
| | | 2 | -5,4 | -5,6 | -5,8 | -5,9 | -6,5 | -6,5 | -6,0 | -5,1 |
| | | 3 | 5,0 | 5,0 | 4,9 | 4,9 | 4,8 | 4,7 | 4,7 | 4,9 |
| | | 4 | 15,1 | 15,2 | 15,3 | 15,4 | 15,4 | 15,3 | 15,5 | 15,7 |
| | | 5 | 19,3 | 19,6 | 19,4 | 19,6 | 19,6 | 19,8 | 20,4 | 20,1 |
| | B | 1 | -12,1 | -12,4 | -12,8 | -15,0 | -13,0 | -9,6 | -7,0 | -7,3 |
| | | 2 | -3,1 | -3,7 | -4,2 | -4,7 | -5,4 | -5,7 | -5,2 | -4,5 |
| | | 3 | 7,0 | 6,8 | 6,4 | 6,2 | 5,8 | 5,5 | 5,4 | 5,5 |
| | | 4 | 16,3 | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 15,9 | 15,7 | 15,9 | 16,0 |
| | | 5 | 19,4 | 19,7 | 19,8 | 19,7 | 19,6 | 19,9 | 20,4 | 20,2 |
| | C | 1 | -11,9 | -12,3 | -12,7 | -15,0 | -13,0 | -9,5 | -6,9 | -7,3 |
| | | 2 | -1,2 | -2,2 | -3,0 | -3,7 | -4,7 | -5,1 | -4,7 | -4,0 |
| | | 3 | 8,5 | 8,1 | 7,6 | 7,1 | 6,6 | 6,2 | 5,9 | 5,9 |
| | | 4 | 17,1 | 16,7 | 16,6 | 16,4 | 16,2 | 16,0 | 16,1 | 16,2 |
| | | 5 | 19,5 | 19,7 | 19,8 | 19,7 | 19,6 | 19,9 | 20,4 | 20,2 |

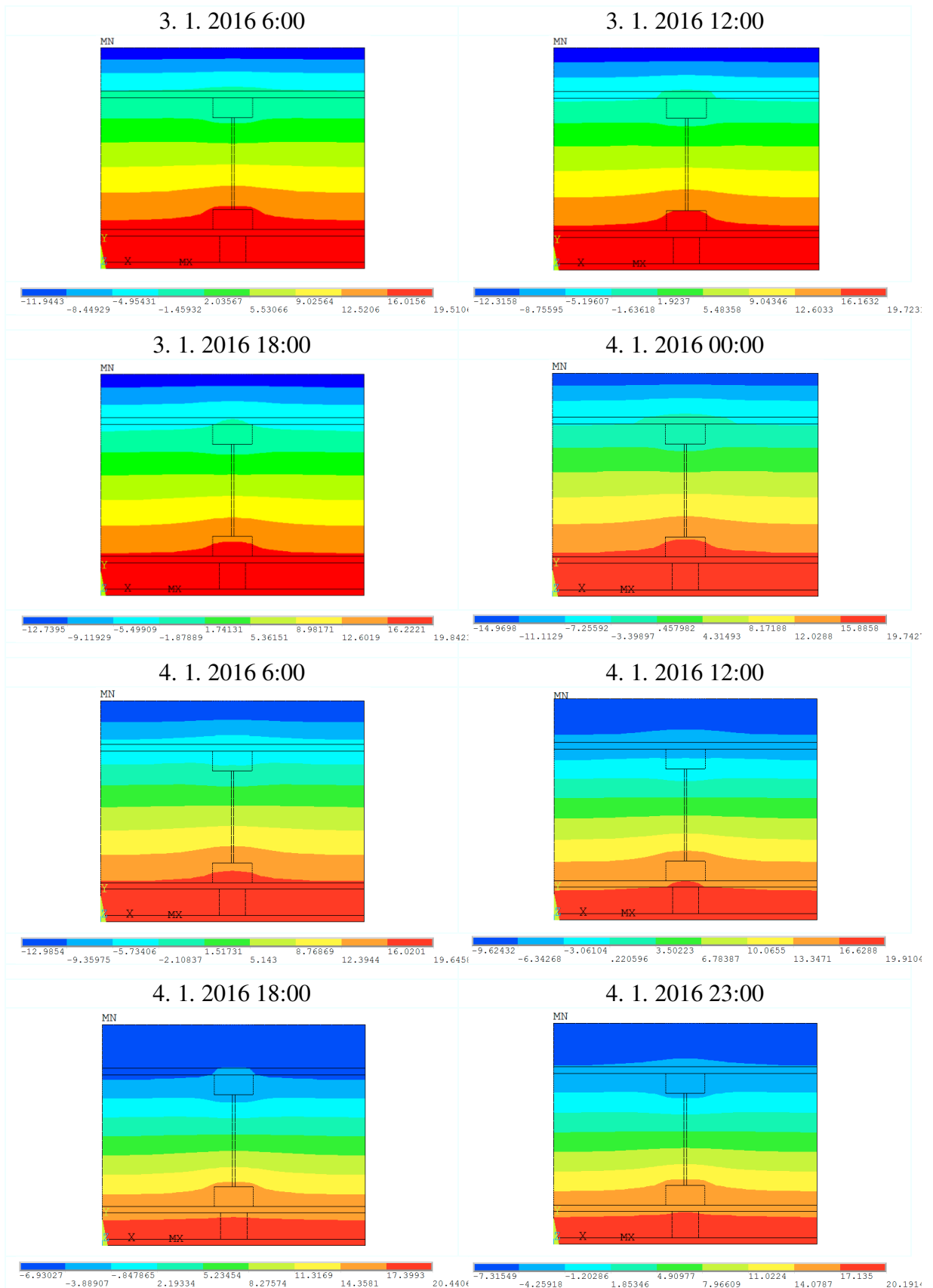
Tab. 14: Výsledky výpočtu teplot v hodnocených pozicích viz Obr. 58 pro řez konstrukcí místem tepelného mostu

| Řez | Bod | Počáteční stav | Teplota θ (°C) | | | | | | | |
|-------------------------|-----|----------------|-------------------------------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | Datum a čas | | | | | | | |
| | | | 3. 1. 2016 | | | 4. 1. 2016 | | | | |
| | | | 6:00 | 12:00 | 18:00 | 0:00 | 6:00 | 12:00 | 18:00 | 23:00 |
| | | | Čas od počátku simulace (hod) | | | | | | | |
| | | | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 47 |
| V místě tepelného mostu | A | 1 | -12,3 | -12,5 | -12,9 | -15,1 | -13,1 | -9,6 | -7,0 | -7,4 |
| | | 2 | -4,7 | -4,9 | -5,0 | -5,2 | -5,6 | -5,7 | -5,3 | -4,6 |
| | | 3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | 5,2 | 5,0 | 5,0 | 5,2 |
| | | 4 | 15,5 | 15,6 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 16,0 | 16,1 |
| | | 5 | 18,9 | 19,1 | 19,3 | 19,2 | 19,2 | 19,4 | 19,9 | 19,7 |
| | B | 1 | -12,1 | -12,4 | -12,8 | -15,0 | -13,0 | -9,5 | -6,9 | -7,3 |
| | | 2 | -2,3 | -2,9 | -3,3 | -3,8 | -4,4 | -4,7 | -4,5 | -4,0 |
| | | 3 | 7,3 | 7,1 | 6,8 | 6,5 | 6,2 | 5,9 | 5,7 | 5,8 |
| | | 4 | 16,8 | 16,6 | 16,5 | 16,4 | 16,3 | 16,2 | 16,3 | 16,4 |
| | | 5 | 19,2 | 19,3 | 19,4 | 19,4 | 19,3 | 19,5 | 19,9 | 19,8 |
| | C | 1 | -11,9 | -12,3 | -12,7 | -14,9 | -12,9 | -9,5 | -6,9 | -7,3 |
| | | 2 | -0,5 | -1,3 | -2,0 | -2,7 | -3,5 | -4,0 | -3,8 | -3,4 |
| | | 3 | 8,8 | 8,5 | 8,0 | 7,5 | 7,0 | 6,6 | 6,3 | 6,3 |
| | | 4 | 17,6 | 17,2 | 17,0 | 16,9 | 16,7 | 16,5 | 16,6 | 16,6 |
| | | 5 | 19,3 | 19,5 | 19,5 | 19,4 | 19,3 | 19,5 | 20,0 | 19,8 |

Grafické výstupy rozložení teplot v konstrukci uvádí Obr. 59. Jedná se o výstupy teplotních polí pro simulaci C, tedy okrajové podmínky pro počáteční stav jsou stanoveny jako průměrné teploty posledních 48 hodin před začátkem simulace. Tento počáteční stav byl vyhodnocen jako nejlépe odpovídající skutečnému rozložení teplot v konstrukci, které bylo zjištěno na základě experimentálního měření dne 3. 1. 2016 v 0:00 hodin, tedy na počátku simulačního výpočtu. Výstupy ilustrují změnu rozložení teplot v hodnoceném detailu v průběhu simulace.

Tepeľně vlhkostní analýza lehkých stavebních konstrukcí

Disertační práce



Obr. 59: Rozložení teplot v hodnoceném detailu pro vybrané časy simulace nestacionárního vedení tepla

5. Výsledky disertační práce

Disertační práce je dle metod zpracování rozdělena na dvě části a to na experimentální analýzu a teoretickou analýzu lehkých obvodových konstrukcí, konkrétně je věnována konstrukcím experimentální dřevostavby v pasivním standardu. Podrobné výsledky experimentálních měření, provedených na této experimentální budově, a jejich vyhodnocení je součástí kapitoly 4.1.4. Podrobný rozbor výsledků teoretické analýzy chování lehkých obvodových konstrukcí, která je provedena s pomocí analytických a numerických metod tepelně-technických výpočtů, je součástí kapitoly 4.2.

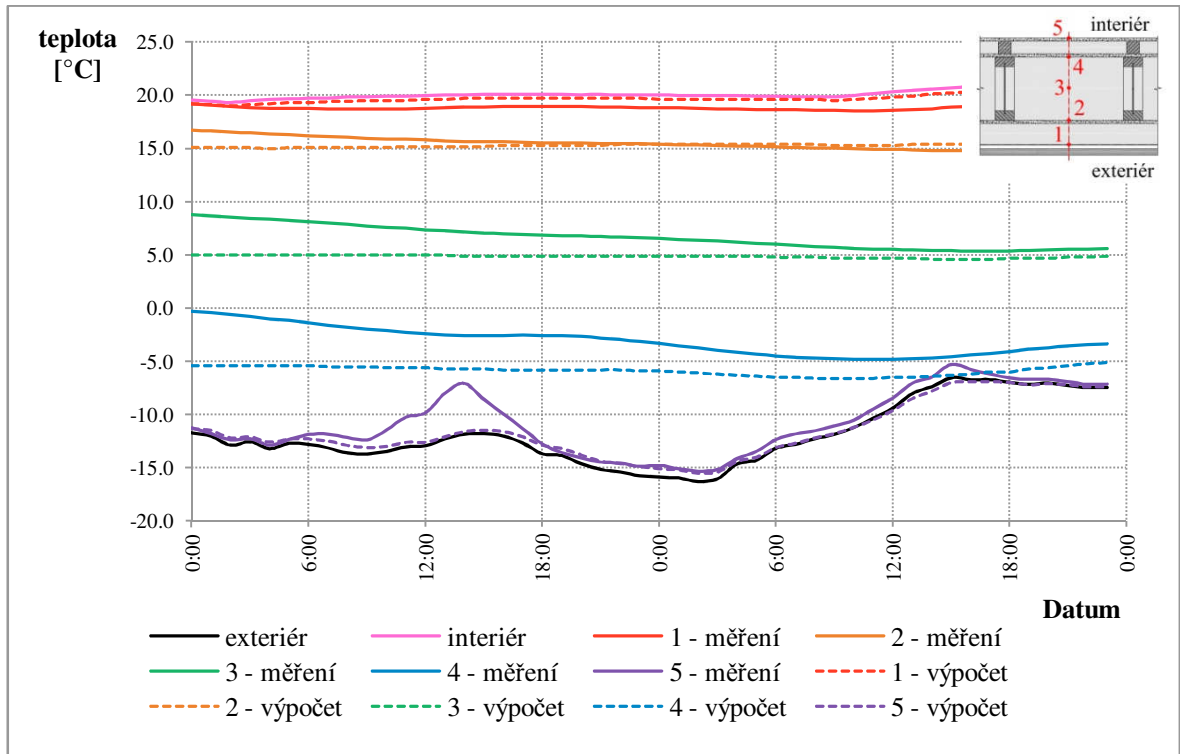
Tato kapitola je věnována výhradně porovnání výsledků experimentálních měření a teoretických výpočtů chování lehkých obvodových konstrukcí pomocí numerických výpočtových metod, což byl jeden z cílů této disertační práce.

5.1. Porovnání experimentální a teoretické analýzy

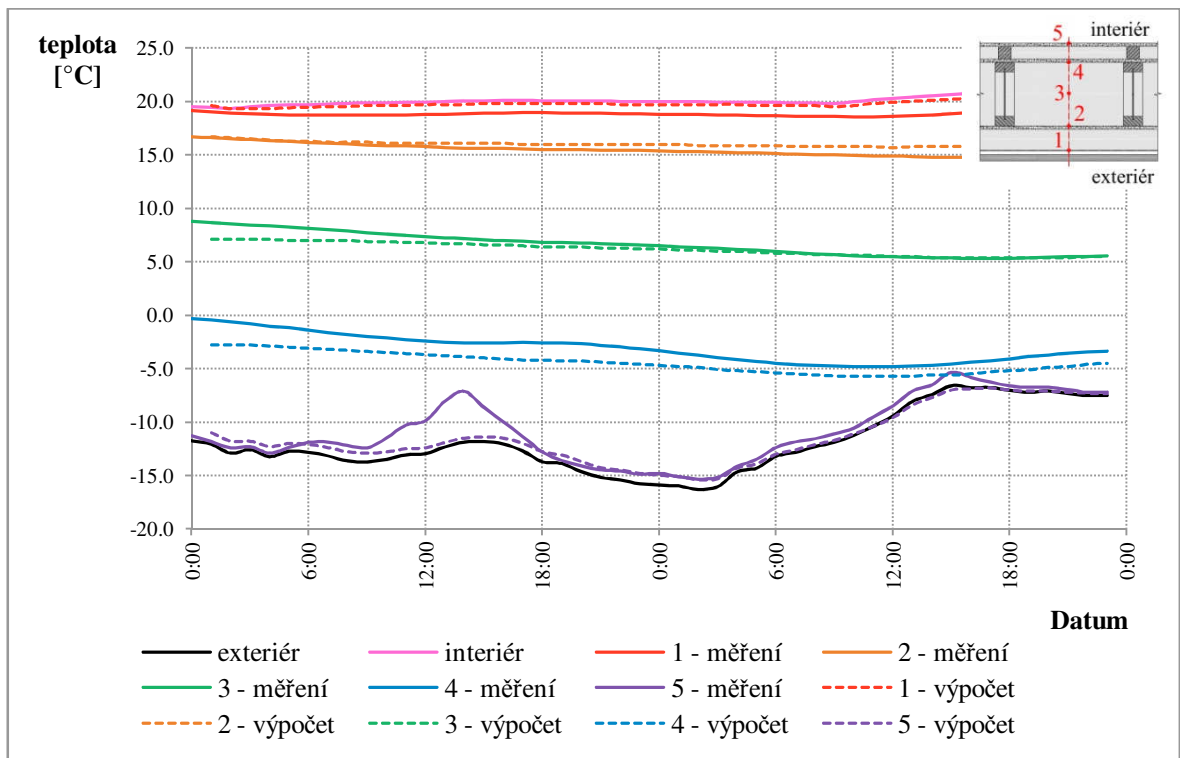
Pro porovnání výsledků experimentální a teoretické analýzy byly zvoleny dva dny v zimním období a to 3. 1. a 4. 1. 2016. Pro tento časový interval v délce 48 hodin byl proveden numerický simulační výpočet nestacionárního vedení tepla pro stavební detail konstrukce obvodové stěny s provětrávanou vzduchovou mezerou a dřevěným obkladem s východní orientací. Simulační výpočet byl proveden pomocí programu ANSYS R16.0 [57], který umožňuje provedení nestacionárních výpočtů vedení tepla. Výpočty byly provedeny pouze pro odezvu konstrukce na změny teplot na vnitřní a vnější straně konstrukce, nebyly zohledněny další vlivy jako například sluneční záření, proudění větru a jiné, které na konstrukci působí. Princip numerické simulace a vstupní parametry jsou definovány v kapitole 4.2.5. Výsledky numerických simulací teplotních polí jsou porovnány s výsledky měření teplot uvnitř hodnocené konstrukce. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2.7, výsledky numerického simulačního výpočtu významně závisí na počátečním rozložení teplot v konstrukci na začátku simulace. Výpočet byl proto proveden pro 3 počáteční stavy rozložení teplot v konstrukci, které byly vypočteny pomocí stacionárního výpočtu pro tyto okrajové podmínky:

- A) teplotní pole pro okrajové podmínky na počátku simulace,
- B) teplotní pole pro průměrné okrajové podmínky předešlého dne,
- C) teplotní pole pro průměrné okrajové podmínky předešlých 2 dní.

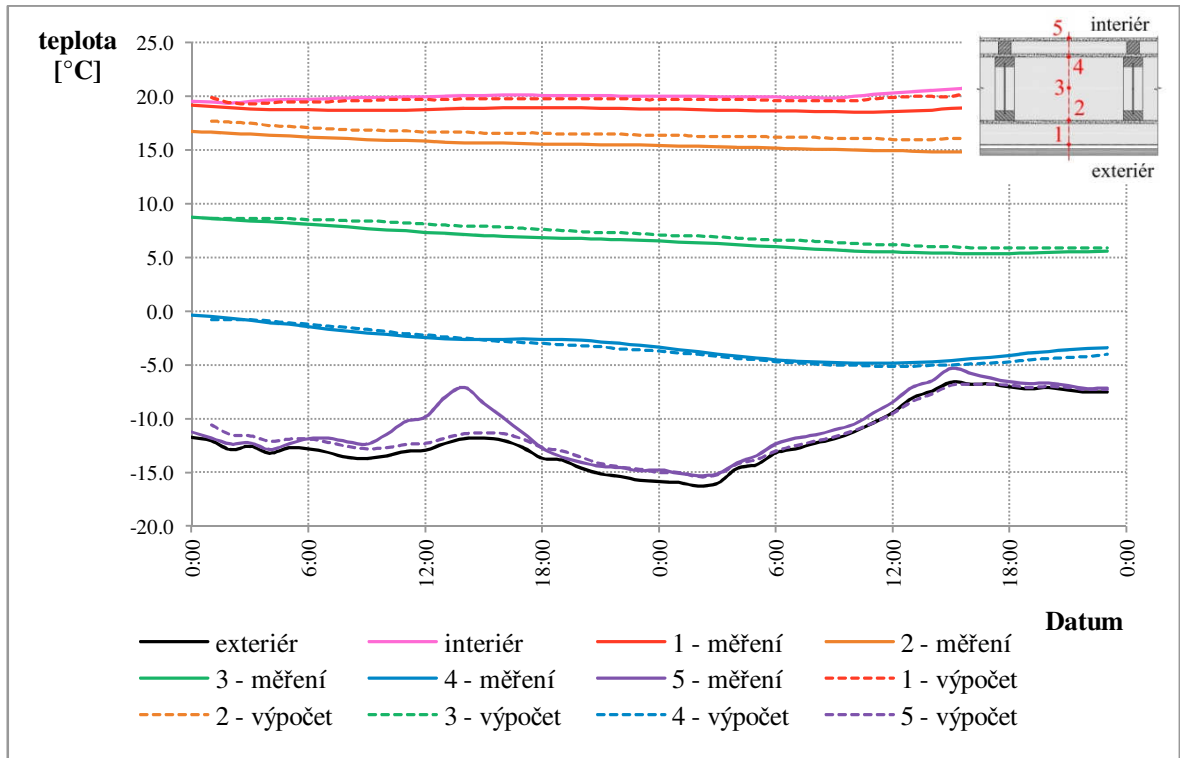
Výsledné průběhy teplot v hodnocených místech konstrukce uvádí následující obrázky Obr. 60 – 65. Graficky jsou znázorněny průběhy teplot v hodnoceném časovém intervalu pro místo v ose konstrukce mimo tepelný most a také pro místo tepelného mostu.



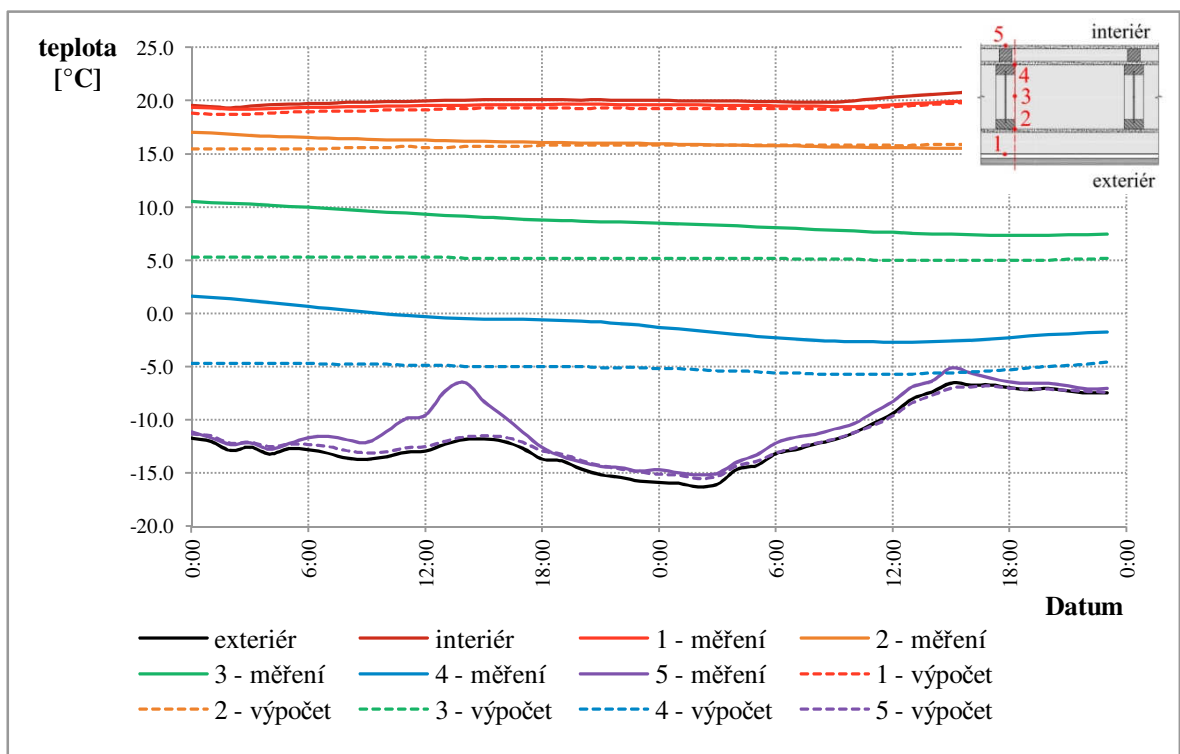
Obr. 60: Průběhy teplot v ose: počáteční stav rozložení teplot A



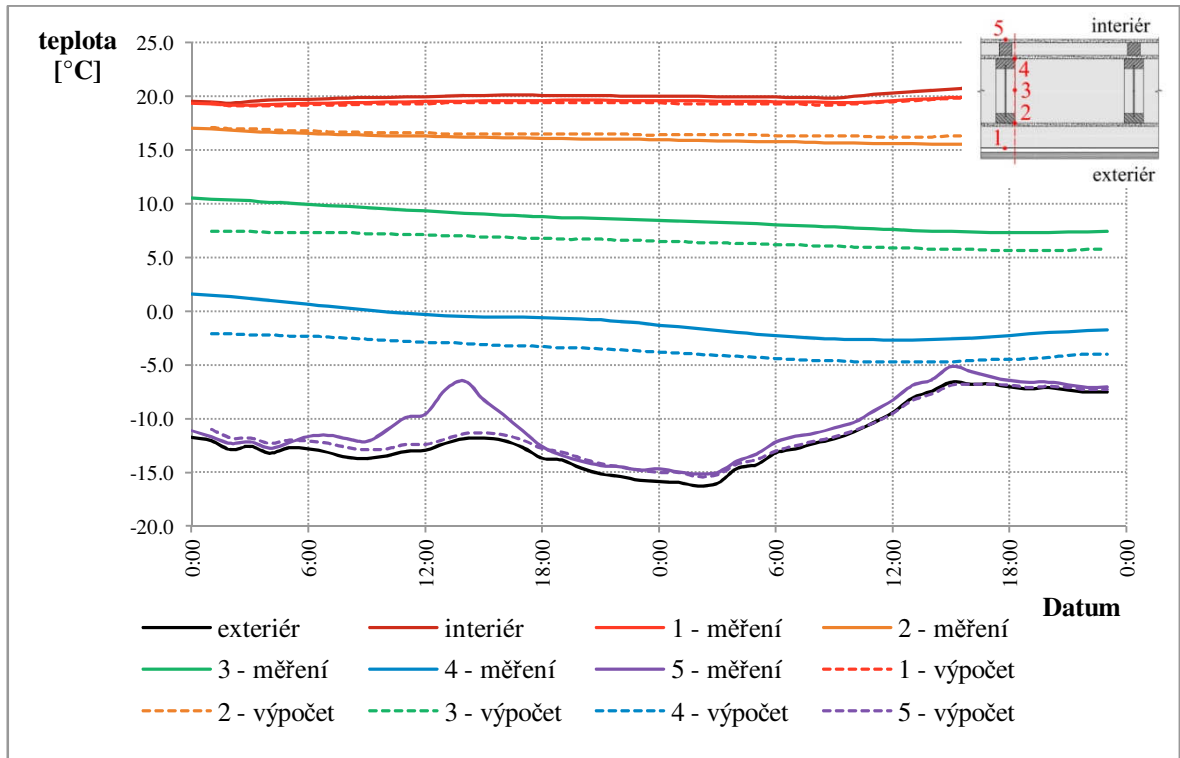
Obr. 61: Průběhy teplot v ose: počáteční stav rozložení teplot B



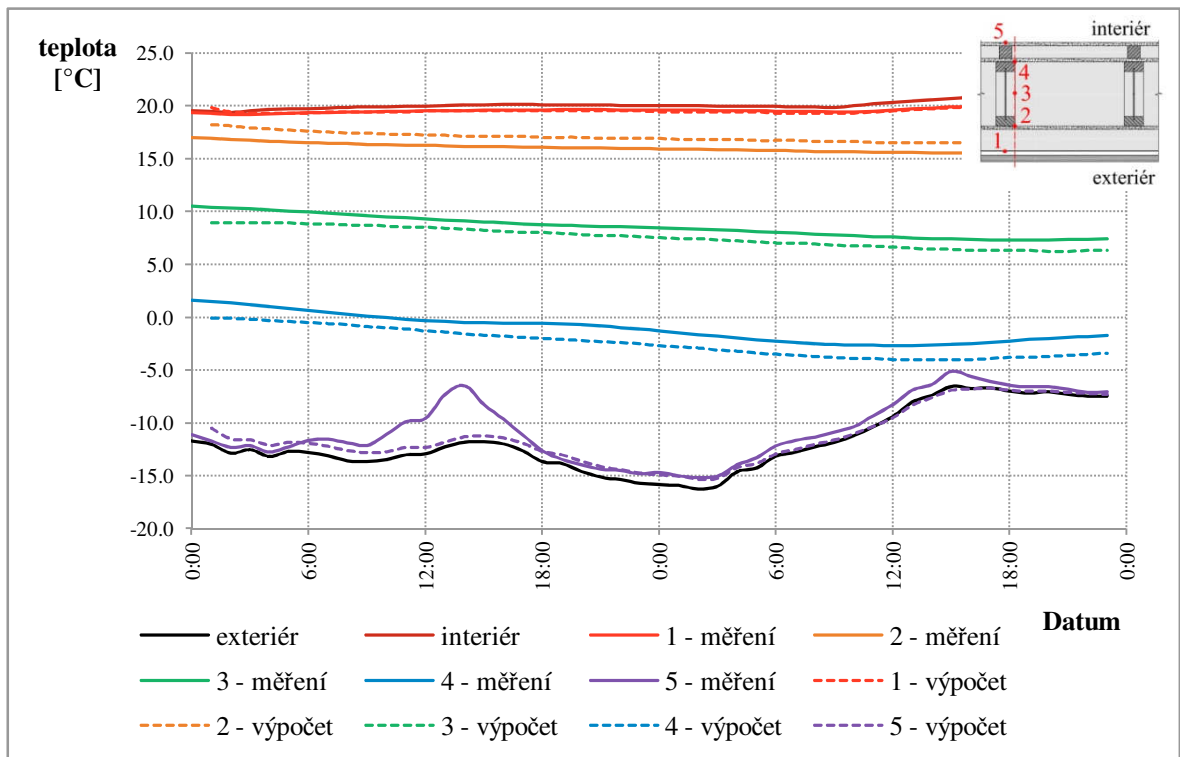
Obr. 62: Průběhy teplot v ose: počáteční stav rozložení teplot C



Obr. 63: Průběhy teplot v místě tepelného mostu: počáteční stav rozložení teplot A



Obr. 64: Průběhy teplot v místě tepelného mostu: počáteční stav rozložení teplot B



Obr. 65: Průběhy teplot v místě tepelného mostu: počáteční stav rozložení teplot C

Z výsledných průběhů teplot je patrný vliv počátečního rozložení teplot v konstrukci na následné chování konstrukce za simulovaných nestacionárních okrajových podmínek. Vypočtené průběhy teplot uvnitř konstrukce nejlépe odpovídají skutečným změřeným teplotám v hodnocených místech konstrukce při počátečním stavu C. Ten byl stanoven pomocí stacionárního výpočtu vedení tepla pro okrajové podmínky, které byly vypočteny jako průměrné vnitřní a vnější teploty předchozích 48 hodin. Jako zcela zásadně chybné zadání se jeví zadání počátečního stavu rozložení teplot v konstrukci A, stanovené stacionárním výpočtem pro okrajové podmínky na počátku simulace, tedy pro vnitřní a vnější teploty změřené dne 3. 1. 2016 v 0:00 hodin. Vypočtené průběhy teplot uvnitř konstrukce se pak velmi liší od skutečných dat, získaných experimentálním měřením. Při krátkodobých simulacích nestacionárního vedení tepla je tedy zjevné, že počáteční rozložení teplot v konstrukci zásadním způsobem ovlivňuje výsledky simulačního výpočtu. Proto je pro získání správných výstupů důležité, aby byly vhodně zvoleny okrajové podmínky pro počáteční rozložení teplot v konstrukci. Jinak je tomu v případě dlouhodobých simulačních výpočtů, jako například roční hodnocení konstrukcí. Pro účely těchto dlouhodobých simulací tepelně-technických dějů v konstrukcích lze využít např. specializovaný program WUFI 2D [53], kdy je doporučeno pro počáteční stav uvažovat konstantní rozložení teplot. V rámci dlouhodobého simulačního výpočtu pak má tato skutečnost na výpočet pouze zanedbatelný vliv.

Přestože nebylo dosaženo přesné shody výsledků simulačních výpočtů a změřených dat, lze říci, že výsledky výpočtů se velmi blíží změřeným teplotám a křivky vypočtených a změřených teplot téměř kopírují své průběhy. Toto samozřejmě platí za předpokladu vhodného vstupního rozložení teplot v konstrukci na počátku simulace. Výrazně bližších výsledků výpočtu je zároveň dosaženo v ose mimo tepelný most. V místě tepelného mostu se výsledky výpočtu a změřených dat mírně odlišují. Tato chyba je způsobena hustotou výpočetní sítě v daném řezu konstrukcí. V případě hodnocení složitějších detailů s prvky velmi malých rozměrů je nutné dbát na dostatečné hustotě sítě v těchto místech, aby byla zajištěna co nejvyšší přesnost výpočtu.

Při porovnání výsledků numerické simulace a experimentálního měření, je dále patrná odezva konstrukce na sluneční radiaci, která na tuto působí. Na rozdíl od simulačního výpočtu, který tento vliv nezohledňuje, je z průběhu změřených teplot tento vliv zjevný a to nejen na vnějším povrchu konstrukce, ale také v pozici 4, kde je patrné mírné zvýšení teploty ve večerních hodinách, ke kterému v případě numerické simulace nedochází. Zajímavý je rovněž fázový posun teplotního kmitu uvnitř konstrukce, kdy ke zvýšení teploty uvnitř konstrukce dochází s výraznou časovou prodlevou po prohrátí vnější části konstrukce.

Dále bylo provedeno porovnání výsledků měření teplot uvnitř konstrukcí s výsledky nestacionárního a stacionárního výpočtu. Porovnány byly výsledky měření a výpočtů pro tyto okrajové podmínky:

- experimentální měření:
okrajové podmínky změřené dne 3. 1. 2016 v 21:00 hodin
 $\theta_i = 20,1 \text{ } ^\circ\text{C}$,
 $\theta_e = -15,2 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- nestacionární výpočet:
výsledky pro počáteční stav C pro časový krok odpovídající dni 3. 1. 2016 v 21:00 hodin,
 $\theta_i = 20,1 \text{ } ^\circ\text{C}$,
 $\theta_e = -15,2 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- stacionární výpočet:
návrhové okrajové podmínky,
 $\theta_i = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (obytné místnosti),
 $\theta_e = -15 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Ostrava).

Výsledky měření a výpočtů pro všechny hodnocené softwary jsou uvedeny v Tab. 14. Uvedeny jsou výsledky nestacionárního výpočtu pro daný časový krok a dále výsledky stacionárních výpočtů pro návrhové okrajové podmínky. Pro nestacionární výpočet jsou uvedeny výsledky pro počáteční rozložení teplot v detailu C), které byly vyhodnoceny jako nejlépe odpovídající skutečnému stavu. Porovnány jsou pouze výsledky v místě řezu konstrukcí v ose mimo tepelný most.

Tab. 15: Průběhy teplot v konstrukci - porovnání

| Místo | Měření / Vypočteno v programu | Teplota v pozici θ ($^\circ\text{C}$) | | | | |
|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5* |
| V ose mimo tepelný most | | Experimentální měření | | | | |
| | Experimentální měření | -14,4 | -2,8 | 6,7 | 15,5 | 18,9 |
| | | Nestacionární výpočet | | | | |
| | ANSYS R16.0 | -14,2 | -3,3 | 7,3 | 16,1 | 19,5 |
| | | Stacionární výpočet | | | | |
| | AREA 2015 | -14,6 | -7,4 | 3,8 | 15,1 | 19,6 |
| | ANSYS R16.0 | -14,6 | -5,3 | 5,2 | 15,5 | 19,3 |
| WUFI 2D | -14,5 | -6,0 | 4,5 | 14,3 | 19,0 | |

* vnitřní povrchová teplota θ_{si}

Z uvedených výsledků je zřejmé, že výsledky stacionárních výpočtů neodpovídají skutečnému rozložení teplot v konstrukci, což je dáno právě stacionárními okrajovými podmínkami. Teploty uvnitř konstrukce, zjištěné stacionárním výpočtem, jsou nižší než skutečné změřené teploty. Takového stavu rozložení teplot v konstrukci by bylo ve skutečnosti možno dosáhnout při dlouhodobém působení konstantní teploty $\theta_e = -15\text{ }^\circ\text{C}$. Reálně však byla konstrukce během dne zatížena vyššími teplotami a proto jsou také teploty změřené uvnitř konstrukce vyšší. Co se týče nestacionárního výpočtu, je patrné, že výsledky se velmi blíží změřeným hodnotám. Tato skutečnost potvrzuje vhodnost použití výpočetních nástrojů pro nestacionární výpočty šíření tepla ve stavebních konstrukcích pro účely. Numerické metody jsou tedy vhodným nástrojem pro tepelně-technické simulace dějů ve stavebních konstrukcích. Předpokladem jejich správného použití je však znalost faktorů, které mohou zásadním způsobem výsledky výpočtů ovlivňovat. Při nedostatečných znalostech numerických metod je pak možno špatně interpretovat výsledky výpočtů. Výpočty nestacionárního vedení tepla s pomocí numerických výpočetních nástrojů nelze považovat za prostředek vhodný pro tepelně-technické posuzování stavebních konstrukcí běžnou odbornou veřejností. Tyto prostředky však lze s výhodou využívat pro účely výzkumu. Pro praktické posuzování stavebních konstrukcí jsou dostatečně specializované výpočetní prostředky pro šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích za stacionárních okrajových podmínek.

6. Závěr

Disertační práce je rozdělena do několika stěžejních částí, které se věnují problematice šíření tepla a vlhkosti v lehkých obvodových konstrukcích. Obsah práce lze shrnout do těchto bodů:

- podrobný rozbor problematiky šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích s uvedením základních principů výpočtových metod pro tepelně-technické vyhodnocování stavebních konstrukcí,
- experimentální analýza lehkých obvodových konstrukcí, vyhodnocení výsledků měření tepelně-vlhkostních parametrů lehkých obvodových konstrukcí experimentální pasivní dřevostavby se zaměřením na konstrukce s větranou vzduchovou mezerou,
- teoretická analýza šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích za použití analytických a numerických metod tepelně-technických výpočtů (metoda konečných prvků) a následné vyhodnocení a porovnání výsledků,
- porovnání dat získaných experimentálním měřením s výsledky numerické simulace nestacionárního vedení tepla.

Hlavním cílem **experimentální analýzy** bylo posouzení vlivu větraných vzduchových mezer na tepelně-technické parametry lehkých obvodových konstrukcí a posouzení bilance relativních vlhkostí uvnitř lehkých difúzně otevřených konstrukcí. Experimentálním měřením bylo potvrzeno, že uvnitř konstrukcí nedochází ke vzniku kondenzace vodních par. Tato skutečnost je však ve velké míře ovlivněna nízkými relativními vlhkostmi vnitřního vzduchu, které na konstrukci během sledovaného období působily. K vyhodnocení vlivu větraných vzduchových mezer byla využita data získaná dlouhodobým experimentálním měřením teplot na površích lehkých obvodových konstrukcí a zároveň byla provedena další doplňková měření. Posuzovány byly 4 typy konstrukcí a výsledky experimentálních měření potvrdily vlivy různých faktorů a zároveň přinesly zajímavé poznatky:

- obvodová stěna s kontaktním zateplením (jižní orientace fasády): konstrukce je zatěžována velkými rozdíly teplot na její vnější straně, kdy vlivem slunečního záření dochází k prohřívání a v nočních hodinách je naopak konstrukce podchlazována pod úroveň teploty venkovního vzduchu, toto je dáno vlivem sálání do jasné noční oblohy. K výraznějšímu podchlazování dochází především v zimním období při velmi nízkých teplotách. Tento jev lze pozorovat také v letním období, kdy ovšem nedochází k tak zásadnímu podchlazování.
- obvodová stěna s větranou vzduchovou mezerou a dřevěným obkladem (východní orientace fasády): povrch předsazené fasády není kompaktní, tvoří jej dřevěné lamely, které jsou od sebe vzdáleny 30 mm. Tloušťka vzduchové mezery je v tomto případě pouze 20 mm. Přesto však byly zaznamenány jevy, které odpovídají chování dvouplášťových konstrukcí. Teploty ve vzduchové mezeře jsou v zimním období nepatrně vyšší než teploty venkovního vzduchu. V zimním období na rozdíl

od předchozí hodnocené konstrukce nedochází k podchlazování vnějšího povrchu vnitřního pláště konstrukce. V letním období je však konstrukce zatěžována solárními zisky obdobně jako konstrukce s kontaktní fasádou.

- obvodová stěna s větranou vzduchovou mezerou a obkladem z cementopískových desek Cetriz (západní orientace fasády): povrch předsazené fasády je téměř kompaktní a tloušťka vzduchové mezery je v tomto případě 40 mm, což odpovídá tloušťce požadované. Předsazená fasáda konstrukci účinně chrání před nízkými teplotami v zimním období a zároveň vlivem vyšších teplot uvnitř vzduchové mezery umožňuje lépe odvádět vlhkost z konstrukce. V nočních hodinách nedochází k podchlazování konstrukce, jako tomu bylo v případě konstrukce s kontaktním zateplením. Nevýhodou této předsazené fasády je ovšem fakt, že v letním období není konstrukce účinně v nočních hodinách ochlazována, ve vzduchové mezeře byly zjištěny vyšší teploty než teploty vnějšího vzduchu.
- střešní konstrukce s větranou vzduchovou mezerou: v případě střešní konstrukce byl zaznamenán zásadní jev a to podchlazování vzduchu uvnitř větrané vzduchové mezery v zimním období, což je dáno vlivem sálání povrchu střechy do jasné noční oblohy. Při velmi nízkých teplotách byly uvnitř vzduchové mezery zjištěny teploty nižší až o více než 5 °C v porovnání s teplotou venkovního vzduchu. Zároveň také dochází k podchlazení povrchu vnitřního pláště. Předpokladem pro vznik tohoto jevu je také nedostatečné proudění vzduchu uvnitř větrané vzduchové mezery, která má v tomto případě nedostatečnou tloušťku. Jev podchlazování vzduchu uvnitř vzduchové mezery byl zaznamenán také pro letní období, avšak podchlazení není tak markantní jako je tomu v zimním období.

Hlavním cílem **teoretické analýzy** bylo posouzení vhodnosti analytických a numerických metod tepelně-technických výpočtů pro predikci chování lehkých obvodových konstrukcí. Výpočty byly prováděny pomocí čtyř výpočtových softwarů, kdy dva z nich umožňují provádění dynamických simulací za nestacionárních okrajových podmínek. Závěry lze shrnout do následujících bodů:

- pro běžné tepelně-technické hodnocení stavebních konstrukcí jsou výsledky stacionárních tepelně-technických výpočtů dostatečné, pro nehomogenní konstrukce je však vhodné provádět výpočty s použitím numerických metod, jelikož výsledky výpočtů analytickými metodami mohou vést k špatné interpretaci výsledků,
- pro účely podrobných analýz a simulací chování stavebních konstrukcí je nutné použít nestacionárních metod výpočtů. Tyto metody však vyžadují znalost principu numerických výpočtů pro dosažení požadované přesnosti výsledků. Dalším aspektem omezující využití těchto metod pro běžnou stavební praxi je časová náročnost přípravy výpočtových modelů a následně interpretace výsledků,
- numerické metody tepelně-technických výpočtů za nestacionárních okrajových podmínek jsou vhodným prostředkem pro účely výzkumů v oblasti navrhování stavebních konstrukcí.

7. Závěry pro realizaci v praxi

Hlavním přínosem disertační práce pro praxi lze rozdělit na dvě části. V první části je vyhodnocen vliv vzduchových mezer na chování lehkých obvodových konstrukcí. Bylo ověřeno, že provětrávané konstrukce mohou mít kladný vliv na odvádění vlhkosti z konstrukce, mohou plnit ochrannou funkci a zamezit tak výrazným výkyvům v teplotách na vnějším povrchu konstrukce. V rámci experimentálních měření bylo sledováno v souvislosti s větranými vzduchovými mezerami několik negativních jevů a to především podchlazování vzduchu uvnitř vzduchové mezery střešní konstrukce, ke kterému dochází při velmi nízkých teplotách venkovních teplotách v zimním období vlivem sálání do jasné noční oblohy. V letním období bylo naopak zjištěno, že v případě provětrávané fasády nedochází k dostatečnému ochlazení konstrukce vnějším vzduchem v nočních hodinách. Při návrhu provětrávaných konstrukcí je tedy nutné dbát na jejich správný návrh, tedy návrh dostatečné tloušťky vzduchové mezery, dostatečného množství větracích otvorů a také návrh vnějšího pláště tak, aby byly tyto negativní vlivy eliminovány.

Druhá část se zaměřovala na prověření výsledků stacionárních a nestacionárních tepelně-technických výpočtů pomocí analytických a numerických metod. Bylo ověřeno, že pro návrhy lehkých obvodových konstrukcí jsou tepelně-technické výpočty za stacionárních okrajových podmínek dostatečné, samozřejmě při posuzování konstrukcí při návrhových okrajových podmínkách. Pro důkladné hodnocení povrchových teplot a relativních vlhkostí uvnitř nehomogenních konstrukcí a tepelných vazeb je však nutné použít numerické metody výpočtů, které lze považovat za dostatečně přesné. Pro podrobnější tepelně vlhkostní analýzy stavebních konstrukcí je nutno provádět výpočty za nestacionárních okrajových podmínek pomocí numerických simulací.

8. Doporučení pro další postup výzkumu

V rámci disertační práce bylo na základě porovnání numerických simulací a výsledků experimentálního měření prokázáno, že s pomocí vhodných simulačních programů lze predikovat tepelně-technické chování lehkých obvodových konstrukcí. Výzvou pro další výzkum proto bude využití těchto metod pro podrobnější analýzy konstrukcí. Výzkum by měl být zaměřen především na posuzování vlivu větraných vzduchových mezer s využitím dynamických simulací, kdy bude ve výpočtu uplatněna také simulace proudění vzduchu uvnitř větrané vzduchové mezery, což nebylo součástí této disertační práce. Předpokladem pro další výzkum je také rozšíření využití programu WUFI 2D [58] pro podrobné dynamické simulace šíření tepla a vlhkosti uvnitř stavebních konstrukcí. V rámci této disertační práce byl tento software využit pouze pro výpočet za stacionárních okrajových podmínek. Na rozdíl od ostatních použitých programů se jedná o specializovaný software, pomocí kterého lze zohlednit v rámci okrajových podmínek také proudění vzduchu okolo povrchu konstrukcí, vliv hnaného deště, solárního záření a mnoho dalších. Předmětem dalšího výzkumu by mělo být také provedení dalších experimentálních měření pro vyhodnocení jevu sálání do jasné noční oblohy a vzniku podchlazování vzduchu uvnitř vzduchových mezer pod úroveň venkovního vzduchu. Tento jev byl sledován jak v zimním, tak také v letním období. V letním období se pak nabízí možnost využití tohoto jevu jako podpůrné chladicí techniky [47].

9. Použitá literatura

- [1] HUDEC, Mojmír a kol. Pasivní domy z přírodních materiálů. 1. vydání. Praha, nakladatelství Grada Publishing a. s., 2013. ISBN 978-80-247-4243-4.
- [2] Vyhláška č. 3/2008 Sb. o provedení některých ustanovení zákona č. 151/1997 Sb., o oceňování majetku a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, jak vyplývá ze změn provedených vyhláškami č. 456/2008 Sb. a č. 460/2009 Sb.
- [3] Podklady dostupné z <http://vitejtenazemi.cz/>
- [4] PREGIZER, Dieter. Zásady pro stavbu pasivního domu. 1. vydání. Praha, nakladatelství Grada Publishing a. s., 2009. ISBN 978-80-247-2431-7.
- [5] Zákon č. 406/2000 Sb. ze dne 25. října 2000, o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů. In: Sbírka zákonů, Česká republika. 2000, částka 115.
- [6] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. Května 2010 o energetické náročnosti budov. In. Úřední věstník EU. 2010, L 153/13-153/28.
- [7] HENS, Hugo. Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties. 1. vydání. Berlin, Germany, nakladatelství Wilhelm Ernst & Sohn, 2011, ISBN 978-3-433-02962-6.
- [8] ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky ve znění pozdějších předpisů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [9] ŠÁLA, Jiří, Lubomír KEIM, Zbyněk SVOBODA, Jan TYWONIAK. Komentář k ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov. [online] Česká energetická agentura a Informační centrum ČKAIT, s.r.o. Praha, 2007. Dostupné z <http://www.mpo-efekt.cz>
- [10] ČSN 73 0540 Tepelně technické vlastnosti stavebních konstrukcí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1964.
- [11] ČSN 73 0540-4 Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [12] ČSN EN ISO 13791 Tepelné chování budov – Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení – Základní kritéria pro validační postupy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [13] ČSN EN ISO 13792 Tepelné chování budov – Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení – Zjednodušené metody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [14] Český statistický úřad. Podklady dostupné z <http://www.czso.cz>.
- [15] Podklady dostupné z <http://www.panelovedomy.ekowatt.cz/stavebni-opatreni/62-tepelne-technicke-vlastnosti-konstrukci.html>

- [16] PATANIA, Francesco, Antonio GAGLIANO, Francesco NOCERA, A. FERLITO a A. GALESI. Thermofluid – dynamic analysis of ventilated facades. In: *Energy and Buildings*, vol. 42, pp 1148-1155, 2010. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.02.006.
- [17] SUAREZ, Christian, Patrice JOUBERT, Jose L. MOLINA a Francisco Jose SANCHEZ. Heat transfer and mass flow correlations for ventilated facades. In: *Energy and Buildings*, vol. 43, pp 3696-3703, 2010. ISSN:03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.10.002.
- [18] VIOT, H., A. SEMPEZ, M. PAULY a L. MORA. Comparison of different methods for calculating thermal bridges: Application to wood-frame buildings. In: *Building and Environment*, vol.93, pp. 339-348, 2015. ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.017.
- [19] INGELI, Rastislav, Boris VAVROVIC, Miroslav CEKON. Thermal Bridges Minimizing through Typical Details in Low Energy Designing. In: *Advanced Materials Research*, vol. 899, pp. 62-65, 2014. ISSN: 1662-8985. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.899.62
- [20] JURA, Jakub, Marianna SUSTIAKOVA, Pavol DURICA, Małgorzata ULEWICZ. Comparative analysis of energy certification in Poland and Slovakia. In: *Advanced Materials Research*, vol. 1020, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1020.529.
- [21] STN 73 0540-2: 2012 Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky ve znění pozdějších předpisů. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, Slovenská republika. 2012.
- [22] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2013 poz. 926). Ve znění pozdějších předpisů. Polská republika. 2013.
- [23] Vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov ze dne 29. března 2013 ve znění pozdějších předpisů, In: Sbírka zákonů, Česká republika. 2013, částka 36, s. 738-776. ISSN 1211-1244.
- [24] STN EN 15603/NA: 2012 Energetická hospodárnosť budov. 1) STN EN ISO 13790/NA Energetická hospodárnosť budov. Výpočet potreby energie na vykurovanie a chladenie. Národná príloha. Slovenská republika. 2012.
- [25] Vyhláška č. 364/2012 MDVaRR Slovenskej republiky z 12. novembra 2012 ktorou sa vykonáva zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov ve znění pozdějších předpisů, Slovenská republika. 2012.
- [26] Zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov ve znění pozdějších předpisů. Sloveská republika. 2005.
- [27] Podklady dostupné z <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby>

- [28] SKOTNICOVÁ, Iveta. Teoretická a experimentální analýza tepelného chování lehkých stavebních konstrukcí, Edice doktorské disertační, habilitační a inaugurační spisy, 2014. ISSN: 1213-7456. ISBN: 978-80-248-3696-6.
- [29] Podklady dostupné z <http://www.panelovedomy.ekowatt.cz/stavebni-opatreni/62-temelne-technicke-vlastnosti-konstrukci.html>
- [30] Podklady dostupné z <http://www.drevoastavby.cz>
- [31] Podklady dostupné z <http://www.woschitzgroup.com>
- [32] HALAHYJA, Martin a kol. 1. vydání. Bratislava, nakladatelství Jaga Group, v. o. s., 1998. ISBN 80-88905-04-4.
- [33] VAVERKA, Jiří a kol. Stavební tepelná technika a energetika budov. 1. Vydání. Brno: VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2910-0.
- [34] HENS, Hugo. Building Physics, Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. 2. vydání. Berlin, Germany, nakladatelství Wilhelm Ernst & Sohn, 2012, ISBN 978-3-433-03027-1.
- [35] BLAHETA, Radim. Matematické modelování a metoda konečných prvků [online]. Výukový materiál dostupný z <http://mi21.vsb.cz>. Ostrava, 2012.
- [36] KULHÁNEK, František. Stavební fyzika II Stavební tepelná technika. 4. Vydání. Praha: ČVUT v Praze, nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04239-7 .
- [37] ČSN 73 2810 Dřevěné stavební konstrukce. Provádění. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1993.
- [38] CHYBÍK, Josef. Přírodní stavební materiály. 1. vydání. Praha, nakladatelství Grada Publishing a. s., 2009. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [39] Podklady dostupné z <http://www.drevovbrne.cz>
- [40] Podklady dostupné z <http://www.steico.com>
- [41] Kolektiv autorů. Dřevostavby a dřevěné konstrukce I. A II. díl. 1. vydání. Brno: akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2010. ISBN 978-80-7204-732-1.
- [42] Podklady dostupné z <http://www.woodsystm.cz/ramova-nosna-konstrukce-pro-drevostavby>
- [43] Podklady dostupné z <http://happybuilding.cz/2015/03/montovane-drevostavby-klic/>
- [44] Podklady dostupné z <http://www.drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/1182-prvni-vlastovka-v-cr-drevostavba-ze-systemu-i-nosniku-fermacellsteico>
- [45] ČSN 73 1901 Navrhování střech – základní ustanovení ve znění pozdějších předpisů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [46] BLUDAU, Christian, Daniel ZIRKELBACH, Hartwig M. KÜNZEL. Surface Temperatures on Flat Roofs and Hygrothermal Consequences. In: *8th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries 2008*. Proceedings. Vol 1: Copenhagen, June 16-18, pp. 213-221, 2008. ISBN: 978-87-7877-265-7.

- [47] ŠIKULA, Ondřej, Jiří ŠÍMA. Chlazení sáláním proti noční obloze – teoretické zhodnocení v podmínkách ČR [online]. Dostupné <http://www.tzb-info.cz>
- [48] ČSN 73 0548 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, 1985.
- [49] ČSN EN ISO 6946 Stavební prvky a stavební konstrukce – Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – Výpočtová metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, 2008.
- [50] ČSN 73 0540-3 Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [51] MEZERA 2015, Svoboda software. <http://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelna-technika>
- [52] TEPLA 2015, Svoboda software. <http://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelna-technika>
- [53] ČSN EN ISO 10211 Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Tepelné toky a povrchové teploty – podrobné výpočty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [54] AREA 2015, Svoboda software. <http://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelna-technika>
- [55] CUBE 3D, Svoboda software. <http://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelna-technika>
- [56] MATERNA, Alois a Jiří BROŽOVSKÝ. Metoda konečných prvků, Analýza stavebních konstrukcí systémem ANSYS. [online] Regionální centrum celoživotního vzdělávání VŠB-TU Ostrava, 2003. Dostupné z <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/metoda-kp/>
- [57] ANSYS verze R16.0, <http://www.ansys.com>
- [58] WUFI 2D verze 3.3, <http://www.wufi.cz>
- [59] KÜNZEL, H. M. Silultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional Calculation Using Simple Parameters, PhD Thesis. Stutthart, Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [60] ČSN EN 15026 Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [61] Podklady dostupné z <http://www.wufi.cz>

10. Seznam publikací

DONOVA, Denisa, Veronika KUCERIKOVA a Nada ZDRAZILOVA. Thermal analysis of performance of the building envelope. In: *SGEM 2014*: Albena, Bulgaria, pp 401-408. ISBN 978-619-7105-21-6. ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2014B62.

DONOVA, Denisa a Veronika KUCERIKOVA. The Relative Humidity inside the Wall Structure According to the Type of Facade. In: *CEEE 2014*, Hong Kong, pp. 1-5. ISBN 978-1-908074-18-8.

DONOVA, Denisa, Nada ZDRAZILOVA a Veronika SIPKOVA. Using probabilistic calculation for the assessment of the risk of water vapor condensation on structures. In: *Advanced Material Research*, vol. 1020, pp. 534-539, 2014. ISSN 1022-6680. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1020.534.

DONOVA, Denisa a Nada ZDRAZILOVA. Comparison of the probabilistic calculation of course of temperatures in peripheral construction with actual measured data. In: *Advanced Material Research*, vol. 1041, pp. 154-157, 2014. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-280-8. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.154.

DONOVA, Denisa, Nada ZDRAZILOVA, Veronika KUCERIKOVA a Vladan PANOVEC. Possibilities of improving the thermal insulation properties of windows. In: *SGEM (International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management) 2015*: Albena, Bulgaria, pp. 227-234, ISBN: 978-619710543-8, ISSN: 13142704. DOI: 10.5593/SGEM2015/B62/S26.030.

ZDRAZILOVA, Nada, Iveta SKOTNICOVA, Denisa DONOVA a Jiri WINKLER. Comparison of Acoustic Properties of the Peripheral Walls of Energy Efficient Buildings - Natural and Artificial Materials. In: *Advanced Material Research*, vol. 1041, pp. 436-439, 2014. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-280-8. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.436.

KUCERIKOVA, Veronika, Denisa DONOVA, Lucie KUCEROVA, Jiri WINKLER a Darja KUBECKOVA. The Presence of Microscopic Algae and Funguses on the Facades of Building Equipped with Thermal Insulation Composite System (ETICS). In: *Advanced Material Research*, vol. 1041, pp. 261-264, 2014. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-280-8. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.261.

KUCERIKOVA, Veronika, Denisa DONOVA, Lucie KUCEROVA, Jiri WINKLER a Darja KUBECKOVA. The Biological Damage of Thermally Insulated Facades. In: *CEEE 2014*, Hong Kong, pp. 37-41. ISBN 978-1-908074-18-8.

SIPKOVA, Veronika, Denisa DONOVA a David BUJDOS. Structure of aggregate in long term heat accumulation. In: *SGEM (International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management) 2015*: Albena, Bulgaria, pp. 527 – 532, ISBN: 978-619710543-8, ISSN: 13142704. DOI: 10.5593/SGEM2015/B41/S17.068.

ZDRAZILOVA, N., Denisa DONOVA, Jiri WINKLER. Degradation of airborne sound insulation of building structures due to built-in installations. In: *SGEM (International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management) 2015*: Albena, Bulgaria, pp. 75 – 82, ISBN: 978-619710543-8, ISSN: 13142704. DOI: 10.5593/SGEM2015/B62/S26.010.

KUCERIKOVA, Veronika., Denisa DONOVA a Darja KUBECKOVA. The Influence of Additional Insulation of Facades to Their Aesthetic Devaluation by Vegetation of Algae, Fungi and Cyanobacteria. In: *EnviBuild (International Conference Buildings and Environment) 2015*: Bratislava, Slovensko, pp. -, ISBN: 978-80-227-4469-0. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.824.156.

DONOVA, Denisa, Nada ZDRAZILOVA a Katerina HAVLIKOVA, Thermal Technical Failures of Critical Construction Details, In: *Applied Mechanict and Materials*, vol. 835, pp. 472-477, 2016. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.835.472.

ZDRAZILOVA, Nada, Denisa DONOVA a Iveta SKOTNICOVA. Analysis of Predictive Calculation Methods of Airborne Sound Insulation, In: *Applied Mechanict and Materials*, vol. 835, pp. 573-578, 2016. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.835.573.

VACULIKOVA, Hana, Denisa DONOVA a Nada ZDRAZILOVA. Effect of Shielding Object to the Specific Heat Demand for Heating of a House, In: *Applied Mechanict and Materials*, vol. 835, pp. 737-742, 2016. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.835.737.

DONOVA, Denisa a Nada ZDRAZILOVA. The Thermal-humidity Analysis of the Performance of the Ventilated Air Gap. In: *SGEM (International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management) 2016*: Albena, Bulgaria, pp. 349-356, ISBN: 978-619-7105-69-8, ISSN: 1314-2704. DOI: 10.5593/SGEM2016/B62/S26.047.

ZDRAZILOVA, Nada a Denisa DONOVA. Influence of Structural Details Solution to the Overall Energy Performance of Building. In: *SGEM (International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management) 2016*: Albena, Bulgaria, pp. 137-142, ISBN: 978-619-7105-69-8, ISSN: 1314-2704. DOI: 10.5593/SGEM2016/B62/S26.019.

VALACHOVA, Denisa, Nada ZDRAZILOVA a Blanka CHUDIKOVA. Methods to include the influence of thermal bonds on the calculation of the energy performance of buildings and their influence on the heat demand for building heating. In: *MEACM (International Conference on Mechanical Engineering and Applied Composite Materials) 2017*: Hong Kong, Nov.23-24. (přijato k publikaci: *Materials Science and Engineering (MSE)*, ISSN 1757-899X).

DONOVA, Denisa, Veronika KUCERIKOVA a Lenka MICHNOVA. Vliv odvětrávané fasády na průběh teplot v obvodové konstrukci. In: *Vnútorná klíma budov 2014: Štrbské Pleso, Slovensko, 2014*, pp.143-148. ISBN 978-80-89216-67-3.

DONOVA, Denisa, Vaculikova, H., Tepelně-technické parametry špatně řešených kritických stavebních detailů, *Vnútorná klíma budov 2015: zborník prednášok z 26. vedeckej konferencie: Štrbské pleso, 8.-9. december 2015*, pp. 157-162, ISBN: 978-80-89216-85-7.

SKOTNICOVA, Iveta, Nada ZDRAZILOVA, Denisa DONOVA a Veronika SIPKOVA. Úroveň denního osvětlení vnitřních prostorů budov v závislosti na typu zasklení a poloze okenních výplní. In: *Progress 2013. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013*. ISBN 978-80-248-2972-2.

SIPKOVA, Veronika, Otakar GALAS, Denisa DONOVA a Nada ZDRAZILOVA. Energeticky soběstačná farma. In: *Progress 2013. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013*. ISBN 978-80-248-2972-2.

SIPKOVA, Veronika, Jiri LABUDEK a Denisa DONOVA. Návrh zásobníku pro dlouhodobou akumulaci tepla. In: *Structura 2013. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013*, s. 5. ISBN 978-80-248-3236-4.

KUCERIKOVA, Veronika a Denisa DONOVA. Změny tepelně vlhkostních parametrů obvodových stěn následkem zateplení a jejich negativní projevy na vnějším povrchu. In: *Vnútorná klíma budov 2014: Štrbské Pleso, Slovensko, 2014*, pp.149-152. ISBN 978-80-89216-67-3.

MICHNOVA, Lenka, Irena SVATOSOVA a Denisa DONOVA. Tepelná stabilita ve výukových prostorách v závislosti na solárním záření. In: *Vnútorná klíma budov 2014: Štrbské Pleso, Slovensko, 2014*, pp.43-48. ISBN 978-80-89216-67-3.

VACULIKOVA, Hana., Denisa DONOVA a Nada ZDRAZILOVA. Analýza vlivu stínění okolní zástavby a stínících prvků na měrnou roční potřebu tepla na vytápění rodinného domu v pasivním standardu, In: *Vnútorná klíma budov 2015 : zborník prednášok z 26. vedeckej konferencie : Štrbské pleso, 8.-9. december 2015*, pp. 133-136, ISBN: 978-80-89216-85-7.

KUCERIKOVA, Veronika a Denisa DONOVA, Poruchy fasád po dodatečném zateplení a jejich sanace, *Vnútorná klíma budov 2015 : zborník prednášok z 26. vedeckej konferencie: Štrbské pleso, 8.-9. december 2015*, pp. 41-46, ISBN: 978-80-89216-85-7.

11. Seznam tabulek

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 1: Požadavky na součinitele prostupu tepla konstrukcí U (porovnání hodnot pro budovy s převažující vnitřní teplotou 20 °C) | 22 |
| Tab. 2: Přesnosti měření měřících zařízení | 46 |
| Tab. 3: Odpor při přestupu tepla dle ČSN 73 0540-3 [50]..... | 66 |
| Tab. 4: Metody výpočtu součinitele prostupu tepla plošně nehomogenních konstrukcí | 68 |
| Tab. 5: Odpor při přestupu vodní páry dle ČSN 73 0540-3 [50]..... | 71 |
| Tab. 6: Okrajové podmínky použité pro stacionární výpočet vedení tepla a vodních par ... | 77 |
| Tab. 7: Materiálové charakteristiky – obvodová stěna | 78 |
| Tab. 8: Materiálové charakteristiky – střecha | 79 |
| Tab. 9: Výsledky tepelně-technických výpočtů analytickými metodami | 80 |
| Tab. 10: Výsledky výpočtu vnitřních povrchových teplot | 90 |
| Tab. 11: Výsledky výpočtu průběhů teplot | 93 |
| Tab. 12: Vnitřní a vnější teploty – počáteční stacionární stav | 96 |
| Tab. 13: Výsledky výpočtu teplot v hodnocených pozicích viz Obr. 58 pro řez konstrukcí v ose mimo tepelný most..... | 97 |
| Tab. 14: Výsledky výpočtu teplot v hodnocených pozicích viz Obr. 58 pro řez konstrukcí místem tepelného mostu..... | 98 |
| Tab. 15: Průběhy teplot v konstrukci - porovnání | 105 |

12. Seznam obrázků

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1: Předpokládaný vývoj zásob ropy a kapalných uhlovodíků [3]..... | 10 |
| Obr. 2: Vývoj normových požadavků na součinitel prostupu tepla vybraných stavebních konstrukcí v letech 1964 – 2011 | 12 |
| Obr. 3: Podíl dřevostaveb na trhu rodinných domů v ČR [14] | 19 |
| Obr. 4: Podíl výstavby dřevostaveb ve světě [27] | 24 |
| Obr. 5: Vizualizace nejvyššího dřevostavby na světě – HoHo Tower, Vídeň [31]..... | 24 |
| Obr. 6: Grafický výstup výpočtu stacionárního teplotního pole (kout obvodové stěny, vytvořeno v SW Area2015)..... | 26 |
| Obr. 7: Ukázka z knihy J. - B. Fouriera z roku 1822 [31]..... | 26 |
| Obr. 8: Průběh proudění vzduchu okolo povrchu tělesa při ohřívání vzduchu (např. povrch konstrukce v kontaktu s vnějším vzduchem)..... | 29 |
| Obr. 9: Schéma rozdělení sálavé energie dopadající na konstrukci | 30 |
| Obr. 10: Grafický výstup výpočtu stacionárního vlhkostního pole (řez šikmou střechou, vytvořeno v SW Area2015): a) bez difúzní fólie a parozábrany, b) s difúzní fólií a parozábranou | 31 |
| Obr. 11: Ukázka použití masivního dřeva (srubová stavba) [30]..... | 35 |
| Obr. 12: Aglomerované dřevo: a) OSB desky, b) překližka, c) dřevovláknité desky [39].. | 35 |
| Obr. 13: Desintegrované dřevo: a) dřevovláknitá izolace ve formě měkkých desek [40], b) foukaná dřevovláknitá izolace [40], c) foukaná celulóza [40] | 36 |
| Obr. 14: Konstrukční systémy dřevostaveb: a) lehký skelet ze smrkových profilů [42], b) panelový [43], c) lehký skelet z dřevěných I nosníků [44] | 37 |
| Obr. 15: Výzkumné a inovační centrum MSDK | 38 |
| Obr. 16: Experimentální budova: půdorys 1.NP a 2NP | 40 |
| Obr. 17: Experimentální budova: řez..... | 40 |
| Obr. 18: Použití tepelného izolantu Steico Protect v kombinaci s omítkou [40] | 41 |
| Obr. 19: Typy řešení provětrávané fasády: a) dřevěným obkladem, b) obkladem z cementotřískových desek | 42 |
| Obr. 20: Zabudování teplotně-vlhkostních čidel do panelu obvodové stěny | 43 |
| Obr. 21: Skladba obvodové stěny a poloha zabudovaných měřících čidel: a) kontaktní zateplovací systém opatřený tenkovrstvou omítkou, b) provětrávaná fasáda s dřevěným obkladem, c) provětrávaná fasáda s obkladem z cementotřískových desek Cetris | 43 |
| Obr. 22: Skladba dvouplášťové střechy a poloha zabudovaných měřících čidel..... | 44 |
| Obr. 23: Měřící zařízení Arexx..... | 44 |
| Obr. 24: Měřící zařízení Ahlborn Almemo 2590 (vlevo) a Ahlborn Almemo 2690 (vpravo) | 45 |
| Obr. 25: Instalace měřícího zařízení Ahlborn | 45 |
| Obr. 26: Polohy měřících zařízení pro zimní a jarní období: a) obvodová stěna s kontaktním zateplením, b) obvodová stěna s dřevěným obkladem, c) obvodová stěna s obkladem Cetris, d) dvouplášťová střecha..... | 48 |
| Obr. 27: Průběhy teplot vnějšího vzduchu ve sledovaném zimním období..... | 48 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 28: Průběhy teplot na vnějším povrchu konstrukcí ve sledovaném zimním období ... | 49 |
| Obr. 29: Průběhy vnitřních povrchových teplot ve sledovaném zimním období..... | 50 |
| Obr. 30: Průběhy relativních vlhkostí vnějšího vzduchu ve sledovaném zimním období...52 | 52 |
| Obr. 31: Polohy měřících zařízení pro letní období: A) obvodová stěna s kontaktním zateplením, B) obvodová stěna s dřevěným obkladem, C) obvodová stěna s obkladem Cetris, D) dvouplášťová střecha | 54 |
| Obr. 32: Průběhy teplot na vnější straně stěnové konstrukce opatřené omítkou (jižní orientace fasády) v letním období..... | 55 |
| Obr. 33: Průběhy teplot na vnější straně dvouplášťové stěnové konstrukce opatřené dřevěným obkladem (východní orientace fasády) v letním období..... | 56 |
| Obr. 34: Průběhy teplot na vnější straně dvouplášťové stěnové konstrukce opatřené obkladem z desek Cetris (západní orientace fasády) v letním období..... | 57 |
| Obr. 35: Průběhy teplot ve sledovaných místech stěnových konstrukcí dne 18. 8. 2017.... | 58 |
| Obr. 36: Průběhy teplot na vnější straně dvouplášťové střechy v letním období..... | 59 |
| Obr. 37: Průběh rovnocenné sluneční teploty vzduchu pro výpočet tepelných zisků konstrukcí (východní orientace fasády – konstrukce s dřevěným obkladem)..... | 60 |
| Obr. 38: Průběh rovnocenné sluneční teploty vzduchu pro výpočet tepelných zisků konstrukcí (západní orientace fasády – konstrukce s obkladem z cementotřískových desek Cetris) | 61 |
| Obr. 39: Průběhy relativních vlhkostí na vnější straně obvodových konstrukcí v letním období..... | 62 |
| Obr. 40: Roční průběhy relativních vlhkostí uvnitř konstrukce obvodové stěny v místě koutu..... | 63 |
| Obr. 41: Schematické znázornění prostupu a přestupu tepla konstrukcí v závislosti na tepelných odporech | 67 |
| Obr. 42: Schematické znázornění konstrukce se systematickými tepelnými mosty | 69 |
| Obr. 43: Schematické znázornění prostupu vodních par konstrukcí v závislosti na difúzních odporech | 72 |
| Obr. 44: Zjištění výskytu kondenzace vodní páry v konstrukci | 73 |
| Obr. 45: Schéma větrané vzduchové mezery vč. průběhu teplot | 76 |
| Obr. 46: výstup ze softwaru AREA 2015 [54]: dvourozměrné teplotní pole..... | 81 |
| Obr. 47: výstup ze softwaru CUBE 3D [55]: výpočetní model a trojrozměrné teplotní pole | 82 |
| Obr. 48: Příklad konečných prvků: a) úsečka (1D), b) trojúhelník (2D), obdélník (2D), čtyřstěn (3D)..... | 83 |
| Obr. 49: Rovinný element Plane 55 | 87 |
| Obr. 50: Obvodová stěna s kontaktním zateplením (A) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D) | 91 |
| Obr. 51: Obvodová stěna s provětrávanou fasádou (B) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D) | 92 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 52: Střecha (C) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D)..... | 92 |
| Obr. 53: Kout obvodové stěny s provětrávanou fasádou (D) – výsledky výpočtů vnitřních povrchových teplot (vlevo výstup AREA 2015, uprostřed výstup ANSYS 2015, vpravo výstup WUFI 2D) | 92 |
| Obr. 54: Hodnocené detaily s vyznačením pozic pro hodnocení teplot..... | 93 |
| Obr. 55: Výsledky výpočtu šíření vodních par – relativní vlhkosti v konstrukcích (vlevo detail A, vpravo detail B) | 94 |
| Obr. 56: Výsledky výpočtu šíření vodních par – relativní vlhkosti ve střеше (det. C)..... | 95 |
| Obr. 57: Výsledky výpočtu šíření vodních par – relativní vlhkosti v koutě (detail D)..... | 95 |
| Obr. 58: Pozice hodnocených bodů | 97 |
| Obr. 59: Rozložení teplot v hodnoceném detailu pro vybrané časy simulace nestacionárního vedení tepla | 99 |
| Obr. 60: Průběhy teplot v ose: počáteční stav rozložení teplot A | 101 |
| Obr. 61: Průběhy teplot v ose: počáteční stav rozložení teplot B..... | 101 |
| Obr. 62: Průběhy teplot v ose: počáteční stav rozložení teplot C..... | 102 |
| Obr. 63: Průběhy teplot v místě tepelného mostu: počáteční stav rozložení teplot A | 102 |
| Obr. 64: Průběhy teplot v místě tepelného mostu: počáteční stav rozložení teplot B | 103 |
| Obr. 65: Průběhy teplot v místě tepelného mostu: počáteční stav rozložení teplot C | 103 |