

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Diplomová práce

**Analýza šíření tepla a vlhkosti v konstrukčním detailu
reálné dřevostavby**

Bc. Václav Dušek

© 2020 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Václav Dušek

Dřevařské inženýrství

Dřevařské inženýrství

Název práce

Analýza šíření tepla a vlhkosti v konstrukčním detailu reálné dřevostavby.

Název anglicky

Analysis of heat and moisture flow in construction details of real timber construction.

Cíle práce

Cílem práce je experimentální a teoretická analýza přestupu tepla a vlhkosti přes konstrukční detail napojení obvodové stěny a podlahové konstrukce 1. NP reálné typové dřevostavby s lehkým dřevěným skeletem. Práce má experimentální a teoretický charakter. Experimentální část práce vychází z měření teploty a relativní vzdušné vlhkosti ve (a) vzduchu interiéru a exteriéru a (b) konstrukci podlahy a obvodové stěny během jednoho roku užívání dřevostavby. Teoretická analýza je zaměřena na numerické řešení současného šíření teplotního a vlhkostního pole v konstrukci za nestacionárních podmínek metodou konečných prvků. Práce má posoudit u konkrétní dřevostavby (a) tepelné vlastnosti a (b) riziko kondenzace vodní páry v konstrukčním detailu. Výstupem práce je srovnání skutečného a modelového chování konstrukčního detailu a návrh případné materiálové a/nebo geometrické optimalizace.

Metodika

1. Vyhodnoťte data teploty a relativní vlhkosti vzduchu z experimentálního měření prostředí dřevostavby v rámci projektu TAČR TH02020792 v roce 2018.
2. Teoreticky vypočtete rozložení teplotního a vlhkostního pole ve vybraném konstrukčním detailu napojení obvodové stěny a podlahové konstrukce během jednoho roku užívání. Úlohu řešte jako současný pohyb vlhkostního a teplotního pole za nestacionárních podmínek. Okrajové podmínky pro výpočet volte dle experimentu (viz. bod 1).
3. Analyzujte rozložení teplotního a vlhkostního pole zejména v konstrukčních prvcích z materiálů na bázi dřeva, dále analyzujte hustotu tepelného a vlhkostního toku, a části konstrukce s nejmenší povrchovou teplotou v interiéru a největší pravděpodobnosti kondenzace vodní páry.
4. Změřený průběh veličin experimentem porovnejte s teoretickým výpočtem pohybu tepla a vlhkosti a na základě statistických metod vyhodnoťte.
5. Na základě numerického řešení navrhnete případnou optimalizaci materiálové a geometrické skladby konstrukčního detailu.

Doporučený rozsah práce

60 stran textu včetně výpočtů a příloh

Klíčová slova

dřevostavby, stavební fyzika, tepelný a difúzní tok, experimentální měření, metoda konečných prvků

Doporučené zdroje informací

ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov, části 1 až 4 (od roku 2005)

KOLB, J. – KOŽELOUH, B. Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

KULHÁNEK, František. Stavební fyzika II: stavební tepelná technika. 5., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04957-0

NOVOTNÝ, Marek. Tepelné izolace a stavební tepelná technika. Praha: ABF, 1994. Stavby a rekonstrukce. ISBN 80-901608-0-8

VAVERKA, J. Stavební tepelná technika a energetika budov. Brno: VUTium, 2006. 630 s. ISBN 80-214-2910-0.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

prof. Dr. Ing. Petr Horáček

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 16. 4. 2020

Elektronicky schváleno dne 16. 4. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 16. 04. 2020

Čestné prohlášení

*Prohlašuji, že svou diplomovou práci "**Analýza šíření tepla a vlhkosti v konstrukčním detailu reálné dřevostavby**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.*

Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Bc. Václav Dušek

V Praze dne 15.6.2020

Poděkování

Rád bych touto cestou chtěl především poděkovat své ženě a svým dcerám za jejich trpělivost a snahu mi poskytnout čas a prostor pro psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Kamilu Trgalovi, Ph.D. za spolupráci při získávání dat pro experimentální část práce. V neposlední řadě mé srdečné poděkování patří prof. Dr. Ing. Petru Horáčkovi, vedoucímu této diplomové práce za odborné vedení, pomoc, motivaci a dobrou vůli.

Autor: Bc. Václav Dušek

Název práce: Analýza šíření tepla a vlhkosti v konstrukčním detailu reálné dřevostavby

Abstrakt

Tato diplomová práce porovnává šíření tepla a vlhkosti v konstrukčním detailu reálné dřevostavby se simulovaným chováním modelového detailu. Modelový konstrukční detail byl analyzován za nestacionárních podmínek v softwarovém programu FlexPDE, založeném na metodě konečných prvků. Výsledkem jsou na základě statistických metod porovnané grafy znázorňující teplotní a vlhkostní průběhy.

Závěrem porovnání byla stanovena shoda mezi experimentálním a modelovým šetřením. Při obou šetřeních byla prokázána vyšší vlhkost obsažená v konstrukčním detailu. Proto byl proveden návrh na optimalizaci.

Klíčová slova: dřevostavby, stavební fyzika, tepelný a difuzní tok, experimentální měření, metoda konečných prvků, FlexPDE,

Author: Bc. Václav Dušek

Title: Analysis of heat and moisture flow in construction details of real timber construction

Abstract

This diploma thesis compares the propagation of heat and moisture in the structural detail of a real wooden building with the simulated behaviour of the model detail. The model design detail was analysed under non-steady conditions in the software program FlexPDE, based on the finite element method. The result is based on statistical methods compared graphs showing temperature and humidity profiles.

At the end of the comparison, the agreement between the experimental and model survey was determined.

In both investigations, higher humidity contained in the construction detail was proved. Therefore, an optimization proposal was made.

Keywords: wooden houses, heat and moisture flow, finite element method, building physics, experimental measurement, FlexPDE,

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíl práce.....	12
3	Teoretická východiska.....	13
3.1	Termodynamika sorpce	13
3.1.1	Termodynamika vody volné	13
3.1.2	Termodynamika vody vázané	14
3.2	Pohyb vody ve dřevě	14
3.2.1	Difúze vody a plynů ve dřevě	14
3.2.2	Stacionární difúze vody ve dřevě	15
3.2.3	Nestacionární difúze vody ve dřevě	15
3.2.4	Vliv faktorů na difúzi ve dřevě	16
3.3	Pohyb tepla ve dřevě	17
3.3.1	Měrné teplo	17
3.3.2	Tepelný tok	17
3.3.3	Hustota tepelného toku	17
3.3.4	Součinitel tepelné vodivosti.....	18
3.3.5	Součinitel prostupu tepla	18
3.3.6	Šíření tepla ve stavebních konstrukcích	18
3.3.7	Šíření tepla vedením.....	18
3.3.8	Stacionární vedení tepla.....	19
3.3.9	Nestacionární vedení tepla.....	19
3.3.10	Prostup tepla konstrukcí	20
3.4	Tepelné mosty	21
3.5	Výpočetní metody	22
3.5.1	Metoda teplotních sítí	22
3.5.2	Metoda konečných prvků	23
3.5.3	Nástroje pro tvorbu analýz.....	23
3.5.3.1	Ansys Mechanical.....	23
3.5.3.2	FlexPDE	24
3.6	Hodnoty tepelně – vlhkostních vlastností vybraných materiálů	25
3.7	Systémy staveb na bázi dřeva	26
3.7.1	Srubové a roubené stavby	26
3.7.2	Moderní stavby z masivního dřeva (CLT panely)	27
3.7.3	Hrázděné stavby	28

3.7.4	Těžké skeletové stavby	28
3.7.5	Lehké skeletové stavby (Two by Four, sloupkový systém)	29
3.7.6	Rámové stavby (panelové stavby).....	30
3.7.7	Obálka budovy	31
3.8	Vlhkost v dřevostavbě	32
3.9	Vývoj tepelně energetických požadavků pro ochranu budov	32
4	Vlastní práce.....	34
4.1	Projekt TAČR	34
4.2	Materiál.....	34
4.2.1	Konstrukční detail	34
4.2.2	Materiálové konstanty posuzovaného detailu	35
4.2.3	Experimentální měření	36
4.3	Metodika	38
4.3.1	Experiment.....	38
4.3.1.1	Naměřená data z projektu.....	38
4.3.1.2	Výkresová dokumentace	38
4.3.2	Model.....	38
4.3.2.1	Zvolení výpočetního softwaru	38
4.3.2.2	Vyhledání hodnot vlastností materiálů	38
4.3.2.3	Modelace detailu a přiřazení okrajových podmínek v software FlexPDE	39
4.3.2.4	Volba kritických míst.....	39
4.3.2.5	Samotná práce software FlexPDE	39
4.3.2.6	Výstupy ze softwaru FlexPDE	40
4.3.3	Porovnávání naměřených a vypočtených hodnot.....	41
5	Výsledky.....	42
5.1	Experiment.....	42
5.1.1	Okrajové podmínky	42
5.1.2	Průběh teplot	43
5.1.3	Průběh relativních vzdušných vlhkostí.....	45
5.2	Model.....	46
5.2.1	Porovnání stacionárního a nestacionárního výpočtu.....	46
5.2.1.1	Okrajové podmínky	46
5.2.1.2	Rozložení průběhu teplot	47
5.2.1.3	Rozložení průběhu relativních vlhkostí vzduchu	48

5.2.1.4	Hustota tepelného toku.....	49
5.2.1.5	Hustota vlhkostního toku	50
5.2.2	Analýza nestacionárního výpočtu	50
5.2.2.1	Teplota.....	51
5.2.2.2	Relativní vzdušná vlhkost	53
5.2.2.3	Teplotní a vlhkostní spády v konstrukcích.....	55
5.3	Porovnání experimentu s modelem	57
6	Diskuze.....	61
7	Závěr	66
8	Summary.....	68
9	Seznam použitých zdrojů	70
9.1.1	Seznam uvedených obrázků.....	72
9.1.2	Seznam uvedených tabulek.....	74
10	Přílohy	75
10.1	Seznam příloh ve vazbě diplomové práce.....	75
10.2	Seznam vložených příloh	75

1 Úvod

Předkládaná práce pojednává o problematice šíření tepla a vlhkosti v konstrukčním detailu dřevostavby. Tematika prostupu tepla je v současné době hodně diskutované téma nejen mezi odborníky, ale i mezi laickou veřejností. Veřejnost se zajímá pouze o energie, jejich ceny a o to, jak docílit co možná největšího snížení cen těchto komodit. Odborníci však nejsou tolik úzkozrací a za prostupem tepla vidí i další problematiku, která se netýká pouze financí, ale také prostupu vodní páry konstrukcí.

Jak napovídá název práce a jak jsem již naznačil výše, budu se zabývat v této práci stavební fyzikou. Hlavním zkoumaným materiálem je zde dřevo nebo materiál na jeho bázi, na který budou působit dva faktory ovlivňující jeho vlastnosti – vlhkost a teplo. Mým přáním, které je pro mě velice důležité pro další kariérní rozvoj v oblasti dřevostaveb, je přesvědčit sebe samého, že dřevo, jako hlavní nosný stavební materiál, je dobrým tepelným izolantem a při správné skladební konstrukci i vhodným materiálem pro stavební konstrukce z hlediska prostupu vodní páry.

Jelikož nastane i doba rekonstrukcí postavených dřevostaveb, tak se tu nabízí otázka, co nás může čekat po otevření konstrukce. Protože mám již mnohaletou praxi ve stavebnictví, konkrétně ve stavění domů na bázi dřeva, tak mě tato otázka přivedla až k společnému projektu ČZU se stavební firmou dodávající dřevostavby na český trh. Díky tomuto projektu bylo možné pozorovat tepelně vlhkostní chování v konstrukci rámové dřevostavby po dobu jednoho roku. Na základě těchto dat by bylo možné simulovat dlouholeté chování stavby, které by případně mohlo ukázat, kdy je dobré, a zda je to vůbec nutné, zahájit rekonstrukci budovy.

Pro toto téma práce jsem se rozhodl, abych lépe nahlédl a nasměroval své zaměření na problematiku jedné z částí stavební fyziky, která dle mého názoru bude v nadcházející době celoevropské zelené politiky ještě více aktuální, než je dnes.

2 Cíl práce

Ve své práci se v deseti kapitolách zabývám šířením tepla a vlhkosti v konstrukčním detailu dřevostavby. Hlavním cílem je porovnat skutečné a modelové chování konstrukčního detailu napojení obvodové stěny a podlahové konstrukce za působení tepla a vlhkosti. Aby byly hodnoty co možná nejrelevantnější, je třeba provést analýzu šíření tepla a vlhkosti reálné stavby a následně na získaných datech provést teoretickou analýzu za pomoci výpočetní techniky. Experimentální část práce vychází z měření prostředí dřevostavby v rámci projektu TAČR TH02020792 v roce 2018. Kde byly měřeny teploty a relativní vzdušné vlhkosti ve vzduchu interiéru a exteriéru, konstrukci podlahy a obvodové stěny během jednoho roku užívání dřevostavby. Teoretická část práce se věnuje více numerickému řešení současného šíření teplotního a vlhkostního pole v modelové konstrukci za nestacionárních podmínek metodou konečných prvků. Na základě dosažených výsledků je dílčím cílem práce posoudit u konkrétní dřevostavby tepelné vlastnosti a riziko kondenzace vodní páry v konstrukčním detailu, aby bylo možné zodpovědět otázku: Zda jsou používané konstrukční skladby stavebními firmami bezpečné a nenáchylné k tvorbě plísní a jiných vad, které by vedly k poškození konstrukce, nebo je nezbytné je vždy kontrolovat? Osobním cílem této práce je vytvořit si vlastní názor na dřevo jako na hlavní používaný stavební materiál při stavění budov a přesvědčit se prohloubením znalostí o jeho kvalitách, či na základě získaných nových informací být způsobilý určit, kdy není vhodné tento materiál použít.

3 Teoretická východiska

3.1 Termodynamika sorpce

Nejen pro potřeby této práce je nutné přijmout zjednodušený předpoklad, že děje probíhající v termodynamickém systému ve spojení dřevní hmoty a vody jsou vratné. Přesto je nezbytné zde uvést, že jde vzhledem k hysterezi sorpce jen o metastabilní rovnováhu. Veškeré změny skupenství látek nebo jejich struktur jsou spjaty se změnami energie. V termodynamickém systému vytvořeném dřevem a vodou musí být rovnováha všech složek, které jsou jeho součástí. Musí tedy platit základní rovnovážné stavy, to jsou rovnováha teplot, tlaků a volných energií.

Aby bylo možné změnit skupenství látek je potřeba překonat určitou energetickou bariéru. Například při vypařování vody ze dřeva musí molekula vody překonat vodíkovými vazbami způsobenou energetickou bariéru. Sorpce je tedy pojem, kdy dochází při fázovém přechodu vody z jednoho skupenství do druhého k zachycování a udržení molekul vodní páry přitažlivými silami hydroxylových skupin.

3.1.1 Termodynamika vody volné

Vztah, který probíhá mezi hodnotami volné energie, entalpie, entropie a teplotou látky se může zjednodušeně vyjádřit

$$H = G + TS$$

kde	H je	entalpie	[J.mol ⁻¹].
	G	volná energie (Gibbsova energie)	[J.mol ⁻¹].
	S	entropie	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹],
	T	absolutní teplota	[K]. (Horáček, 2008)

Dochází zde tedy k přeměně skupenství vody ve dřevě a změně energetických hladin, tuto změnu ovšem nelze udělat bez vynaložení určité energie. Entalpií je myšlena fyzikální veličina, která může být definována jako celková vnitřní energie v látce. Entropie vyjadřuje degradaci energie látky v energii tepelnou a platí, že se zvyšující teplotou roste také entropie. Podle výše uvedené rovnice pak představuje volná energie rozdíl celkové vnitřní energie a nevyužitelné energie, která je součinem entropie a absolutní teploty.

Přeměny skupenství vody, ke kterým může dojít v závislosti na fyzikálních změnách látky, jsou pro přehlednost uvedeny v Tabulka 1

přeměna	z	do
Kondenzace	plynné	kapalné
Evaporace	kapalné	plynné
Sublimace	pevné	plynné
Fuze	pevné	kapalné

Tabulka 1 Druhy přeměn skupenství látky (vlastní zdroj)

3.1.2 Termodynamika vody vázané

V případě, kdy dochází ve dřevě k příjmu vody vázané se uvolňuje teplo, které se nazývá diferenciální teplo sorpce E_s o jednotce $J \cdot mol^{-1}$. Lze ho také popsat jako teplo, které se musí dodat nad teplo výparné E_0 , aby se odpařil 1 mol vody vázané. Diferenciální teplo sorpce je nejvíce vztahováno k hmotnosti vody vázané ve dřevě a značí se Q_s . Znárodnuje míru nadbytku vazebné energie vody ve dřevě a je měřeno množstvím uvolněné energie na gram vody vázané při sorpci.

Hodnotu diferenciálního tepla sorpce E_s lze vypočítat parciální derivací termodynamické definice:

$$E_s = -R \left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial \frac{1}{T}} \right)$$

Kde R je univerzální plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$],
 T absolutní teplota,
 φ je relativní vlhkost vzduchu. (Horáček, 2008)

Ze známého tlaku nasycených vodních par a teploty vzduchu lze analogicky jako u diferenciálního tepla sorpce stanovit hodnotu výparného tepla.

$$E_0 = -R \frac{\partial \ln p_0}{\partial \frac{1}{T}}$$

Kde E_0 je výparné teplo [$J \cdot mol^{-1}$],
 R univerzální plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$],
 p_0 tlak nasycených vodních par [Pa],
 T teplota vzduchu [K]. (Horáček, 2008)

3.2 Pohyb vody ve dřevě

Pohyb vody ve dřevě, v kapalném nebo plynném skupenství, je umožněn objemovým tokem a molekulárním tokem. Objemový tok probíhá v mezokapilárách a makrokapilárách za působení gradientu statického nebo kapilárního tlaku. Příkladem jeho využití je například tlaková impregnace dřeva a platí, že velikost objemového toku dřevem se zvětšuje s jeho propustností. Molekulární tok probíhá ve formě plynů v lumenech buněk a ve formě vody vázané v mikrokapilárách buněčné stěny. Jeho praktické využití nastává při sušení dřeva a pohybu vlhkostního pole dřevěným prvkem při vyrovnávání rovnovážné vlhkosti dřeva. Molekulární tok se popisuje difúzí.

3.2.1 Difúze vody a plynů ve dřevě

Difúzi je nejsnazší pochopit na procesu sušení dřeva. Dřevo obsahující nerovnoměrně rozloženou vlhkost s rozdílnou koncentrací se snaží pohybem vody (molekulárním tokem) tyto rozdíly vyrovnat. Hybnou silou je zde gradient koncentrace, který představuje nerovnoměrně rozloženou vlhkost ve dřevě, nebo jak bude uvedeno v kapitole pohybu tepla ve dřevě, tak i nerovnoměrně rozložené teplotní pole.

Difúze se rozlišuje mezi izotermická a neizotermická, stacionární a nestacionární. Pro účely této práce je zde nezbytné uvést stacionární a nestacionární difúzi.

3.2.2 Stacionární difúze vody ve dřevě

Stacionární difúze je difúze za ustálených podmínek, tedy konstantní v čase, kde nedochází ke změně vlastností kromě vzdálenosti difúzního toku. Podle I. Fricka zákona se difúze popisuje rovnicí:

$$\frac{m}{t S} = D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

kde: m je hmotnost prodifundované kapaliny [kg],
t čas [s],
S plocha difúze [m²],
D koeficient difúze [m²·s⁻¹],
Δc rozdíl koncentrací [kg·m⁻³],
Δx vzdálenost rozdílných koncentrací [m]. (Horáček, 2008)

Pokud není hybným gradientem difúze koncentrace, ale vlhkost dřeva Δw, osmotický tlak Δπ nebo volné energie ΔG_s, můžeme proces difúze popsat rovnicemi z nich vycházejících. Protože se jedná o opačný směr proti gradientu difúze, je koeficient se záporným znaménkem.

$$\vec{j} = -K_w \frac{\Delta w}{\Delta x} \quad \vec{j} = -K_\pi \frac{\Delta \pi}{\Delta x} \quad \vec{j} = -K_G \frac{\Delta G_s}{\Delta x}$$

Kde \vec{j} je hustota vlhkostního toku [kg·s⁻¹·m⁻²],
K_w, K_π, K_G koeficient vlhkostní vodivosti, osmotického tlaku a volné energie [kg·m⁻¹·s⁻¹],
Δ w, Δ π, Δ G_s gradient vlhkosti, [-, %]. (Horáček, 2008)

Pro následnou nestacionární difúzi je zejména důležitý koeficient vlhkostní vodivosti K_w, jehož vztah ke koeficientu difúze D je

$$K_w = D \frac{\Delta c}{\Delta w} = D \rho_{rw}$$

kde ρ_{rw} je redukovaná hustota dřeva [kg·m⁻³]. (Horáček, 2008)

3.2.3 Nestacionární difúze vody ve dřevě

Jedná se o difúzi probíhající za nestacionárních podmínek, to znamená v čase proměnlivý tok závislý na měnících se podmínkách prostředí. K pochopení procesu je dobré si opět uvést příklad, kdy nastává nestacionární děj. Např. při ohřevu je dřevo vystavováno několika faktorům a stále se přizpůsobuje okolnímu prostředí. Do rovnice tedy přibývají nové proměnné veličiny, proto je difúze vody ve dřevě popisována právě jako nestacionární děj, jehož výpočet se odvozuje ze stacionární rovnice derivací podle času a vzdálenosti. Po zjednodušení na jednorozměrný systém v kartézské souřadné soustavě se získá rovnice:

$$\frac{dm}{dt} = K_w S \left(\frac{dw}{dx} \right)_{t,x}$$

kde

dm	derivace hmotnosti prodifundované kapaliny	[kg],
dt	derivace času	[s],
dw	derivace vlhkosti	[-, %],
dx	derivace vzdálenosti rozdílných koncentrací	[m]. (Horáček, 2008)

Po aplikování 1. zákona termodynamiky, který říká, že zůstatek energie v systému je roven rozdílu toku energie do systému a toku energie ze systému, se získá rovnice pro výpočet přibližného stanovení průměrného koeficientu difúze vody ve dřevě.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \bar{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

Diferenciací koeficientu D podle vlhkosti dřeva se získá přesnější tvar rovnice pro vyjádření průměrné přibližné hodnoty koeficientu difúze.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

Kde	∂w je	parciální derivace vlhkosti	[-, %],
	∂t	parciální derivace času	[s],
	∂x	parciální derivace vzdálenosti rozdílných koncentrací	[m],
	D	koeficient difúze	[m ² ·s ⁻¹].

(Horáček, 2008)

Obě výše uvedené parciální diferenciální rovnice jsou popsány II. Fickovým zákonem a jejich výpočtem se dosáhne rozložení vlhkosti v závislosti na poloze a času.

Obecný tvar II. Fickova zákona v kartézské souřadné soustavě je ve tvaru:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Při řešení dvourozměrného výpočtu se rovnice řeší pouze veličinami s indexem x a y . Nezbytností při řešení těchto rovnic je znát okrajové podmínky pro rovnovážnou vlhkost na povrchu tělesa, rozložení vlhkosti v počátečním okamžiku a hodnotu cílové vlhkosti dřeva.

3.2.4 Vliv faktorů na difúzi ve dřevě

Na difúzi vody ve dřevě mají především vliv anatomická stavba dřeva, hustota, vlhkost dřeva a teplota. Z vlastností anatomické stavby dřeva je nejdůležitějším faktorem pórovitost dřeva. Vzhledem k tomu, že je stavba dřeva tvořena převážně buňkami v podélném směru, tak platí, že poměr koeficientů difúze k ostatním směrům jsou přibližně $D_L : D_R : D_T = 35 : 3 : 2$. Vliv hustoty na difúzi je specifikován vztahem k pórovitosti dřeva, tj. s rostoucí hustotou dřeva klesá pórovitost dřeva a v konsekvenci s tím klesá i koeficient

difúze. Rozdílný průběh v podélném a příčném směru má koeficient difúze také v závislosti na vlhkosti dřeva. Platí, že v podélném směru koeficient difúze s rostoucí vlhkostí klesá, a v příčném směru stoupá až do meze hygroscopicity. Vliv teploty na difúzi vody ve dřevě je značný. S jejím zvyšováním roste totiž intenzita pohybu molekul vody v kapalném nebo plynném skupenství. Pro představu jsou v Tabulka 2 uvedeny hodnoty koeficientu difúze pro nejběžněji používanou dřevinu smrk.

Koeficient difúze smrkového dřeva $10^{10} D$ [$m^2 \cdot s^{-1}$]			
Teplota [°C]	Podélný směr	Radiální směr	Tangenciální směr
20	40,73	2,49	1,96
40	115,48	8,32	6,52
60	281,14	13,92	12,73

Tabulka 2 Hodnoty koeficientu difúze D pro smrkové dřevo (Kurjatko, 1990)

3.3 Pohyb tepla ve dřevě

Pod pojmem teplo se rozumí rozsah změny vnitřní energie, která je vyměněna (přijata, nebo odevzdána) za styku systému s okolím, při němž nedochází ke konání práce. Teplo popisuje procesy konané při vzájemném působení mezi částicemi o různých kinetických energiích. Rychlejší částice předávají při srážkách část své kinetické energie pomalejším částicím. Důsledkem je ochlazení teplejší látky, a naopak zvýšení teploty u chladnější částice. Teplo se označuje Q a jeho jednotkou je J .

3.3.1 Měrné teplo

Schopností každé látky je akumulovat teplo, jejíž veličinou je měrné teplo c . To vyjadřuje, jak velké množství tepla je potřebné pro ohřátí látky o známé hmotnosti m o 1 K.

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

3.3.2 Tepelný tok

Jedná se o množství tepla procházející jednotkou plochy za jednotku času. Tepelný tok probíhá vždy při jednom ze tří typů přenosu tepla a to kondukcí, konvekcí nebo radiací. Jeho jednotka W ($J \cdot s^{-1}$) vychází z podílu přenášeného tepla, Q , a příslušného času, t .

3.3.3 Hustota tepelného toku

Hustotou tepelného toku se označuje tepelný tok připadající na metr čtvereční plochy průtoku tepla. Její definice je učena podílem tepelného toku procházejícího k němu kolmou plochou a plošným obsahem této plochy. Jednotkou hustoty tepelného toku, q , je $W \cdot m^{-2}$.

3.3.4 Součinitel tepelné vodivosti

Materiálová konstanta o jednotce $W.m^{-1}.K^{-1}$ vyjadřuje množství schopnosti stejnorodého, izotropního materiálu vést teplo. Součinitel tepelné vodivosti o nízké hodnotě udává, že daná látka patří k tepelným izolantům. Naopak vysoká hodnota značí tepelné vodiče. Součinitel tepelné vodivosti, λ , u rovinné stěny lze určit jako součin tloušťky stěny, d , a tepelné propustnosti, L .

3.3.5 Součinitel prostupu tepla

Charakterizuje tepelně izolační schopnost soustavy přenášet teplo, které projde rovinnou stěnou o jednom metru čtverečním oddělující dvě plynné nebo kapalně prostředí s rozdílnou teplotou. Jeho hodnota vychází z podílu tepelného toku a teplotního rozdílu obou prostředí.

3.3.6 Šíření tepla ve stavebních konstrukcích

Důvodem šíření tepla prostředím (a šíření vnitřní energie) je teplotní rozdíl na různých místech téhož prostředí, ve kterém teplo postupuje z míst s vyšší teplotou do míst o nižší teplotě. Jedná se tedy o nevratný proces, který probíhá samovolně až do vyrovnání teplotního gradientu. Šíření tepla se děje třemi způsoby, které se převážně při procesu vzájemně doprovázejí. V pevných látkách je nejčastějším způsobem šíření tepla vedení (kondukce). Kondukcí lze přenášet teplo za určitých podmínek i v kapalinách a plynech. Pohyb částic v kapalných a plynných látkách zajišťuje přenos tepla prouděním (konvekcí). Třetí způsob umožňující přenos tepla mezi tělesy je šíření tepla sáláním (radiací), Tento děj je uskutečněn zejména infračerveným zářením a zčásti zářením ultrafialovým a světlem. Přenos tepla v reálných situacích je obvykle kombinací dvou nebo i všech tří uvedených způsobů.

3.3.7 Šíření tepla vedením

Vedení tepla se realizuje při vzniku teplotního gradientu v tělese nebo při bezprostředním styku dvou těles o různé teplotě. Kinetická energie neuspořádaného pohybu teplejších, rychleji kmitajících molekul je předávána interakcí sousedním chladnějším, pomaleji kmitajícím molekulám, a proto je teplo transportováno ve směru klesající teploty. Šíření tepla lze řešit pomocí prvního Fourierova zákona:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T$$

kde:	\vec{q}	je	hustota tepelného toku	$[W.m^{-2}]$,
	λ		součinitel tepelné vodivosti	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$,
	∇T		gradient teploty	$[K.m^{-1}]$.

Tato rovnice platí pouze tehdy, nemění-li se teplota s časem a při jednorozměrném šíření tepla. V homogenním, izotropním tělese je změna teploty ve stacionárním teplotním poli přímková. Pro povrchové teploty konstrukcí, θ_1 , θ_2 , a pro tloušťku, d , bude teplotní gradient:

$$\nabla T = \frac{T_1 - T_2}{d}$$

Rovnice Fourierova zákona potom přechází ve tvar:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

kde: \vec{q} je hustota tepelného toku [W.m⁻²],
 λ součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹],
 ΔT rozdíl teplot (T₁ – T₂) [°C, K],
 d tloušťka konstrukce [m].

Protože prostup tepla připomíná průtok vody potrubím nebo náboje vodičem, je zde možno nalézt řadu analogií. Z tohoto hlediska lze vedení tepla rozdělit také na:

- stacionární vedení tepla, kdy při ustáleném vedení je teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa stálý, tedy nezávislý na čase,
- nestacionární vedení tepla, kdy při neustáleném vedení postupně dochází k vyrovnávání teplotních rozdílů mezi jednotlivými částmi tělesa.

3.3.8 Stacionární vedení tepla

Stacionární vedení tepla nebo pro podobnost děje s difúzí vody vázané ve dřevě také označováno jako stacionární difúze tepla ve dřevě, je popsána I. Fourierovým zákonem, kdy je rovnice v integrálním tvaru.

$$\frac{Q}{St} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Kde Q je množství tepla [J],
 S plocha tělesa [m²],
 t čas [s],
 λ součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹],
 ΔT teplotní rozdíl na koncích tělesa [K],
 Δx vzdálenost rozdílných teplot [m]. (Horáček, 2008)

3.3.9 Nestacionární vedení tepla

Tak jako u nestacionární difúze vody ve dřevě je pro řešení rozložení teploty v čase nezbytné rovnici I. Fourierova zákona ze stacionárního děje derivovat podle času a vzdálenosti. Po zjednodušení rovnice na jednorozměrný systém se získá rovnice tvaru:

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

kde dQ je derivace množství tepla [J],
 dt derivace času [s],
 λ součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹],
 dx derivace vzdálenosti rozdílných koncentrací [m],
 t čas [s],
 x vzdálenost rozdílných koncentrací [m]. (Horáček, 2008)

Při považování součinitele tepelné vodivosti za konstantu a po uplatnění zákona o zachování energie, se řešením parciální rovnice II. Fourierova zákona získá průběh rozložení teploty v materiálu v závislosti na poloze a času.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

kde $\frac{\partial T}{\partial t}$ je parciální derivace teploty [K],
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ parciální derivace času [s],
 α koeficient teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ parciální derivace vzdálenosti rozdílných koncentrací [m]. (Horáček, 2008)

Koeficient teplotní vodivosti má stejný rozměr jako koeficient difúze a vyjadřuje schopnost materiálu vyrovnávat teplotní rozdíly. Převedením do obecného tvaru kartézské souřadné soustavy se získá tvar rovnice:

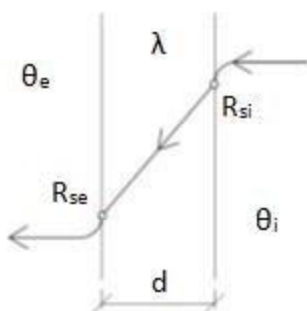
$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

kde c je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 $\frac{\partial T}{\partial t}$ parciální derivace teploty [K],
 $\frac{\partial T}{\partial t}$ parciální derivace času [s],
 λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ parciální derivace vzdálenosti rozdílných koncentrací [m]. (Horáček, 2008)

Opět je nezbytností při řešení těchto rovnic znát okrajové podmínky pro vyrovnání teploty na povrchu tělesa, rozložení teploty v počátečním okamžiku a hodnotu cílové teploty, na kterou se má těleso ochladit.

3.3.10 Prostup tepla konstrukcí

Prostup tepla je charakterizován jako výměna tepla na povrchu konstrukce s okolním vzduchem. K výměně dochází pouze při rozdílu teplot mezi povrchem stěny a okolního prostředí. V případě rozdílných teplot obou prostředí oddělených rovinnou hmotnou stěnou dochází nejen k výměně tepla okolního prostředí a tepla povrchu stěny, ale i přechodu tepla přes konstrukci. To probíhá všemi třemi způsoby šíření tepla. K proudění a sálání (cca 53 %) teplého vzduchu dochází při přestupu tepla z okolního vzduchu na vnitřní povrch stěny, odkud je nadále teplo vedeno přes hmotnou vrstvu konstrukce až na vnější povrch stěny. Zde je přenos tepla zabezpečen do okolního prostředí opět prouděním a sáláním (cca 14 %).



Obr. 1 Prostup tepla stěnou (vlastní zdroj)

θ_i, θ_e – teplota interiéru a exteriéru

R_{si} – tepelný odpor přestupu tepla v interiéru

R_{se} – tepelný odpor přestupu tepla v exteriéru

λ – součinitel tepelné vodivosti

d – tloušťka stěny

Přestup a přechod tepla stěnou se odvíjí od jejich součinitelů tepla. Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně, h_{si} , (vnější straně, h_{se}) je roven součtu součinitele přestupu tepla při proudění a součinitele přestupu tepla při sálání všech konstrukcí v prostředí. Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla na obou stranách jsou nestálé. Jejich ovlivňujícími faktory jsou zejména teplota vzduchu, teplota povrchu konstrukce, drsnost a emisivita povrchu, směr tepelného toku, proudění vzduchu apod. Prostup tepla stěnou je dán tepelnou vodivostí hmotné vrstvy konstrukce. Její materiálovou konstantou je součinitel tepelné vodivosti, λ , jenž je ovlivněn hustotou, pórovitostí a objemovou hmotností látky, dále vlhkostí, teplotou, chemickým složením a směrem tepelného toku. Pro výpočet prostupu tepla konstrukcí se využívá standardizovaných parametrů součinitele tepelné vodivosti.

Součinitel prostupu tepla, který posuzuje tepelný tok prostupující konstrukcemi s eventuálním vlivem tepelných mostů u heterogenních konstrukcí, se zjistí z tepelného odporu dané konstrukce nebo její charakteristické složky a tepelných odporů při přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce.

3.4 Tepelné mosty

Tepelné mosty se vytváří v každé stavební konstrukci v místech, kde dochází ke změně jejího složení nebo v jakémkoli spoji stavebních konstrukcí. Při porovnání konstrukce bez tepelného mostu a stejné konstrukce s tepelnými mosty mají tepelné mosty dva dopady:

- a) změnu hustoty tepelného toku,
- b) změnu vnitřní povrchové teploty.

Tepelný most je tedy část obvodové konstrukce stavby s výraznou změnou tepelného odporu. Tato změna nastává např. změnou tloušťek vrstev skladby konstrukce; použitím materiálů s odlišnou tepelnou vodivostí, při jeho plném či částečném pronikání obalovou konstrukcí nebo rozdílem mezi vnitřní a vnější plochou.

Zmíněné dopady tepelných mostů mají poměrně značný vliv na celý objekt, neboť snížení vnitřní povrchové teploty má za následek kondenzaci vodní páry v konstrukci, což může vést k napadení konstrukce hnilobou, houbami či plísní. Dalším negativem je změna hustoty tepelného toku, která zvyšuje tepelnou ztrátu a tím i potřebu tepla na vytápění. Vzhledem k tomu, že vliv tepelného mostu na tepelně izolační vlastnosti konstrukce může být značný, je nutné ho zohlednit při výpočtu tepelného odporu konstrukce, R , a součinitele prostupu tepla, U .

Tepelné mosty důležité pro výpočet součinitele prostupu tepla můžeme rozdělit na tepelné mosty lineární s jednotným příčným řezem v jednom směru a tepelné mosty bodové, které jsou místně omezeny a nemají shodný řez v libovolném směru.

Šubrt (2003) tepelné mosty dále dělí na:

- stavební (napojení dvou konstrukcí, např. stěna a okno)
- geometrické (geometrické změny konstrukce např. napojení svislé stěny na konstrukci podlahy).
- systematické (opakující se místa s horšími tepelně izolačními vlastnostmi, např. maltové lože mezi cihlami)
- konvektivní (dochází k přenosu energie přes tepelnou izolaci prouděním, např. v netěsných střešních konstrukcích)

„Tepelné mosty vyvolávají tři nebo dvourozměrné tepelné toky, které mohou být stanoveny numerickými výpočtovými metodami. V mnoha případech poskytují dostatečně přesné výsledky numerické metody, založené na řešení dvourozměrného tepelného toku, a také některé zjednodušené metody, které jsou sice méně přesné, ale podstatně jednodušší.“ (Vaverka, 2006)

3.5 Výpočetní metody

Obsažené tepelné mosty v konstrukci jsou nedílnou součástí samotné konstrukce, proto jejich zohlednění při stanovení součinitele prostupu tepla je zajištěno výpočtovými a měřicími metodami. Nejméně přesnou metodou, kterou lze využít při nedostatečné znalosti detailního řešení konstrukcí, je odborný odhad. U certifikovaných či opakovaných konstrukcí lze zjistit přesnější hodnoty vlivu tepelného mostu na prostup tepla pomocí katalogu charakteristických tepelných mostů, který mapuje běžné detaily v různých provedeních. Dalším způsobem pro hodnocení tepelných mostů je využití numerických výpočtů, ty se používají především u nestejnorodých konstrukcí, jako jsou například dřevostavby.

„Velmi přesné výpočtové metody jsou známé jako numerické metody. Tyto numerické metody (např. metoda sítí, metoda konečných prvků) vyžadují pomocné rozdělení uvažovaného objektu. Metoda se skládá z pravidel na vytvoření soustavy rovnic, jejichž počet je úměrný počtu prvků pomocného rozdělení. Soustava se řeší použitím buď přímé metody řešení, nebo iterační metodou. Řešením soustavy jsou obvykle teploty v určitých bodech, ze kterých mohou být odvozeny (interpolací) teploty v kterémkoliv bodě objektu; stejně tak mohou být odvozeny tepelné toky prostupující určitými povrchy.“ (ČSN EN ISO 1011, 2009)

3.5.1 Metoda teplotních sítí

„Metoda sítí spočívá v tom, že v oblasti, ve které hledáme řešení, zvolíme nějakou konečnou množinu, kterou nazveme sítí a příslušné body jejími uzly, a nahradíme derivace, které se vyskytují v dané diferenciální rovnici a v jejích okrajových podmínkách, diferenciálními podíly (tj. lineárními kombinacemi funkčních hodnot v okolních bodech), které

je aproximují. Tím dostaneme místo původního problému soustavu konečně mnoha rovnic pro hodnoty hledané funkce v uzlech.“ (Vitásek, 1994)

Základem pro řešení teplotních sítí je zjednodušení diferenciální rovnice toku tepla s konečnými rozdíly na lineární rovnici. Teplotní pole se rozdělí do čtvercové sítě v průsečících tvořenou uzly. Ve kterých je dále zjišťována příslušná teplota.

„Teplotní pole se volí tak, aby ve sledované oblasti byly obsaženy rozhodující detaily materiálového a tvarového řešení hodnocených konstrukcí a jejich styků, a to v nejméně příznivé kombinaci. Současně aby hraniční řezové roviny, které vymezují sledovanou oblast, byly rovnoběžné se směrem tepelného toku a v rovinách symetrie. Jestliže kritická vzdálenost vychází za rovinou symetrie, potom se hraniční řezová rovina volí v rovině symetrie.“ (Vaverka, 2006)

3.5.2 Metoda konečných prvků

„Základní myšlenka metody konečných prvků vychází z polynomiální interpolace, nikoliv však jedním polynomem na celém intervalu, ale různými polynomy na podintervalech, na které daný interval rozdělíme. Příslušné aproximace jsou pak na jednotlivých podintervalech rovny polynomům nízkých stupňů.“ (Vitásek, 1994)

Postup pro řešení okrajové úlohy metodou konečných prvků je podle Vitáska (1994) následujícími čtyřmi kroky:

- 1) Zvolit prostor konečných prvků a jeho bázi – rozklad nekonečného objemu tělesa na konečný počet prvků. Pro získání přesnějších výsledků doporučuje Rektorys (1999) volit jemnou síť podle tvaru hranice uvažovaného tělesa.
- 2) Sestavit vektor zatížení – součet příspěvků od jednotlivých podintervalů rozkladu
- 3) Řešit vzniklou soustavu rovnic
- 4) Vypočítat hodnoty přibližného řešení v bodech, v nichž nás zajímá.

Metoda konečných prvků patří k metodám, které se používají pro řešení okrajových úloh související s variačním počtem, jejichž řešení je ekvivalentní úloze variačního počtu. To znamená nalezení extrému integrálu dané úlohy. Hlavní výhodou metody konečných prvků je možnost zautomatizování celého výpočtu a tím vytvoření programů pro obecné případy. Další její předností je, že ji lze aplikovat k řešení rozmanitějších případů než použití metody sítí, např. na oblastech s otvory různého tvaru.

3.5.3 Nástroje pro tvorbu analýz

Vzhledem k velkému množství na trhu dostupných nástrojů pro tvorbu modelů a jejich následnou analýzu metodou konečných prvků, zde budou představeny jen ty, se kterými se autor této práce měl možnost setkat a obeznámit v době studií. Jsou to softwary Ansys Mechanical a FlexPDE.

3.5.3.1 Ansys Mechanical

„Software ANSYS Mechanical je komplexní analýza MKP (Metoda konečných prvků). Nástroj pro strukturální analýzy, včetně lineární, nelineární a dynamické studie. Produkt

poskytuje kompletní sadu prvků chování, materiálových modelů a řešitelů rovnic pro širokou škálu mechanických konstrukčních problémů. Kromě toho, ANSYS Mechanical nabízí termické analýzy a fyzikální schopnosti zahrnující akustické, piezoelektrické, tepelně strukturální a termoelektrické analýzy.“ (Ansys, 2015)

3.5.3.2 FlexPDE

„FlexPDE je tvůrce modelů metodou konečných prvků a numerický řešitel založený na skriptech. Má předdefinovaný seznam rovnic (např. momentové rovnice, skalární rovnice) a standardní rovnice (např. konvekce, difúze). Software řeší matematické základy různých oblastí, jako je proudění tepla a vlhkosti, tlakové analýzy, chemické reakce.“ (Kleinstreuer , 2006)

3.6 Hodnoty tepelně – vlhkostních vlastností vybraných materiálů

Materiál	Hustota	Součinitel tepelné vodivosti		Měrná tepelná kapacita	Součinitel difuze vodní páry		Faktor difuzního odporu	
	ρ [kg/m ³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		c [J/kg.K]	δ [s]		μ [-]	
Dřevo		tep. tok			tep. tok		tep. tok	
		⊥ na vlákna	∥ s vlákny		⊥ na vlákna	∥ s vlákny	⊥ na vlákna	∥ s vlákny
Dřevo – měkké	<600	0,18	0,41	2510	0,0012	0,042	157	4,5
Dřevo – tvrdé	>600	0,22	0,49	2510	0,0012	0,042	157	4,5
Kovy								
Ocel	7850	50		490				
Železo	7850	58		440				
Hliník	2700	204		870				
Sklo	2600	0,76		840				
Desky z pěnového skla	120-165	0,044-0,052		840			> 40000	
Stavební keramika								
Cihelný blok tl. 240 mm	800-900	0,38		1000			5	
Keramická dlažba	2000	1,01		840				
Beton hutný	2100-2300	1,23-1,36		1020	0,1-0,008		17-23	
Železobeton	2300-2500	1,43-1,74		1020	0,008-0,006		23-32	
Polymery – pěněny								
Polyuretan pěnový, měkký	35	0,048		800	0,075		2,5	
Polystyren expandovaný EPS	40	0,037		1270	0,0047 - -0,002		40–67	
Polystyren extrudovaný XPS	30	0,034		2060	0,0019		100	
Polymery plné nepěněny								
Linoleum	1200	0,19		1880	0,0001		1880	
PVC tuhý	1380	0,17		1100	0,000002		94000	
Plexisklo	1180	0,19		1465	0,000002		94000	
Mat. na bázi dřeva								
DTD	800	0,18		1500	0,015		12,5	
DVD lisované	200-1000	0,075-0,17		1630	0,015		12,5	
OSB deska	600	0,13		1700			200	

Tabulka 3 Hodnoty tepelně-vlhkostních vlastností vybraných materiálů převzatých z (ČSN 73 0540-3, 2005)

3.7 Systémy staveb na bázi dřeva

Pojem dřevostavba rozhodně nepatří k nějakému novotvaru, což také dosvědčují zmínky v historických knihách. Nejinak je tomu i ve stavebnictví, kdy po staletí lidé využívali přírodní zdroj z lesa, který měli za domem, ke zhotovení nejen své střechy nad hlavou. Díky technologickému vývoji, který neminul ani stavění ze dřeva, představuje výraz dřevostavba rozsáhlý pojem, ve kterém se mohou zákazníci stavebních firem ztrácet. Existuje totiž více než dvacet konstrukčních systémů staveb na bázi dřeva, o kterých nemusí ani určitá část dřevostavbařů zaměřující se často pouze na jeden systém mít dostatečné informace. Jednotlivé typy se mohou navíc prolínat a kombinovat, čímž vznikají další systémy. Jedním z problémů k pojmenování konstrukce je také najít vhodný český ekvivalent k anglickému či německému názvu, který by se stal pro český trh jednotný. Cílem této práce ovšem není uvést všechny zástupce dřevostaveb, ale představit nejvíce využívané typy je zde nutností. Zjednodušeně lze stavby na bázi dřeva rozdělit na do tří kategorií. První kategorií jsou masivní dřevostavby, kam patří srubové, roubené a novodobé masivní stavby z CLT panelů. Druhou kategorií jsou skeletové stavby, které zastupují historické hrázděné stavby, dále pak stavby rozděleny podle použitých dimenzí nosných prvků na stavby těžkého skeletu a lehkého skeletu. Do třetí kategorie používaných systémů staveb na bázi dřeva patří rámové a panelové stavby, které se podobají svou konstrukcí lehkému skeletu, ale z důvodu jejich často využívané prefabrikace jsou zařazovány do kategorie s názvem elementární stavby.

3.7.1 Srubové a roubené stavby

Nejstarší metodou výstavby domů, která se téměř v každé zemi na světě nadále vyvíjela a zachovala dodnes jsou sruby a roubenky. Poptávka po útulném bydlení v blízkosti přírody je spojena s výstavbou srubů a roubenek, proto se moderní dřevařské techniky o stavbu srubů opět zajímají a stavba srubu je tím stále populárnější. Ať už se jedná o bytový dům v masivní dřevěné konstrukci s čtvercovými trámy nebo o srub z kulatin.

I přesto, že výstavba srubů sahá daleko do minulosti, princip stohování masivního dřeva zůstal stejný. Ten spočívá v kladení hraněných či polohraněných trámů (roubenka) nebo kmenů s kulatým průřezem (sруб) na prahový (dubový) věnec horizontálně na sebe. Tendenci ležícího dřeva pohybovat se do strany zabraňují pero a drážka nebo kolíky v určité vzdálenosti. Stabilitu takto položené stěny u srubů zajišťuje zkřížené rohové spojení s polovičním přesazením a u roubenek je to obvykle rybinový spoj. Obvodové stěny se pak zajistí strmou střechou, která působí jako přírodní lis. A její dostatečný přesah chrání horní



trámy / kmeny proti povětrnostním podmínkám.

Obr. 2 Malý srub sloužící pro prodej potravin od zemědělců (vlastní zdroj)

Hlavním charakteristickým znakem těchto staveb je především vysoká řemeslná dovednost a s ní spojený výběr správného dřeva, jehož spotřeba je velmi vysoká, pevná dispozice půdorysu a velká míra sednutí stavby způsobená seschnutím dřeva.

Všechny nevýhody a náklady na provedení jsou kompenzovány skutečností, že srub představuje nejpevnější provedení dřevěného domu a jeho vnitřní strukturu pravděpodobně nelze nikdy zničit. Dokazují to struktury tohoto typu staré tisíciletí, které lze dnes používat ve všech zemích světa. Kromě vysoce kvalitních vlastností konstrukce, také vykazuje nejčistší přírodně pěstovaný materiál – dřevo.

3.7.2 Moderní stavby z masivního dřeva (CLT panely)

Dle Kolba (2011) se za masivní dřevostavby považují takové stavby, na jejichž nosných konstrukcích má dřevěný masiv alespoň poloviční podíl. Tuto definici splňují také



roubené a srubové stavby, ale ty se svým historickým významem jsou v jiné podkapitole. Dnes se používají moderní, automatizované výrobní procesy a masivní budovy mohou být konstruovány z prefabrikovaných vícevrstevných prvků. Tím se dosáhne řízené tepelné izolace a lepší těsnosti spojů.

V Rakousku v polovině devadesátých let začala vznikat technologie vrstvených panelů, což vedlo k zavedení nového konstrukčního systému výstavby dřevostaveb z CLT panelů. Anglický výraz Cross-laminated timber označován zkratkou CLT nebo méně používaným označením X-LAM, popisuje doslova technologii této konstrukce.

„Základem je dřevěný panel složený z určitého množství vzájemně kolmých vrstev. Každá jednotlivá vrstva je dále složena z masivních lamel. Vrstvy jsou slisovány a vzájemně za studena slepeny. Vzniká tak křížem lepená deska, kterou lze dle požadovaných vlastností použít pro nosnou konstrukci stěn, stropu a střechy. Kolmé směřování lamel sousedících vrstev zajišťuje vysokou tvarovou stálost elementů. Počet vrstev v panelu je minimálně tři, maximálně z pravidla sedm. Tloušťka panelů se běžně pohybuje od 60 do 240 mm.“ (Pavlas, 2016)

Obr. 3 Vícepodlažní dům z CLT panelů (XLAM Dolomiti, 2019)

Výstavba z CLT panelů si přímo žádá vysokou míru prefabrikace, čímž se zvyšuje prostor architektury, a hlavně se dosahuje nejvyšší možné kvality provedení. Následný proces výstavby je pak velmi rychlý a nevyžaduje vysoce kvalifikovanou pracovní sílu. Malé tloušťky stěn budov z CLT panelů zvětšují přibližně o 10 % obytný prostor a mají až pětkrát menší zatížení ve srovnání s tradiční mokrou výstavbou, což snižuje cenu základové konstrukce. Vzhledem k izolačním vlastnostem dřeva a jeho velkého podílu na obvodovém plášti je dům z masivního dřeva variantou s minimálním počtem tepelných mostů. V neposlední řadě konstrukční systém dřevěných panelů z masivních vrstvených lamel

vykazuje velkou stabilitu a tuhost již při malých tloušťkách. Čímž je zajištěna schopnost odolávat zemětřesením a požárům.

„Ve srovnání s jinými konstrukcemi mají masivní dřevěné konstrukce významné výhody také z hlediska seismické bezpečnosti, protože takové budovy dokáží odolat i těm největším seismickým silám bez podstatného poškození.

Panely z masivního dřeva jsou ohnivzdorné (tj. Je obtížně vznětlivé) a shoří pouze na povrchu, zatímco vnitřní dřevěné jádro si zachovává svou nosnost; oheň postupuje ne více než dva až tři centimetry do struktury, po které mu dojde kyslík potřebný ke spálení.“ (CBD, 2015)

3.7.3 Hrázděné stavby

Současný trend nízkoenergetického stavění klasickým hrázděným stavbám s nosnou konstrukcí viditelnou z venkovní strany moc nepřeje. Ale i přesto hrázděné stavby mají ještě své místo na trhu.

„Pro různá použití např. pro zemědělství nebo pro jednoduché jednopodlažní až nejvýše dvoupodlažní účelové stavby jsou dřevěné hrázděné stavby stále ještě hospodárné, ovšem většinou s obloženou nosnou konstrukcí. Moderní přesné tesařské stroje nebo výrobní linky řízené počítačem vedou společně s novými poznatky a metodami pro vysoušení dřeva k hospodárnosti hrázděných staveb pro uvedená použití. Čepy a zapuštění jsou příznivější spojovací prostředky než tvarové součásti z plechu nebo ocelové části. Důvod spočívá ve skutečnosti, že u dřevěných prvků uspořádaných v malých vzdálenostech jsou spoje namáhány pouze málo. U hrázděných staveb dochází k přenosu svislých zatížení přímo kontaktními styky dřeva.“ (Kolb, 2011)



Obr. 4 Moderní hrázděná stavba s viditelnou nosnou konstrukcí (www.dlk-melle.de)

3.7.4 Těžké skeletové stavby

Shodou několika skutečností jako jsou vývoj nových technologií a spojovacích prvků, požadavků mnohem větších ploch oken a v neposlední řadě pracnému zhotovení hrázděných staveb se začaly stavět stavby skeletové.

„Skeletová stavba je charakteristická vytvořením nosné kostry z tyčových prvků, která musí být schopna přenést veškerá zatížení na konstrukci působící do základů, bez spolupůsobení stěn nebo výztužného opláštění, jako je tomu např. u staveb rámových.“ (Vaverka, a další, 2008)

„Nové spojovací prvky a použití BSH hranolů redukuje počet uzlů. To umožňuje široké rozpětí, a přesto filigránské konstrukce. Na druhou stranu, velké rozestupy sloupů a podpěr, které obvykle pokrývají několik podlaží, vyžadují sofistikovanou technologii detailů a montáže. V mnoha případech zůstává struktura viditelná. Otevřená nosná struktura pak tvaruje architektonický tvar celé konstrukce.“ (Luedi, 2007)



Obr. 5 Moderní skeletová dřevostavba (www.cerdo-fachwerkhaus.de)

Jak uvádí Conti, 2016, má nosná konstrukce tohoto typu konstrukce nezávislost na elementech obklopujících místnost, proto je velmi flexibilní v uspořádání půdorysu. Bohužel se stavba skeletu obytné výstavbě většinou vyhýbá a používá se pouze pro sofistikované jednotlivé budovy. Na druhou stranu je čím dál častěji implementována pro veřejné a komerční využití.

3.7.5 Lehké skeletové stavby (Two by Four, sloupkový systém)

„Systém dřevostavby *Two by Four (TBF)* vznikl ve druhé polovině 19. století v USA a je dosud nejpoužívanějším systémem moderních dřevostaveb. Přesněji řečeno dřevostaveb, u nichž je základním konstrukčním prvkem fošna vytvářející rovinný rám, a to nezávisle na případné míře prefabrikace. Většina současných prefabrikovaných systémů dřevostaveb vychází rovněž z *TBF*.“ (Růžička, 2014)

Základními typy lehkých skeletových staveb jsou *Balloon-Frame* a *Platform-Frame*. U systému **Balloon-Frame** (Obr. 6) procházejí stěnové sloupky od soklu až po okap průběžně přes dvě nebo více podlaží. Sloupky jsou uzavřeny dole prahem a u okapu vaznicí. Stropní nosníky jsou uloženy na stojaté fošně, která je buď zapuštěna do zářezů stěnových sloupků, nebo radikálně posunuta více do interiéru a zavěšena na probíhající svislou stěnu. Tím je vyloučen tepelný most a parotěsnou fólii lze vést bez porušení dál. Velkou pozornost je ale potřeba věnovat přenosu zatížení ze stropních trámů.



Obr. 6 (vpravo) Model konstrukčního systému *Balloon-Frame* (Inspections, 2015)

Obr. 7 (dole) Model konstrukčního systému *Platform-Frame* (4DZ, 2007)



Charakteristickým znakem **Platform-Frame** (Obr. 7) je patrová výstavba. Tedy stropní nosník je uložen na svislé obvodové stěně, čímž vzniká plošina pro výstavbu dalšího podlaží. Z tepelně technického hlediska je tento systém nevýhodný, protože je zde nutností vyřešit nežádoucí tepelný most v místě napojení stropní konstrukce na svislou obvodovou konstrukci.

Použití lehkého skeletu má mnohé výhody jako například výrobní a

montážní technickou nenáročnost, náklady na výrobní režii, a hlavně pružné řešení problémů a změn při výrobě a montáži probíhajících přímo na staveništi. S tím se ale pojí i hlavní nevýhoda těchto systémů, protože stavba je po celou dobu výroby a montáže vystavena působení povětrnostním vlivům.

„Dnes platí, že sloupkové stavby nebo podle jejich původních názvů označené stavební systémy Balloon-Frame nebo Platform-Frame jsou přinejmenším v Evropě nahrazeny kvalitativně lepšími rámovými stavbami.“ (Kolb, 2011)

3.7.6 Rámové stavby (panelové stavby)

Většina typů dřevostaveb mají možnost být určitým stupněm prefabrikovány a nejinak je tomu i u dřevostaveb rámových. Zde přichází na řadu hlavní rozdíl mezi rámovou a panelovou dřevostavbou. Jak uvádí (Vaverka, a další, 2008) je panelová dřevostavba větším stupněm prefabrikace dřevostavby rámové. Rámové stavby na bázi dřeva lze rozdělit na stavby realizované přímo na staveništi z jednotlivých přířezů a na stavby prováděné ve výrobní hale z dřevěných ráků s jednostranným opláštěním. V případě výstavby z panelů je před zahájením staveništní montáže sestaven oboustranně opláštěný dřevěný rám, který je případně doplněn tepelnou izolací a dle míry prefabrikace mohou být provedeny rozvody instalací, povrchové úpravy nebo například osazení oken a dveří. Záleží vždy na možnosti použití těžké techniky pro výrobu, přepravu a výstavbu.

Prefabrikovaná konstrukce rámové dřevostavby, tedy stavby z panelů je díky své jednoduchosti a vynikající tepelné izolaci i u tenkých stěn v současnosti nejrozšířenější způsob výstavby dřevostaveb používaný ve střední Evropě. Při výstavbě z panelů totiž odpadá nutnost provádět výrobu velkých elementů přímo na staveništi a umožňuje standardizaci a prefabrikaci konstrukčních prvků.



Obr. 8 (nahore) Rámová dřevostavba 3. den výstavby (vlastní zdroj)



Obr. 9 (vlevo) Rámová dřevostavba při předání majiteli (vlastní zdroj)

Rámová konstrukce je tvořena kostrou ze stojek a prahů ve většině případech používaném průřezu 60 x 120 mm. Při velkých zatíženích se volí průřez větší, například 80 x 120 mm. Stojky jsou k prahům přitlučeny hřebíky nebo šroubovány vruty v opakující se vzdálenosti, nejčastěji 400–650 mm. Samozřejmě rám obsahuje také okenní a dveřní výplně, jejichž konstrukce se vkládají do standardní modulace prvků.

Metoda konstrukce se vyznačuje tím, že nosný dřevěný rám z tyčových prvků je oboustranně potažen deskovými materiály. Tyto desky, sloužící k vytvoření plochého prvku a vyztužení dřevěného rámu, mohou být z různorodých materiálů. Nejběžněji používanými jsou však dřevotřískové desky, dřevovláknité desky a sádrokartonové desky.

Jednoduchost tohoto systému umožňuje integraci s dalšími systémy výstavby, jak s materiály na bázi dřeva, tak i jinými materiály. V praxi je velmi běžné potkat se například s více patrovou budovou, kdy první patro, nebo sklep je vystavěn ze zdiva a na něm ležící patro je rámové dřevěné konstrukce. Při zachování přírodního materiálu se vyskytují například také kombinace prvního patra o provedení rámové dřevěné konstrukce a druhého patra z masivních kulatin stohovaných do srubu.

„V moderních rámových stavbách je izolace přednostně vytvořena ve dvou úrovních. První úroveň je v rovině nosné konstrukce a druhá úroveň je připojena zvenku na nosné prvky jako tzv. venkovní izolace. Stropní a střešní přechody, ale také rohy budovy jsou homogenně izolovány. Tepelné mosty zapříčiněné polohou dřevěných prvků v rovině nosné konstrukce jsou redukovány na minimum. Skladby s dvouvrstvými nebo třívrstevnými izolačními vrstvami jsou vhodné pro stavby se stavebním standardem jako nulová energie, pasivní dům atd. Kromě dvou a třívrstevných skladeb, které jsou založeny na běžném principu rámových staveb, jsou k dispozici další skladby.“ (Kolb, 2011)

3.7.7 Obálka budovy

Na plášť budovy jsou kladeny vysoké požadavky vyplývající z různých účinků na jeho konstrukci. Aby těmto požadavkům bylo vyhověno, musí plášť budovy následující funkce nejen splňovat, ale funkce také musí být vzájemně v souladu:

- Ochrana před povětrností je zajištěna vnějším obkladem s dostatečným přesahem střechy.
- Tepelná ochrana – aby bylo zabráněno únikům tepla, je v konstrukci použita tepelná izolace
- Ochrana konstrukce před vlhkostí může být zajištěna dvěma způsoby. A to v případě *difuzně uzavřených skladeb* parozábranou, která vstup vlhkosti do konstrukce vůbec nepřipouští. Nebo regulací pomocí parobrzdý množství vodní páry vstupující do konstrukce a zajištění teplotním spádem konstrukční skladby volný průchod vodní páry do exteriéru, což je zásadním pravidlem *difuzně otevřených skladeb*.
- Neprůvzdušnost neboli vzduchotěsnost objektu se vytváří z OSB desek nebo pomocí vzduchonepropustných folií.
- Zvuková izolace – jelikož dřevo má nízkou plošnou hmotnost a tím patří k slabým zvukovým izolantům je třeba požadované hodnoty zvukové izolace dosáhnout ostatními pružnými materiály jako jsou vzduch a vláknité izolace.
- Protipožární ochrana

„Vytvořením požárních úseků se sleduje, aby se během požadované doby zabránilo rozšíření ohně a kouře na sousední požární úseky a současně byla umožněna účinná likvidace požáru. Pokud jsou stěny nosné, musí během požadované doby v případě požáru odolávat.“ (Kolb, 2011)

3.8 Vlhkost v dřevostavbě

Velkou pozornost při návrhu skladby konstrukce si zaslouží hlavně ochrana konstrukce před vlhkostí. Dřevo je totiž jako hygroskopický materiál schopno vázat vodu, kterou nejčastěji pohlcuje z okolní vzdušné vlhkosti. Každá konstrukce na bázi dřeva tedy nezbytně obsahuje jisté množství vázané vody. Její množství není konstantní a odvíjí se od klimatických podmínek, kterým je dřevěná konstrukce vystavena. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole o pohybu vody ve dřevě, má vlhkost obsažená ve dřevě tendenci se ustálit na tzv. rovnovážné (sorpční) hodnotě vlhkosti. Ta nesmí překročit hranici, kdy dochází k podmínkám vhodným pro vznik dřevokazných procesů. Riziko při nadměrné vlhkosti v konstrukci nevzniká jen u materiálů na bázi dřeva, ale také u izolací, a to i přes úsilí výrobců tepelných izolací minimalizovat jejich vlastnost absorbovat vlhkost. Zvýšená vlhkost u izolačního materiálu znamená totiž snížení izolačních vlastností a také možnost vzniku plísní. Pro lepší pochopení problematiky vlhkosti v konstrukci, je důležité si definovat, co je to rosný bod. Schopnost vzduchu přijímat do sebe vlhkost roste se stoupající teplotou, má však svůj limit, kterým je rosný bod. Rosným bodem je pak teplota, při které kondenzuje vodní pára na vodu. Tedy při stoprocentním nasycení vzduchu vodními parami dosahuje relativní vlhkost 100 % a dochází ke změně skupenství vodní páry na vodu, čímž je dosaženo rosného bodu.

„Teplota rosného bodu stoupá při vyšší absolutní vlhkosti vzduchu – v praxi to znamená, že čím je více vlhkosti ve vzduchu, tím musí být vyšší teplota vzduchu, aniž by se pára obsažená ve vzduchu začala srážet na vodu (vzduch tedy v případě vyšší teploty dokáže pojmout více vody). Pokud se vzduch začne ochlazovat, vodní páry začnou kondenzovat (např. rosa v létě, nebo při sprchování se rosí zrcadlo).“ (izolace-info.cz, 2013)

Proto je velmi důležité navrhovat skladbu konstrukce tak, aby se rosný bod nacházel mimo konstrukci anebo aby se v ideálním řešení vlhkost, která by mohla v konstrukci zkondenzovat, do ní vůbec nedostala. Riziko kondenzace vody v konstrukci nastává tehdy, když relativní vzdušná vlhkost je vyšší než 80 %. Podle Horáčka 2008 dochází v mikro- a mezokapilárách dřeva ke kapilární kondenzaci už při relativní vlhkosti vzduchu vyšší než 70 %.

3.9 Vývoj tepelně energetických požadavků pro ochranu budov

„Není to pouze sílící tlak na úsilí zaměřené na eliminování dopadů civilizačních vymožeností na ekologii a vnější prostředí v širším měřítku, ale především neustálé se zvyšující ceny energií, které vedou majitele stávajících, ale i stavitele nových objektů ke snižování tepelných ztrát budov a tím i snižování spotřeby energií na vytápění.“ (Velfel, 2010).

Legislativní stavební předpisy budov na tepelné vlastnosti obvodových konstrukcí se objevují již ve druhé polovině 19. století po formulování prvního a druhého zákona termodynamiky (1850) a vysvětlení základního rozdílu mezi mechanickými a

termodynamickými ději L. Boltzmannem. Ten říká, že mechanické děje mohou probíhat i v obráceném směru, tudíž je lze označit za vratné. Tepelné pochody jsou však nevratné.

V ČR se zamezením úniků tepla zabývá norma ČSN 73 0540-2 z roku 2011, která se revidovala a zpřísnovala požadavky na tepelné vlastnosti stavebních materiálů až po současné platné ustanovení. Konkrétní hodnoty dříve používaných a současných norem jsou uvedeny v Tabulka 4.

Vývoj součinitele prostupu tepla

	Rok 1962	Rok 1964	Rok 1977	Rok 1992	Rok 1994	Rok 2002		Rok 2005		Rok 2007		Rok 2011		2020
	Norma vydání 1962	Norma vydání 1963	Norma vydání 1977	Norma vydání 1992	Norma vydání 1994	Norma, vydání 2002		Norma, změna 2005		Norma, změna 2007		Norma, změna 2011		Směrnice - ČSN 73 0540-2:2007
	U_i [W/(m ² ·K)]					U_i [W/(m ² ·K)]		U_i [W/(m ² ·K)]		U_i [W/(m ² ·K)]		U_i [W/(m ² ·K)]		U_i [W/(m ² ·K)]
						Požad.	Dopor.	Požad.	Dopor.	Požad.	Dopor.	Požad.	Dopor.	cca (Dopor.)
střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně *	0,67	0,67	0,51	0,33	0,32 0,38	0,30 (0,24)	0,20 (0,16)	0,24	0,16	0,24	0,16	0,24	0,16	0,16
podlaha nad venkovním prostorem	0,96	0,96	1,04	0,67	0,32	0,6	0,4	0,6	0,4	0,24	0,16	0,24	0,16	0,16
strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace)	0,67	0,67	0,97	0,37	0,33	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2
stěna vnější *	1,09	1,08	0,89	0,50	0,46	0,38 (0,30)	0,25 (0,20)	0,38 (0,30)	0,25 (0,20)	0,38 (0,30)	0,25 (0,20)	0,30 (0,30)	0,25 (0,20)	0,2
okno, dveře a jiná výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí **			3,70 (4,76)	3	2,9	1,80 (2,00)	1,2 (1,35)	1,7	1,2	1,7	1,2	1,5	1,2	1,2
Podlaha a stěna přilehlá k zemině					0,80	0,60	0,40	0,60	0,40	0,45	0,30	0,45	0,30	0,3

Hodnoty platí pro -15 °C venkovní teploty a +20 vnitřní teploty (platí především pro starší hodnoty)

* Hodnoty pro těžké konstrukce (v závorce pro lehké) konstrukce)

** Hodnoty pro novostavby (v závorce hodnoty pro rekonstrukce)

Tabulka 4 Vývoj součinitele prostupu tepla (Karásek, a další, 2017)

Hodnoty z tabulky dokazují, že nároky na snížení tepelných ztrát se v průběhu let zvyšovaly. U obvodových stěn se mezní hodnoty změnilo o více než 80 %. Ke změnám povolených hodnot součinitele prostupu tepla docházelo z mnoha důvodů. Zprv změna reagovala na tehdejší skutečnost používání součinitele prostupu tepla hodnoceného na ekvivalent cihlového zdiva z plných pálených cihel tloušťky 450 mm. Ve znění ČSN 73 0540 z roku 1964 byly mimo jiné uvedeny také závazné požadavky na minimální hodnotu tepelného odporu obvodových a vnitřních konstrukcí a vnitřní povrchovou teplotu na zamezení kondenzace na vnitřním povrchu stavební konstrukce. V dalších letech se změny norem týkaly především zabezpečení hygienických podmínek zabývající se např. zamezením vzniku plísní a podmínek tepelné pohody.

Energetické kritérium platící i v současnosti udává požadavky na maximální měrnou potřebu tepla na vytápění, jež je stanovena jako maximální spotřeba energie obestavěného prostoru na základě tepelných ztrát. Tepelné ztráty objektu jsou z velké míry ovlivněny prostupem tepla a větráním.

Od 1. ledna 2020 vychází ze směrnice Evropského parlamentu požadavek na výstavbu NZEB (Nearly zero-energy buildings). Budovou s téměř nulovou spotřebou energie se rozumí budova, která má kvalitativně přísnější požadavky na obálku budovy, dobře regulovatelné vytápění, větrání i osvětlení, technické systémy pokrývající potřebu energie s vysokou účinností. A současně spotřeba energie budovy je ve značném rozsahu pokryta z obnovitelných zdrojů, případně energii produkuje sama.

4 Vlastní práce

4.1 Projekt TAČR

Tato diplomová práce vychází a pracuje s daty získané v rámci projektu TAČR TH2020792 Vývoj metodiky stanovení tepelně-optimalizovaných parametrů obytných dřevěných stavebních konstrukcí z pohledu kvality vnitřního prostředí, snížení energetické náročnosti a environmentálních faktorů budov v návaznosti na snížení skleníkových plynů v letech 2017–2019. Na kterém se podílela jako hlavní účastník firma RD Rýmařov s. r. o. a dalšími účastníky byla Fakulta lesnická a dřevařská z České zemědělské univerzity v Praze a České vysoké učení technické v Praze zastupovala Fakulta elektrotechnická.

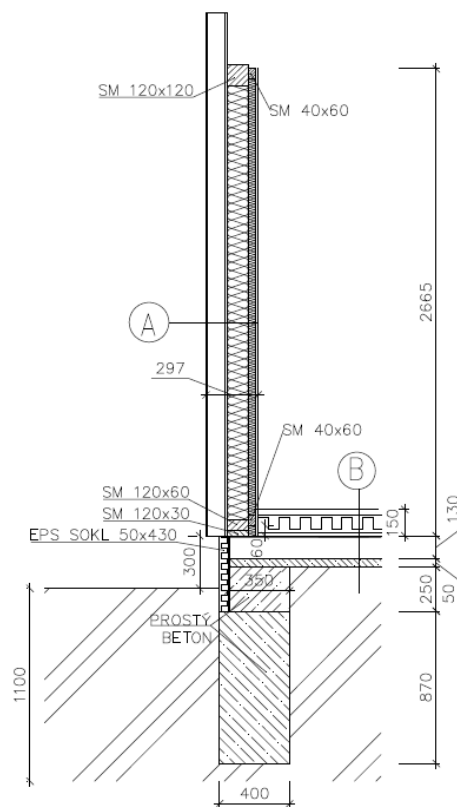
4.2 Materiál

4.2.1 Konstrukční detail

Pro posouzení chování tepelných vlastností a možné kondenzace vodní páry v konstrukčním detailu byla z uvedeného projektu mnou vybrána dřevostavba v okrese Prostějov spadající do Olomouckého kraje. V této lokalitě se průměrné měsíční venkovní teploty pohybují nad hranicí průměrné měsíční venkovní teploty v České republice. Rámová dřevostavba s difúzně uzavřenou skladbou konstrukce byla dokončena v říjnu roku 2017. Jedná se o obdélníkový dvoupodlažní rodinný dům bez podsklepení. Jako posuzovaný konstrukční detail byl zvolen napojení svislé obvodové stěny s konstrukcí podlahy v místnosti obývacího pokoje v 1. nadzemním podlaží. Který, jak již bylo uvedeno v kapitole 3.4., zahrnuje tepelný most způsobený geometrickými změnami konstrukce. Výkresy domu včetně řezu a detailu jsou k dispozici ve volně vložené příloze na konci knihy.

Obvodové stěny (skladba A) mají nosnou konstrukci tvořenou konstrukčním rámem ze smrkových sloupků 60x120 mm proloženými minerální izolací z exteriérové strany zaklopené Fermacellovou deskou 15 mm. Z vnitřní strany sloupků je připevněná polyethylenová fólie sloužící jako parozábrana. Druhý stupeň izolace zde vytváří laťový rošt s tepelnou izolací o tloušťce 40 mm. To celé je z interiérové strany zaklopené Fermacellovou deskou 15 mm. Z exteriérové strany směrem ke konstrukčnímu rámu je třetím stupněm izolace kontaktní zateplovací systém, sestávající z 7 mm omítky a 100 mm šedého polystyrenu.

Konstrukční skladba podlahy (skladba B) je tvořena shora dolů podlahovou krytinou, 5 mm, položenou na dvojité dřevovláknité desce, 2x 12,5 mm. Izolaci zastává podlahový polystyren o tloušťce 100 mm, který je oddělen od železobetonové základové desky, 130 mm, suchým podsypem, 20 mm, a polyethylenovou folií. Na základových pasech je ještě 50 mm vrstva prostého betonu.



Obr. 10 Geometrie konstrukčního detailu napojení svislé stěny na konstrukci podlahy (vlastní zdroj)

4.2.2 Materiálové konstanty posuzovaného detailu

Druh výrobku	Výrobce	Výrobek	Tloušťka	Součinitel tepelné vodivosti	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Součinitel difuze vodní páry	Faktor difuzního odporu	Zdroj
			d	λ	c	ρ	δ	μ	
			m	W/m.K	J/kg.K	kg/m ³	s	-	
Omítka	Baumit	StarTop	0,007	0,18	850	1800		30-40	www.baumit.cz, ČSN 73 0540-3
Šedý polystyren	Isover	EPS Grey Wall	0,1	0,032	1270	13,5-15		20-40	www.isover.cz
Fermacell	Fermacell		0,015	0,32	1100	1150		13	www.fermacel.cz
Dřevěný rám	SM		0,12	0,18	2510	400	0,0012	157	ČSN 73 0540-3
Tepelná izolace	Isover	UNI 120	0,12	0,035	800	40		1	www.isover.cz
PE Folie	Alujet	AF Super	0,0003	0,35	1470	1470	30 000 000		www.alujet.cz
Dřevěný rošt	SM		0,04	0,18	2510	400	0,0012	157	ČSN 73 0540-3
Tepelná izolace	Isover	piano	0,04	0,037	840	15		1	www.isover.cz
Fermacell	Fermacell		0,015	0,32	1100	1150		13	www.fermacel.cz
Podlah. Krytina	-	PVC	0,005	0,2	1100	1380		94000	ČSN 73 0540-3
2 x DTD	Kronospan	DTD PB - P5	0,025	0,11	1500	800	0,00356		www.kronospan.cz ; ČSN 73 0540 - 3
Podlah. polystyren	Isover	EPS 100	0,1	0,037	1270	18-20		30-70	www.isover.cz
Suchý podsyp	Rigips	-	0,02	0,16	1260	450		2,5-4,5	www.rigips.cz, ČSN 73 0540-3
PE Folie	Alujet	AF Super	0,0003	0,35	1470	1470	30 000 000		www.alujet.cz
Železobeton	-	-	0,13	1,58	1020	2400		29	ČSN 73 0540-3
Prostý beton	-	-	0,05	1,36	1020	2300		23	ČSN 73 0540-3
Zemina	-	-	-	1,4	920	1800		1,5	ČSN 73 0540-3
Soklový polystyren	Isover	EPS Sokl 3000	0,05	0,035	1270	23-25		30-70	www.isover.cz

Tabulka 5 Hodnoty vlastností materiálů použitých v konstrukci

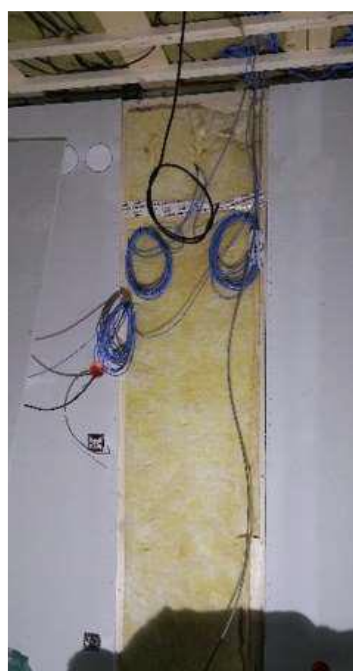
4.2.3 Experimentální měření

Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, zvolená dřevostavba je součástí projektu, jehož jednou z hlavních náplní práce je dlouhodobé monitorování vnitřního prostředí celé budovy za reálných vnějších podmínek. Od konce roku 2017, kdy byl měřicí systém zprovozněn, do začátku roku 2019, byly kontinuálně zaznamenávány následující veličiny:

- teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu ve vnitřním prostředí a v exteriéru,
- povrchové teploty obvodových konstrukcí,
- teploty a relativní vlhkosti uvnitř obvodových konstrukcí,
- teploty v podlahové konstrukci,
- koncentrace CO₂ v interiéru.



Obr. 11 Instalace teplotně vlhkostních senzorů do podhledu stropní konstrukce (Projekt TH202079)

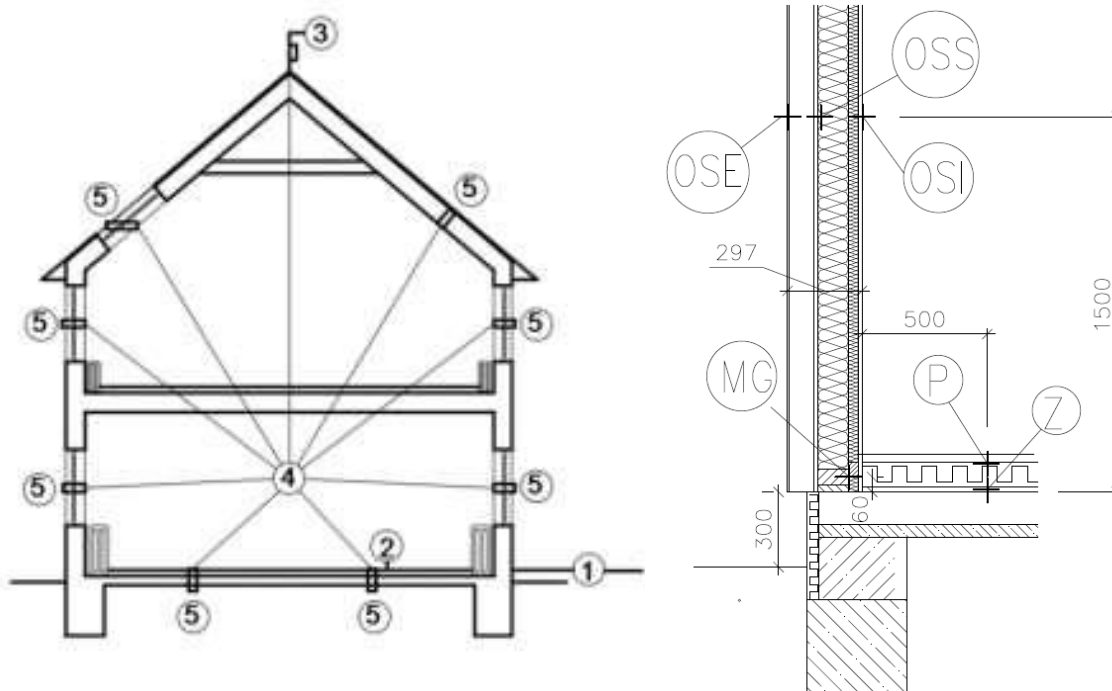


Obr. 12 Instalace teplotně vlhkostních senzorů do svislé konstrukce (Projekt TH202079)

Z důvodu prefabrikovaného systému výstavby a možnosti odvedení více kvalitativní práce, musela být měřicí čidla instalována již při sestavování dřevěných panelů v pracovní dílně pod dohledem kompetentních odborníků. Zbylé práce včetně instalace meteostanice byly dodatečně připevněny ke konstrukci až na staveništi pod odborným dohledem.

Čidla uložená v budově jsou na každé světové straně v obvodové stěně, podlaze a také v konstrukci střechy, viz Obr. 13. Dva senzory pro zjištění teploty a relativní vlhkosti vzduchu jsou umístěny v obývacím pokoji a ložnici. Meteostanice je nainstalována na hřebenu střechy. Poloha měřících senzorů využitých v této práci je zakreslena na Obr. 14.

„Dva teplotní sensory a jeden teplotně vlhkostní sensor umístěné v jednom místě zajišťují zkoumání tepelného toku skrz jednotlivé části sendvičové struktury stěny. Sensor teploty je polohován v termofasádě stavby z vnější strany a ve fermacellové desce ze strany vnitřní. Uprostřed stěny je teplotně vlhkostní sensor v tepelné izolaci v klicce kvůli riziku kontaktu s izolací.“ (Jarolímková, 2019)



Obr. 13 (vlevo) Rozmístění monitorovacích čidel v budově (Projekt TH202079)

Obr. 14 (vpravo) Geometrie polohy čidel v posuzovaném detailu (vlastní zdroj)

Legenda k popiskům na Obr. 13 a na Obr. 14.

- 1 – snímač celkové spotřeby energie v budově,
- 2 – oddělený snímač spotřebované energie jen na vytápění,
- 3 – meteostanice k získání meteorologických hodnot o teplotním namáhání stavby,
- 4 – sběrnice dat a jednotka LTE pro převod dat na centrální počítač,
- 5 – seskupení monitorujících senzorů,
- OSI – teplotní senzor měřící povrchové teploty na obvodové stěně v interiéru (zasádrován v desce fermacellu),
- OSS – teplotně-vlhkostní senzor monitorující chování vodní páry a tepla uvnitř svislé obvodové konstrukce (mezi tepelnou izolací a fermacellovou deskou),
- OSE – teplotní senzor měřící povrchové teploty na obvodové stěně v exteriéru (v omítce),
- MG – teplotně-vlhkostní senzor monitorující chování vodní páry a tepla u styku svislé obvodové konstrukce a železobetonové desky,
- P – teplotní senzor uložený pod podlahovým dílcem,
- Z – teplotní senzor uložený pod podlahovým polystyrenem.

4.3 Metodika

4.3.1 Experiment

4.3.1.1 Naměřená data z projektu

Po zvolení jednoho z monitorovaných domů v rámci projektu popsaném výše bylo nezbytné získat veškerá naměřená data týkající se vybraného domu za co nejdější období. Průběh sběru a přenosu dat popisují autoři projektu TAČR TH2020792 ve své závěrečné odborné zprávě.

„Vyvinutý software můžeme rozdělit na čtyři aplikace. První aplikace zajišťuje pravidelné sbírání naměřených dat z každého domu s možností sběru každých 15 minut, které se ukládají do relační databáze. Druhá aplikace slouží ke stahování dat z databáze do daného počítače v podobě Excel souborů. Další dvě aplikace slouží pro kontrolu instalace senzorů a nastavení sledovaných hodnot před samotnou instalací.“ (Pohloudek, a další, 2017)

Centrální počítač, na který bylo stahováno průběžně velké množství dat za rok 2018 se nacházel na území České zemědělské univerzity v Praze. Tento fakt umožnil autorovi této diplomové práce se na získávání a následném třídění a řazení dat podílet svou činností.

4.3.1.2 Výkresová dokumentace

Po oslovení firmy podílející se na projektu výstavbou domů určených pro monitoring. Byla poskytnuta výkresová dokumentace, doplněna o konkrétní informace o použitých materiálech. Pro účely této práce byla lehce (aniž by se změnila konstrukční skladby) upravena výkresová dokumentace. Jelikož v dodané výkresové dokumentaci nebyl detail posuzovaného spoje součástí. Bylo tedy podmínkou pro pokračování v této práci jej na základě dostupných informací vytvořit.

4.3.2 Model

4.3.2.1 Zvolení výpočetního softwaru

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole o softwarech používaných k výpočtům metodou konečných prvků, označovanou anglickou zkratkou FEM (Finite element method), nabízelo se několik výpočetních nástrojů. Z důvodu doposud získaných vlastních znalostí pouze o dvou z nich se do finálního výběru dostal pouze Ansys Mechanical a FlexPDE.

Oba softwary skýtají spoustu možností a dovedností, které by ani nebylo možné v této práci využít. Oba jsou také na internetu nabízeny ve studentské verzi volně ke stažení. Proto o zvolení nakonec rozhodl nižší nárok na výpočetní techniku, který byl zaznamenán v případě softwaru FlexPDE.

4.3.2.2 Vyhledání hodnot vlastností materiálů

Za účelem vytvoření modelu a přidělení okrajových podmínek pro výpočet, byly vyhledávány hodnoty vlastností použitých materiálů ve skladbách posuzovaného detailu, tedy konstrukční skladbě obvodové stěny a konstrukce podlahy. Vlastnosti materiálů byly převzaty převážně z normy ČSN 73 0540 zabývající se tepelnou ochranou budov, konkrétně z její třetí části, která obsahuje návrhové hodnoty veličin. Pokud se jednalo o konkrétní

materiály s uvedením výrobce, byly zapotřebí dohledat technické listy materiálů na webových stránkách uvedených výrobců. Vyhledávanými vlastnostmi byla hustota, součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita, součinitel difuze vodní páry a faktor difuzního odporu. Veškeré nalezené konstanty jsou uvedeny a ozdrojovány v Tabulka 5.

4.3.2.3 Modelace detailu a přiřazení okrajových podmínek v software FlexPDE

Modelace detailu a jemu přiřazení okrajových podmínek se v software FlexPDE provádělo psaným textem do textového souboru – skriptu. Jelikož software nerozeznává české znaky, bylo vše napsáno bez diakritiky. Použitý skript pro stacionární i nestacionární výpočet je uveden v příloze na konci této práce.

Takto byly vytvořeny dva skripty. Jeden pro stacionární podmínky, tj. v čase se neměnicí toky. K tomu dochází v konstrukci po určité době, pokud se podmínky prostředí nemění. A druhý skript byl vytvořen pro podmínky nestacionární, tj. v čase proměnlivý tok je závislý na měnících se podmínkách prostředí.

Pro nestacionární výpočet bylo přiřazení okrajových podmínek, tedy podmínek okolního prostoru v exteriéru a v interiéru, provedeno na základě výstupů z naměřených dat sledovaného objektu. Z velkého množství dat byl použit každý stý údaj připadající na jeden den v roce. Tímto zredukováním jednoho údaje za den bylo dosaženo zkrácení doby výpočtu, který by při použití veškerých údajů pravděpodobně trval nesmírně dlouhou dobu. Jelikož tato práce posuzuje detail, který přiléhá k zemině. Bylo nutné přiřadit okrajové podmínky také pro přilehlou zeminu.

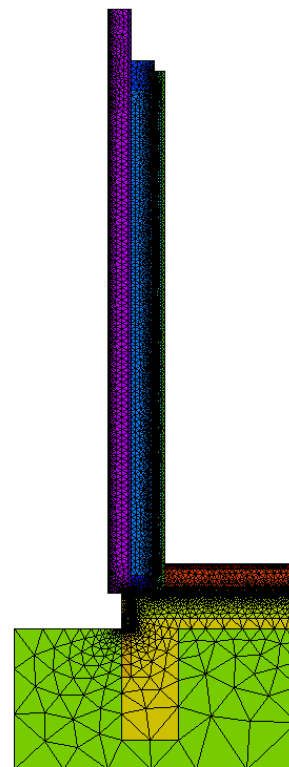
4.3.2.4 Volba kritických míst

Kritická místa byla zvolena vzhledem k pozdějšímu porovnávání dat mezi experimentem a modelem ve stejném místě polohy senzorů zabudovaných v konstrukci reálného domu. Geometrie polohy senzorů, a tedy i kritických míst sledovaných výpočtem je znázorněna na Obr. 14. Na základě informací uvedených v kapitolách zabývajících se pohybem vody a tepla ve dřevě bylo nutné věnovat pozornost průběhu tepla a vlhkosti také v konstrukčních prvcích z materiálů na bázi dřeva. Z toho důvodu byla přiřazena kritická místa také dřevěnému rámu a laťovému roštu.

4.3.2.5 Samotná práce software FlexPDE

Softwaru po předchozích přípravách skriptu k výpočtu stačilo už jen dát povolení ke spuštění skriptu. Hned po startu byla vytvořena geometrie modelu s přiřazenými materiálovými vlastnostmi. Následně nástroj Mesh rozdělil posuzovaný detail na síť, jejíž hustota se volí dle požadované přesnosti výsledků. Před zahájením výpočtu si software ze skriptu přečetl a k modelu přiřadil okrajové podmínky. Samotný výpočet tepelného toku se pak prováděl na základě diferenciálních rovnic pro každý vytvořený uzel.

Obr. 15 Posuzovaný detail po rozdělení na jednotlivé uzly nástrojem Mesh



4.3.2.6 Výstupy ze softwaru FlexPDE

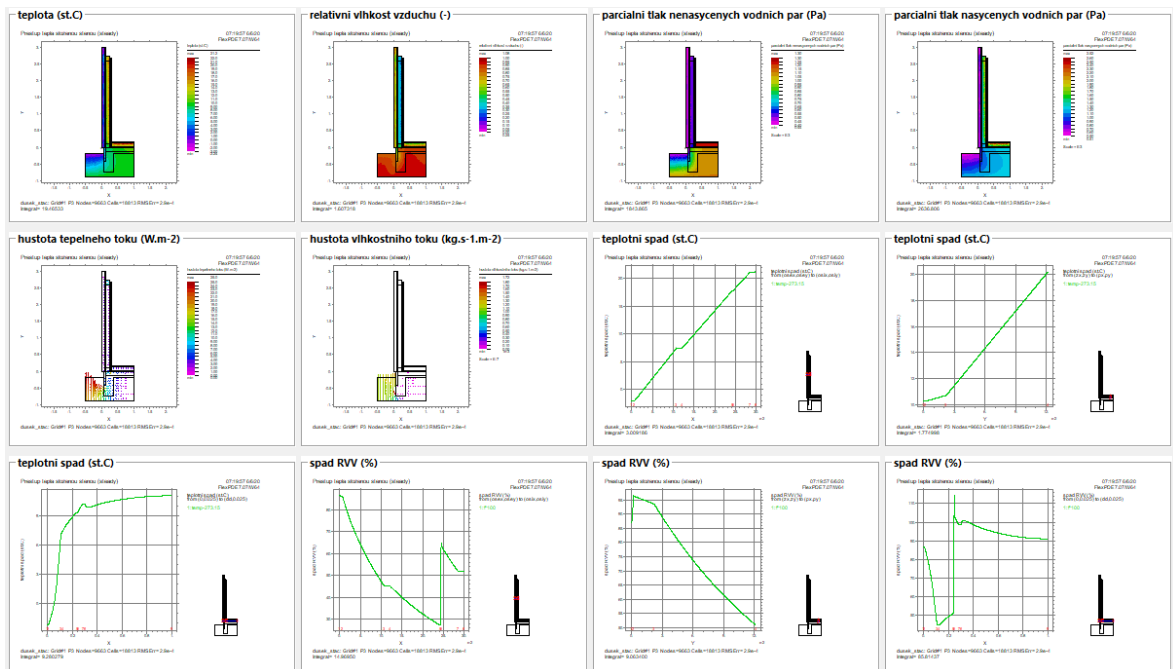
Po provedeném výpočtu vygeneroval software FlexPDE dva výstupy. Jedním je grafické znázornění požadovaných vlastností, jako jsou rozložení a průběh toků, jejich spád, hustota atd. Druhým výstupem je textový soubor, ve kterém jsou uvedeny vypočítané hodnoty požadovaných vlastností.

```

FlexPDE Version 7.07/W64 16:16:39 Sep 29 2017
File: dusek_nestac_prestup_tlaku.pde 09:21:45 4/11/20
Title: Prestup tepla slozenou stenou (un-steady)
Output: "temp-273.15"
Time 3.15e+007
<Time> <temp-273.15(0,1.5)> <temp-273.15(0.122,1.5)> <temp-273.15(0.299,1.5)> <temp-273.15(0.799,0.122)>
}
0.000000000 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.
1.5380859375 9.6452023082 9.9999999853 10.120736254 9.9999980923 10. 10.
2.3071289063 9.5059183001 9.9999999946 10.173216599 9.9999983213 10. 9.9999999968
3.2684326172 9.358133083 10.000000046 10.23257224 9.9999997297 10.000000001 10.000000008
4.2297363281 9.2352788266 10.000000037 10.285440047 10.00000168 10.00000001 10.000000008
5.4313659668 9.1082590559 9.999999986 10.343737497 10.000003954 10.00000001 10.000000004
6.9334030151 8.9789390633 9.9999999426 10.406745919 10.000005737 10.00000001 10.
8.8109493256 8.8481646916 9.999999898 10.473607296 10.000006039 10.00000001 9.999999982
11.157882214 8.7155609214 9.9999998803 10.54354126 10.000004356 10.00000001 9.999999998
14.091548324 8.5796993352 9.9999998905 10.616120235 10.00000122 10.00000001 9.999999995
17.758630961 8.438535935 9.9999998922 10.69149886 9.9999977257 10.00000001 10.000000002
22.342484258 8.2898506932 9.9999998879 10.7704825 9.9999952565 10.00000001 10.000000004
28.072300879 8.1315138191 9.9999998582 10.854391293 9.9999927625 10.00000001 10.000000019
35.234571656 7.9616859297 9.9999998605 10.944797004 9.9999894946 10.00000001 10.000000019
44.187410126 7.77911145 9.9999999314 11.043370006 9.9999855901 10.00000001 10.000000092
55.378458215 7.58342617 9.9999999433 11.15166069 9.9999899768 10.00000002 10.000000087
69.367268325 7.374976913 9.999999906 11.271371806 10.000005553 10.00000002 10.000000083
86.853280963 7.1538823934 9.9999998946 11.404047271 10.00002818 10.00000002 10.00000008
108.71079676 6.9186066452 9.9999998852 11.550930177 10.000049799 10.00000002 10.000000073
136.03269151 6.6649137513 9.9999998798 11.712897515 10.000058957 10.00000002 10.00000006
170.18505994 6.386020996 9.999999846 11.890908459 10.000056683 10.00000002 10.000000042

```

Obr. 16 Ukázka výstupu ze softwaru FlexPDE v textové podobě



Obr. 17 Ukázka výstupu ze softwaru FlexPDE v grafické podobě

4.3.3 Porovnávání naměřených a vypočtených hodnot

Jako hlavní nástroj na vyhodnocení a porovnání naměřených a vypočtených dat byly pro jasnější představu o diferencích mezi nimi zvoleny bodové grafy s rovnými spojnicemi, kde na ose x je vždy čas v sekundách a na ose y posuzovaná veličina – teplota ve stupních Celsia, nebo v procentech uváděná relativní vlhkost vzduchu. Vypočtená data ze softwaru FlexPDE a naměřené hodnoty z experimentu ve formě datových čísel byla tedy převedena v softwaru Microsoft Excel do grafů, které sledovaly teplotní a vlhkostní průběh konstrukcí.

Pro porovnání numerických metod za stacionárních a nestacionárních podmínek byly využity vygenerované výstupy ze softwaru FlexPDE ve formě obrázků s rozložením teplotního a vlhkostního pole a hustoty tepelného a vlhkostního toku.

Ve formě generovaných výstupů z numerického výpočtu byly také použity grafy znázorňující teplotní a vlhkostní průběhy v kritických místech a okolním prostředí a grafy s teplotními a vlhkostními spády v jednotlivých konstrukcích.

Doprovodným nástrojem grafů pro porovnání reálného experimentu s numerickým modelem byla využita popisná statistika charakterizována aritmetickým průměrem, minimální a maximální hodnotou. Minima a maxima zjištěných hodnot včetně jejich aritmetického průměru byla následně shrnuta v přehledných tabulkách, které jsou prezentovány v kapitole 5.3.

Veškeré výsledky byly zhodnoceny s příslušným komentářem ihned pod obrázkem a v diskuzi pak podrobněji rozebrány.

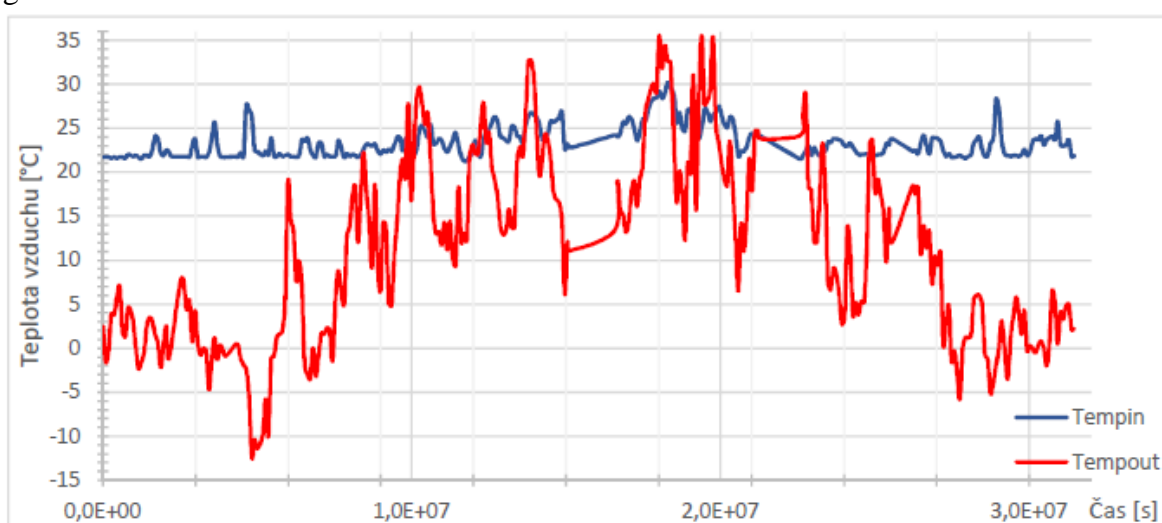
5 Výsledky

5.1 Experiment

Na následujících stránkách jsou zobrazeny a popsány průběhy teplot a relativních vzdušných vlhkostí naměřených ve sledované konstrukci s osazenými teplotně-vlhkostními senzory po časové období od 1.1.2018 po 31.12.2018.

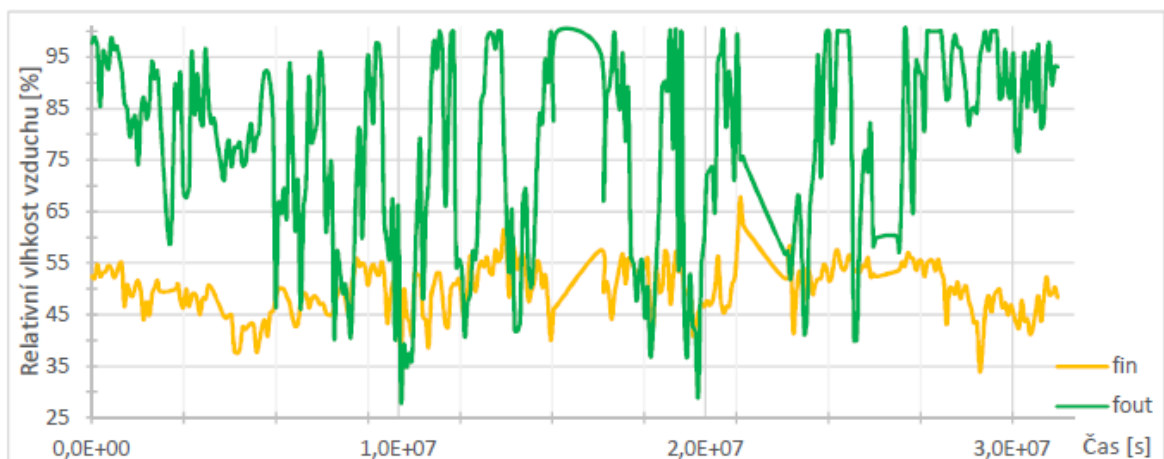
5.1.1 Okrajové podmínky

Průběhy teplot a relativních vlhkostí vzduchu okolního prostředí naměřené teplotně vlhkostními čidly umístěné v interiéru a exteriéru viz 4.2.3 jsou zobrazeny v následujících grafech.



Obr. 18 Realný průběh vnitřní (tempin) a vnější (tempout) teploty vzduchu okolního prostředí

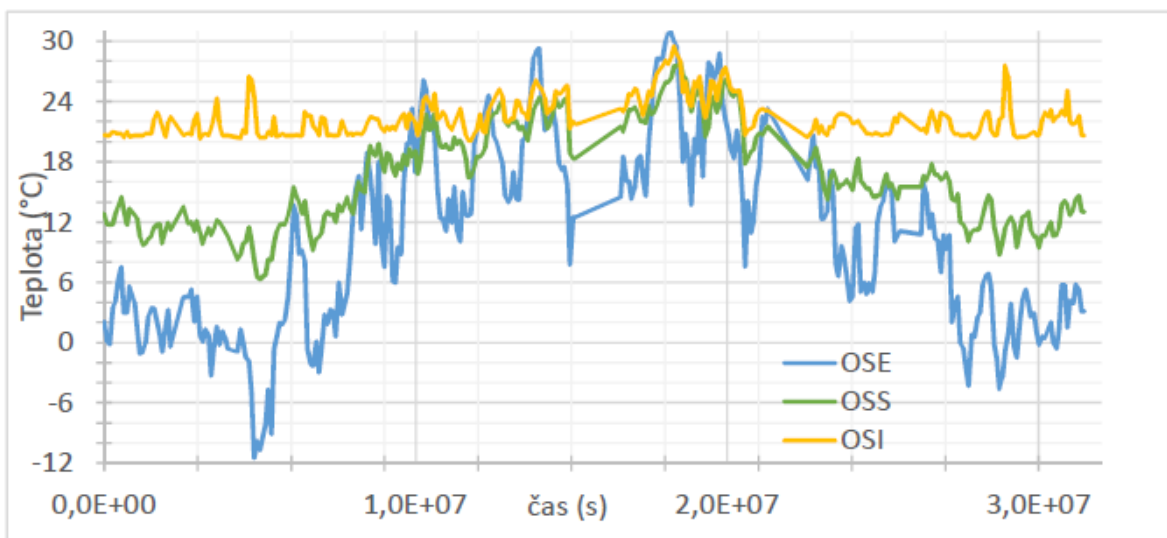
Průběhy teplot neustále kolísaly v závislosti na čase. Obr. 18 vykazuje exteriérové teploty v rozmezí -12 °C až 36 °C a interiérové teploty vzduchu v rozmezí 21 °C až 30 °C . Teplota vzduchu v interiéru v letních měsících, což je přibližně v polovině grafu, stoupala se vzrůstající teplotou v exteriéru. Tento jev v ostatním časovém období nebyl tak výrazný, jako právě v teplých dnech, kdy venkovní teplota dosahovala vyšší teplotní stupeň než 25 °C .



Obr. 19 Reálný průběh vnitřní (fin) a vnější (fout) relativní vlhkosti vzduchu okolního prostředí

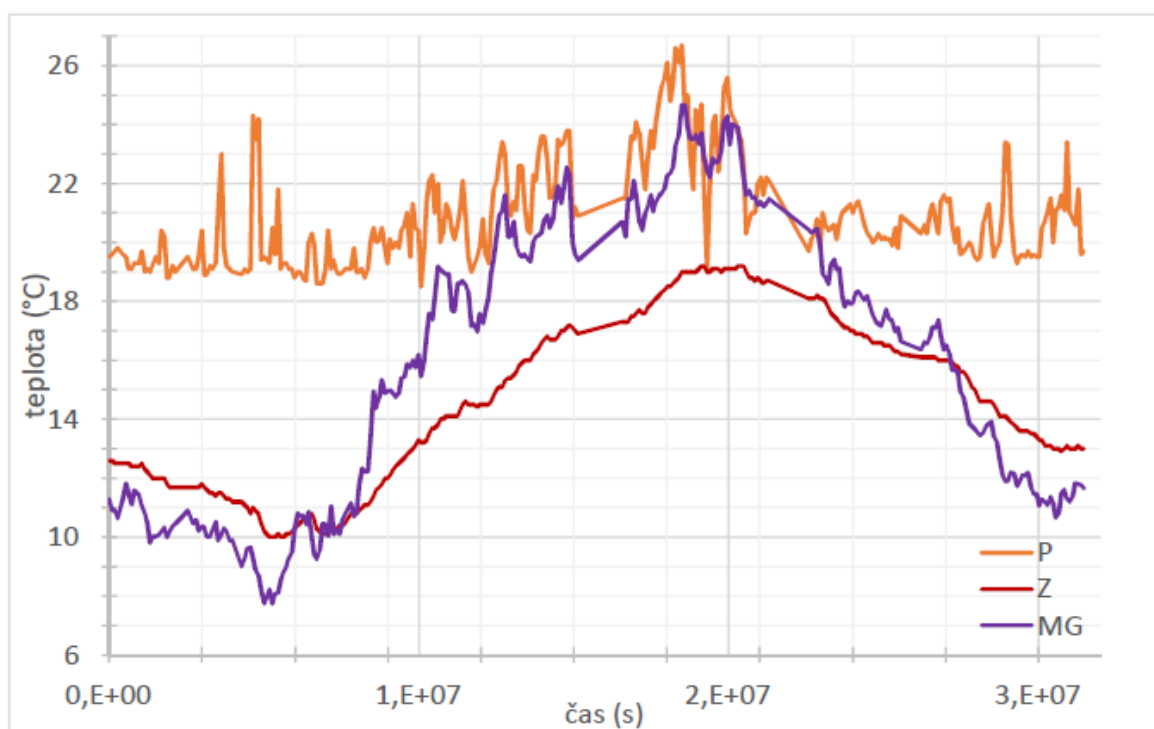
Obr. 19 znázorňuje průběh relativní vlhkosti vzduchu ve vnitřním prostředí (žlutá) a vnějším prostředí (zelená). V případě exteriéru jsou hodnoty uvedeny v rozmezí 30–100 % a v interiéru 34–68 %. Stoprocentně to potvrdit nelze, ale v mnoha případech je vidět, že s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu v exteriéru, klesala zároveň relativní vzdušná vlhkost v interiéru. Ojedinelá zvýšení relativní vlhkosti vzduchu v interiéru by mohla být zapříčiněna vařením s velkým množstvím vodní páry v kuchyňském koutě, který není nijak oddělen od obývacího pokoje s měřicími senzory, jak je patrné z výkresu půdorysu 1. podlaží uvedeného v příloze této práce.

5.1.2 Průběh teplot



Obr. 20 Průběh teplot naměřených čidly umístěnými ve svislé konstrukci

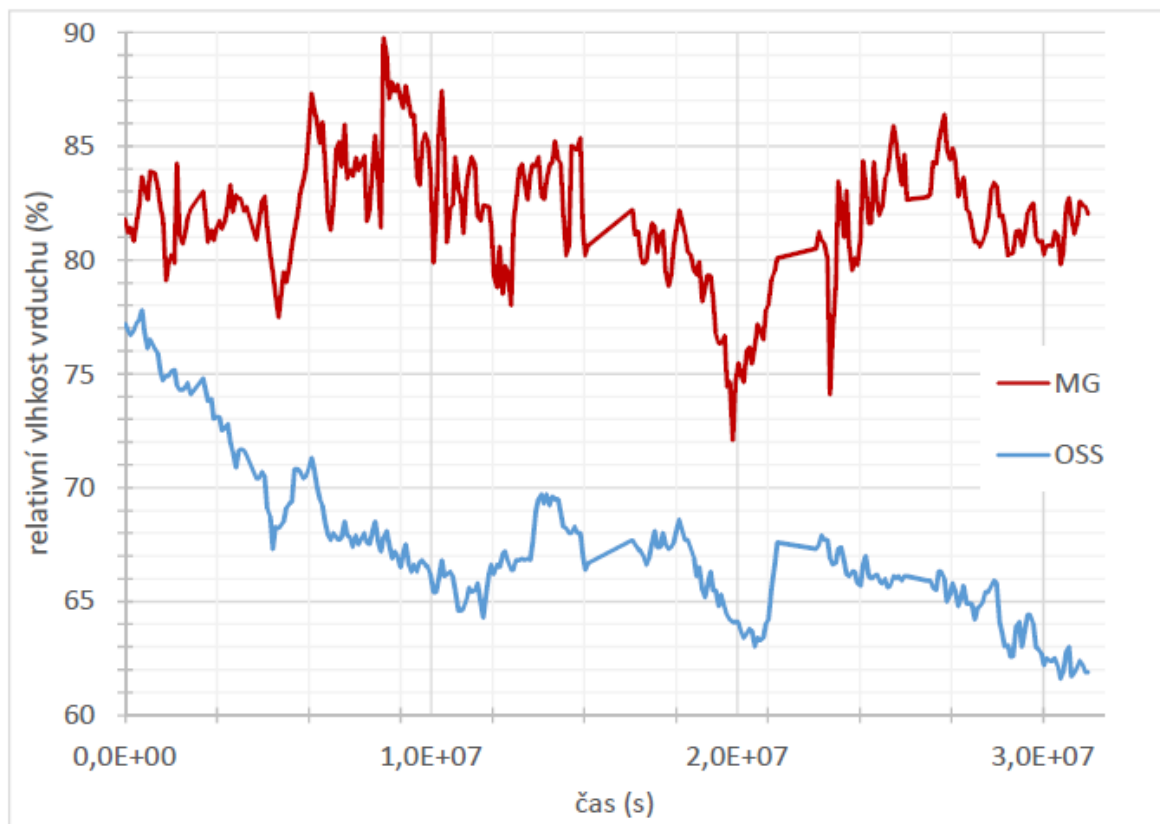
Průběh teplot z naměřených hodnot senzory umístěnými ve svislé konstrukci viz Obr. 14 zobrazuje Obr. 20. Čidla pod označením OSI (žlutá) ukazují průběh teplot na interiérové straně konstrukce a jejich hodnoty neklesají pod 20 °C a v letních měsících (přibližně v polovině časové osy x) se vlivem vyšších venkovních teplot vyšplhá až k 30 °C. Teploty na venkovní straně konstrukce naměřené čidlem umístěným v omítce a pod označením OSE (modrá) byly během sledovaného roku v rozmezí -12 °C až 31 °C. Průběh teplot uvnitř konstrukce, který dodalo čidlo OSS (zelená) umístěné v tepelné izolaci, korespondoval hlavně s průběhem teplot OSE a pohybovaly se v rozmezí 6 °C až 27 °C.



Obr. 21 Průběh teplot naměřených čidly umístěnými v podlahové konstrukci

Na Obr. 21 jsou znázorněny průběhy teplot zaznamenaných jednotlivými čidly v podlahové konstrukci. Jak popisuje Obr. 14 je pod podlahovým dílcem umístěno čidlo s označením *P* (oranžová), pod podlahovým polystyrenem v suchém podsypu čidlo *Z* (červená) a u prahu obvodové stěny, tedy jejího napojení na železobetonovou základovou desku, čidlo *MG* (fialová). Nejmenší teplotní rozmezí vykazuje dle výše znázorněného grafu průběh teplot z čidla *P*, a to s teplotami od 18,5 °C do 26,8 °C. Díky tomu, že je čidlo usazeno tak blízko interiéru, je grafová linie naměřených hodnot téměř totožná s hodnotami naměřenými v místnosti. Rozmezí teplot od 10 °C do 19,2 °C má průběh teplot naměřených čidlem *Z*. Čidlo *MG* znázorňuje kolísající a v letních měsících stoupající teploty v rozmezí lehce pod 8 °C a dosahujících až k 25 °C. Z grafu je také viditelné stejné klesání a stoupání teplot čidel *Z* a *MG* v průběhu sledovaného roku.

5.1.3 Průběh relativních vzdušných vlhkostí



Obr. 22 Průběh relativních vlhkostí vzduchu naměřených čidly umístěnými v konstrukci posuzovaného detailu

Relativní vzdušné vlhkosti v konstrukci byly měřeny dvěma čidly, jejichž poloha je uvedena na Obr. 14. Průběhy relativních vzdušných vlhkostí vycházející z jejich naměřených dat jsou uvedeny na Obr. 22. Průběh vlhkosti u železobetonové konstrukce, tedy čidlo *MG* (červená), vykazoval místy poměrně vysoké hodnoty dosahující až k 90 %. V průběhu sledovaného roku se vlhkost pohybovala také v poměrně vysokých naměřených hodnotách okolo 80–85 %. Relativní vzdušná vlhkost v obvodové stěně, čidlo *OSS* (modrá), dosahovala na počátku sledování hodnot až 78 %. Časem se ale neustále snižovala až k hodnotě 62 %. Tento klesající trend je pravděpodobně způsoben vniknutím vlhkosti do konstrukce při výrobě či montáži a postupným vysycháním konstrukce v následujících sledovaných měsících.

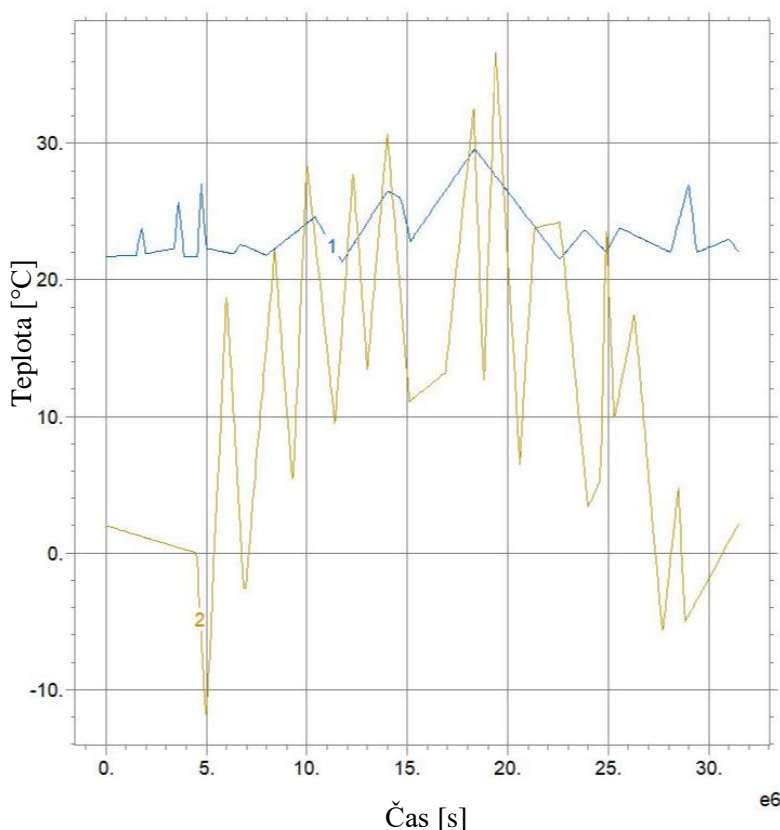
5.2 Model

5.2.1 Porovnání stacionárního a nestacionárního výpočtu

Tato podkapitola se věnuje srovnání obou použitých výpočetních metod. Výsledky jsou zde uvedené z důvodu poukázání na rozdíl mezi praxí častěji používaným způsobem v podobě stacionárního výpočtu vlhkostně tepelného chování konstrukce a nestacionárním výpočtem, který se díky svým měnícím se okrajovým podmínkám blíží víc realitě než stacionární výpočet.

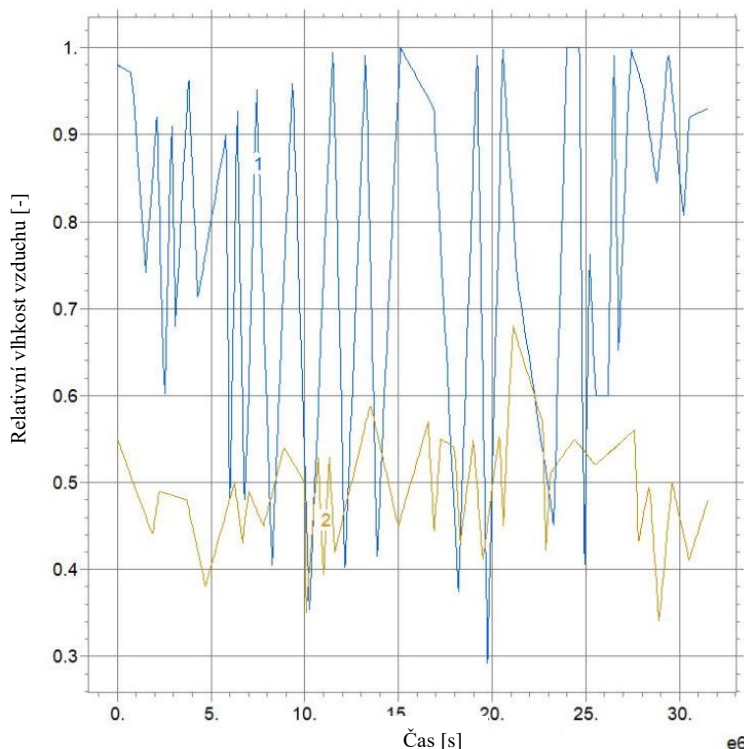
5.2.1.1 Okrajové podmínky

Veškeré níže uvedené rozdíly byly způsobeny odlišným přiřazením okrajových podmínek k jednotlivé metodě výpočtů. U stacionárního výpočtu byly okrajové podmínky konstantní po celou dobu výpočtu. Naopak nestacionární výpočet po celý průběh přepočítával a měnil relativní vlhkost vzduchu a teplotu okolního prostředí. Tím byla dosažena velká variabilita výsledků. Průběhy teplot a relativních vlhkostí vzduchu okolního prostředí u nestacionárního výpočtu jsou zobrazeny na následujícím grafu. Pro stacionární výpočet byly zvoleny tepelné konstanty v exteriéru $-2,1\text{ °C}$ a v interiéru $21,7\text{ °C}$. Hodnoty relativní vlhkosti vzduchu byly přiřazeny v exteriéru $87,2\%$ a v interiéru $50,5\%$. U obou výpočtů byla zadána teplota zeminy 10 °C . Relativní vzdušná vlhkost pro nestacionární výpočet byla zvolena 80% a pro stacionární výpočet 60% . Aby byly pozdější výsledky co nejrelevantnější, vycházejí použité hodnoty teploty a relativní vlhkosti vzduchu ve výpočtu, jak nestacionární metodou, tak metodou stacionární, z naměřených hodnot okolního prostředí v experimentu.



Na Obr. 23 je vyobrazen průběh exteriérové teploty (žlutá), který dosahoval svého maxima v 36 °C a minima v teplotě pod bodem mrazu, -12 °C a průběh interiérové (modrá) teploty vzduchu, který se po většinu simulované doby pohyboval v rozmezí od 21 °C do 26 °C . Odchylku tvoří pouze teplota blížící se ke 30 °C . Která byla vypočtena v simulovaném období letních měsíců, přibližně v polovině grafu.

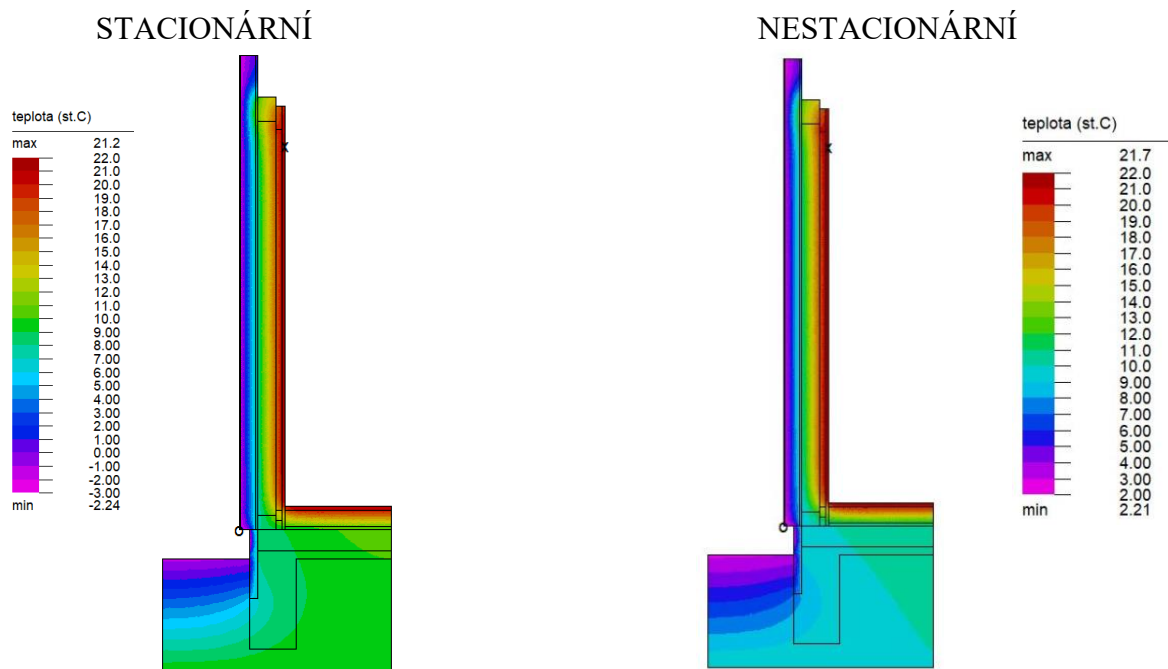
Obr. 23 Průběh vnitřní (1) a vnější (2) teploty vzduchu okolního prostředí u nestacionárního výpočtu



Obr. 24 znázorňuje průběh relativní vlhkosti vzduchu ve vnitřním prostředí (žlutá) a vnějším prostředí (modrá). V případě interiéru jsou hodnoty zobrazeny v rozmezí 34–68 %. V exteriéru jsou hodnoty převážně v rozmezí 50–100 %. Ale v několika případech je vidět, že relativní vlhkost vzduchu v exteriéru klesala ke 40 % a ojediněle až 30 %. Nízká vlhkost odpovídá simulovanému suchému letnímu období.

Obr. 24 Průběh vnitřní (2) a vnější (1) relativní vlhkosti vzduchu okolního prostředí u nestacionárního výpočtu

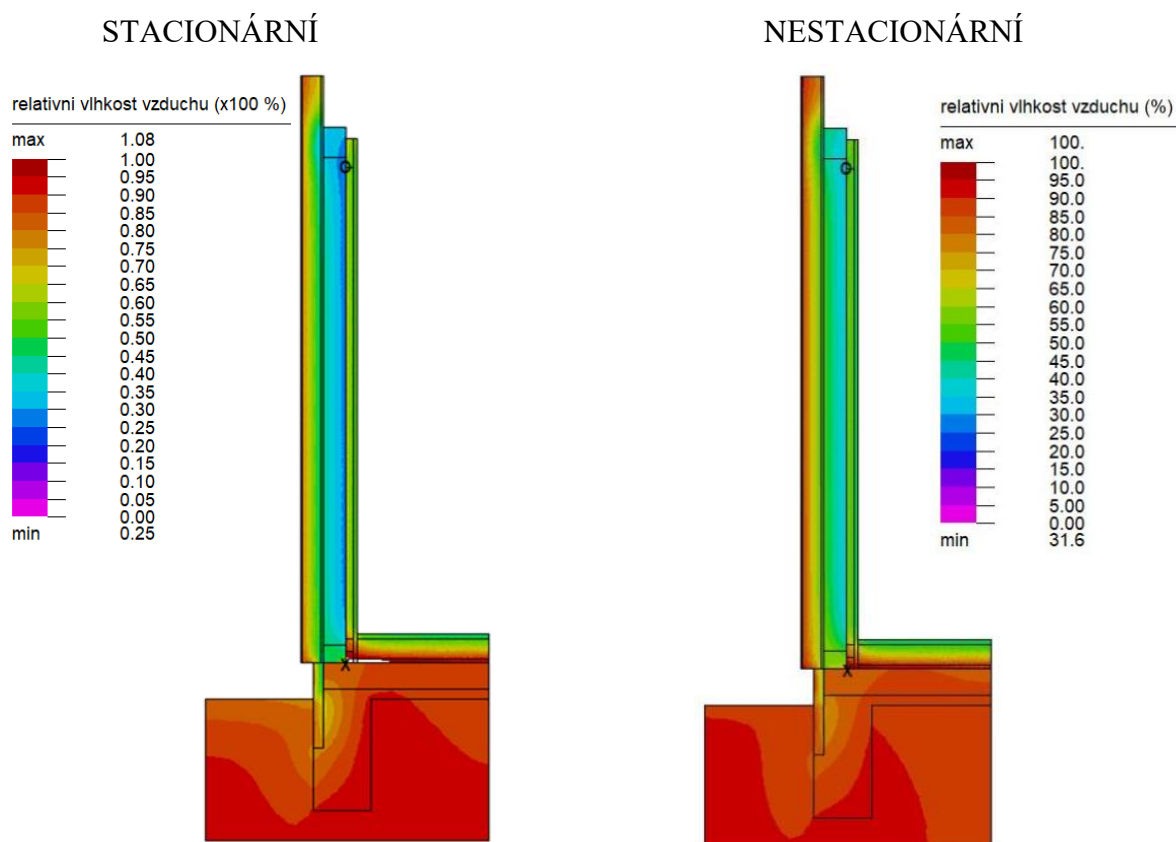
5.2.1.2 Rozložení průběhu teplot



Obr. 25 Průběhy teplot [°C] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem

Ač by se při prvním pohledu na rozdílné barvy mohlo zdát, že tomu je jinak, tak při srovnání s legendami barvou označující hodnoty teploty nevykazují průběhy teplot velké rozdíly mezi provedenými výpočty. Určité rozdíly se zde ale najdou. Výpočet při stacionárních podmínkách vykazuje, že teplota konstrukce se na povrchové části v exteriéru na rozdíl od výpočtu při nestacionárních podmínkách dostala až pod nulu na hodnotu $-2,24$ °C.

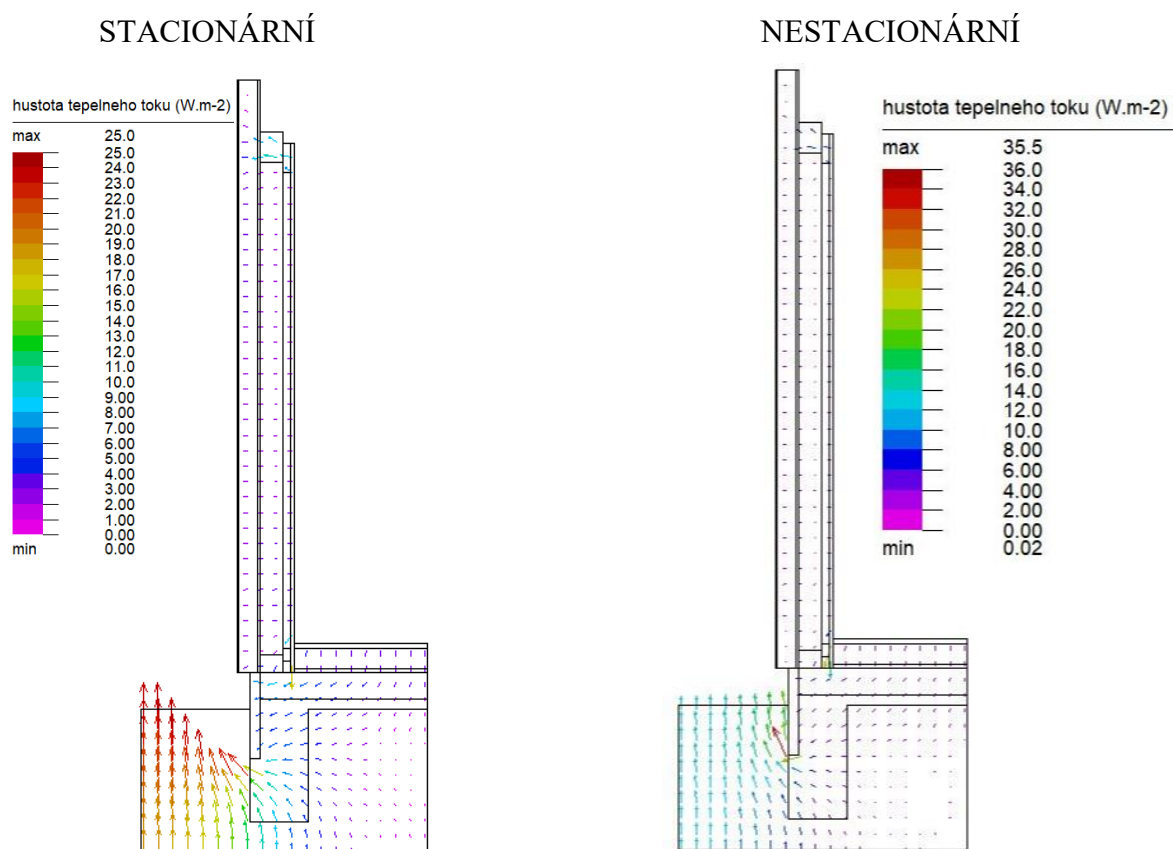
5.2.1.3 Rozložení průběhu relativních vlhkostí vzduchu



Obr. 26 Průběhy relativních vlhkostí vzduchu [%] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem

Na Obr. 26 byly u výsledků po stacionárním i nestacionárním výpočtu pozorovány nejvyšší hodnoty relativní vlhkosti v napojení svislé konstrukce na vodorovnou. Výsledky po stacionárním výpočtu vykazovaly maximální hodnotu v tomto bodě 108 % vlhkosti. U nestacionárního výpočtu byla naměřena maximální hodnota 100 % relativní vzdušné vlhkosti. Z grafického výstupu je patrné, že ve svislé konstrukci nejvyšší hodnoty se dosahuje ve vnější izolaci, kde se hodnoty pohybují v rozmezí 60–100 %. Podobné hodnoty se naměřily také u vodorovné konstrukce, ale v celém jejím rozsahu.

5.2.1.4 Hustota tepelného toku

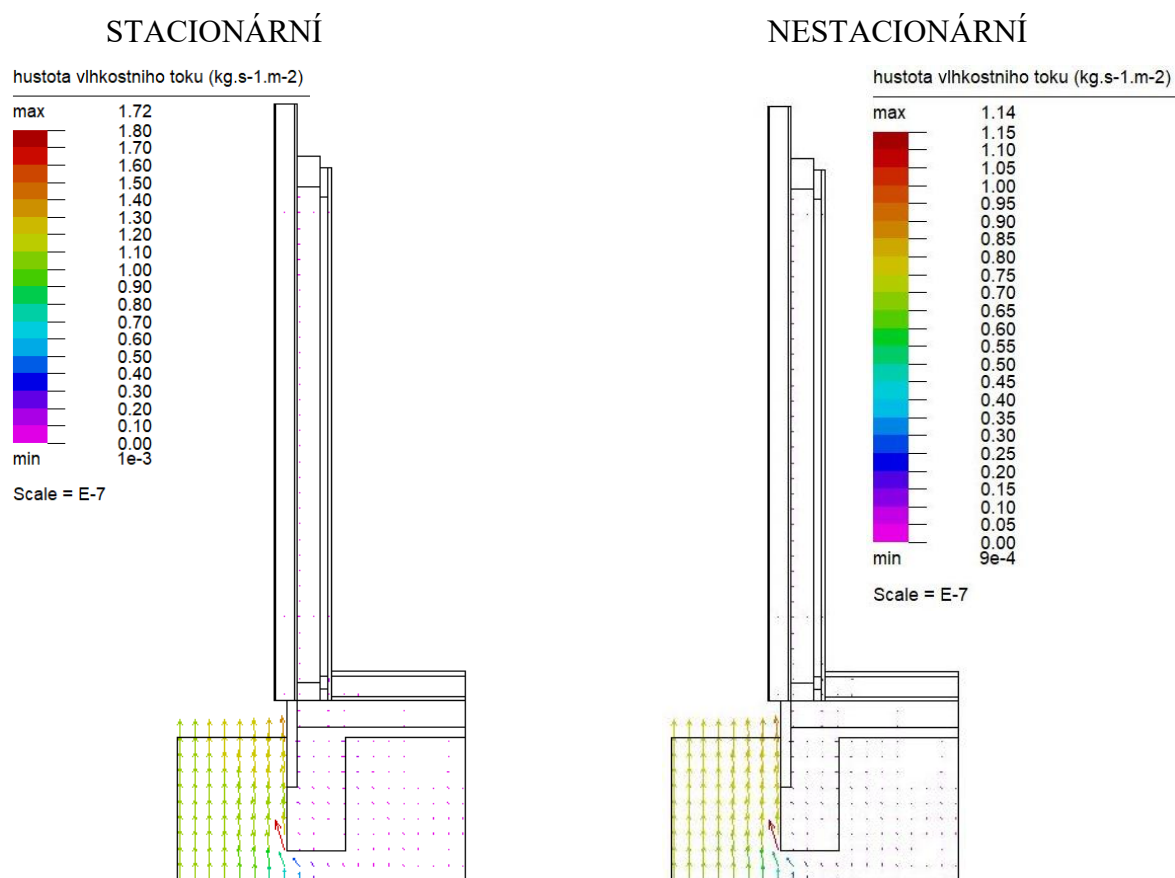


Obr. 27 Průběhy hustoty tepelného toku [W.m⁻²] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem

Tepelné toky, které byly vyobrazeny na Obr. 27 představovaly u obou použitých výpočetních metod podobný průběh, s tím že u nestacionární metody měl tepelný tok o čtvrtinu větší intenzitu než tepelný tok u metody nezávislé na čase. U stacionární metody byl navíc tepelný tok při opuštění základové konstrukce veden šikmo zeminou od konstrukce.

Největší toky probíhaly, při pominutí toku skrz zeminu, na úrovni základové konstrukce, v místě styku obvodové stěny a podlahové konstrukce a skrz dřevěný rám obvodové stěny.

5.2.1.5 Hustota vlhkostního toku



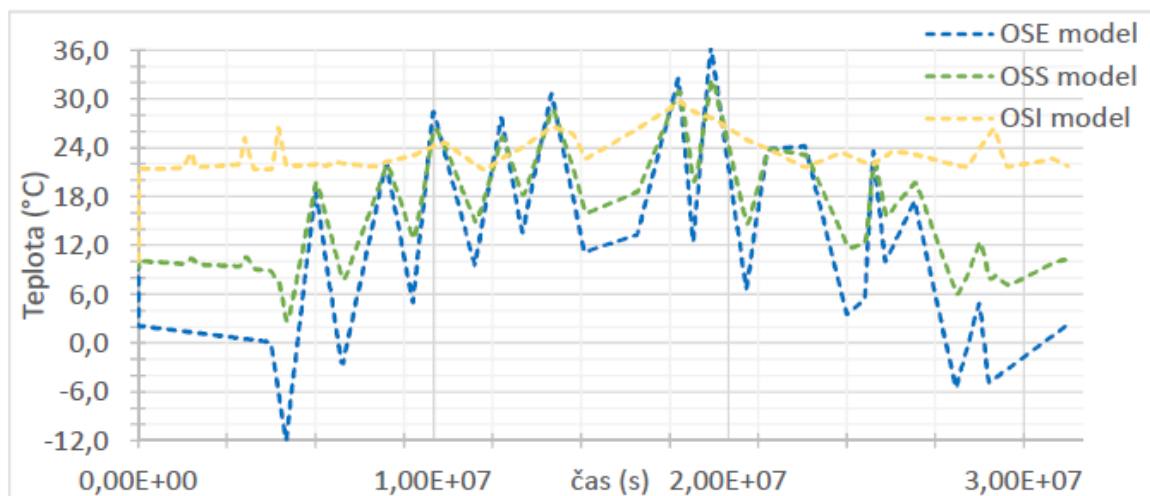
Obr. 28 Průběhy hustoty vlhkostního toku [$\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem

Průběh vlhkostních toků byl vyobrazen na Obr. 28, kde byl porovnáván stacionární a nestacionární výpočet. Průběh vlhkostí probíhal stejným způsobem, jen u stacionárního výpočtu s 1,5násobně vyšší intenzitou.

5.2.2 Analýza nestacionárního výpočtu

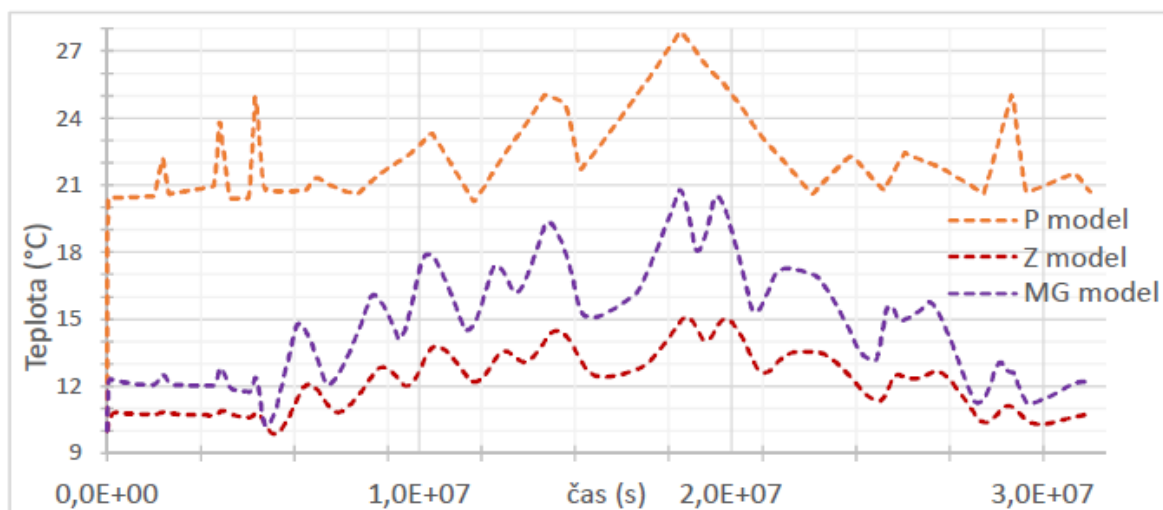
Na následujících grafech bude analyzováno tepelně-vlhkostní chování, které bylo nasimulováno softwarem FlexPDE pomocí numerického výpočtu za stejné časové období jako experimentální měření, tedy od 1.1.2018 do 31.12.2018. Výpočty byly provedeny na modelu konstrukce nejen v místech reálně umístěných čidel, ale také v konstrukčních prvcích z materiálů na bázi dřeva. Konkrétně u dřevěného rámu a dřevěného laťového roštu. Tak jako u experimentálního měření popisky grafických řad označují polohu čidel, viz Obr. 14, tak i u modelové simulace popisky značí místo v konstrukci, kde byl výpočet proveden.

5.2.2.1 Teplota



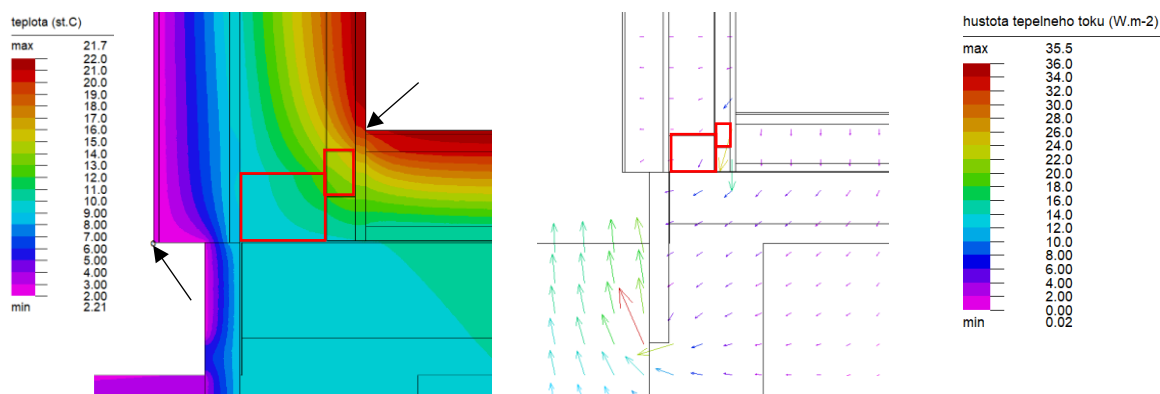
Obr. 29 Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě umístěných čidel ve svislé konstrukci

Vypočtené průběhy teplot v obvodové svislé stěně pomocí softwaru jsou znázorněny na Obr. 29. Průběh teploty *OSE* (modrá), označující exteriérovou část konstrukce, se pohyboval v počátečním časovém období okolo nuly, kde dosáhl svého minima -12 °C . V teplejším období pak dosáhl svého maxima 36 °C a později se opět ochlazoval. V interiérové části *OSI* (žlutá) se teplotní průběh pohyboval téměř celou simulovanou dobu v rozmezí $21\text{--}26\text{ °C}$. Pouze v době, kdy venkovní část dosáhla teploty 32 °C , se interiérová část konstrukce ohřála na necelých 30 °C . Průběh uprostřed konstrukce *OSS* (zelená) kolísal ve stejném rytmu jako exteriérová část, a to v teplotním rozmezí $3\text{--}32\text{ °C}$.



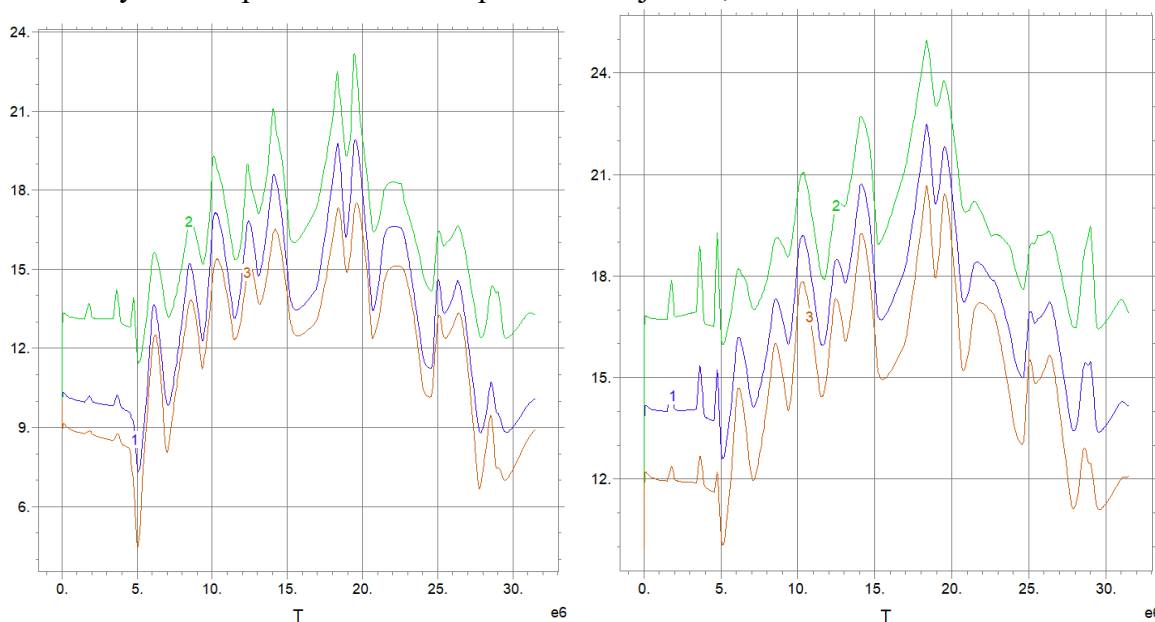
Obr. 30 Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě umístěných čidel v podlahové konstrukci

Obr. 30 znázorňující teplotní průběh modelovou konstrukcí podlahy vykresluje všechny tři teplotní průběhy téměř totožně kolísající a stoupající. Průběh teplot *P* (oranžová), pod podlahovým dílcem, se pohyboval v rozmezí od 21 °C do 28 °C . Teplotní průběh pod podlahovým polystyrenem *Z* (červená) se pohyboval v nižších teplotách od 10 °C do 15 °C . Na úrovni železobetonové desky u napojení obvodové stěny byl průběh teplot softwarem vypočten s minimem okolo 10 °C a maximem téměř 21 °C .



Obr. 31 Přibližný detail rozložení teplotního pole (vlevo) a hustoty tepelného toku (vpravo) zjištěnou numerickou metodou

Problematicke vztahu dřevěných prvků v konstrukci k probíhající teplotě pomáhá přiblížit Obr. 31. Ten názorně červeně vyznačenými dřevěnými prvky ukazuje rozložení teplot a hustotu tepelného toku. Větší obdélníkový obrazec znázorňuje dřevěný práh rámu, a u menšího obdélníku se jedná o dřevěnou lať z laťového roštu. Černými šipkami jsou pak vyznačeny části konstrukce s nejnižší povrchovou teplotou v interiéru a exteriéru (2,21 °C). Nejnižší povrchová teplota v interiéru se pohybuje dle znázorněných barev okolo 20 °C, což není velký rozdíl oproti maximální teplotě dosahující 21,7 °C.



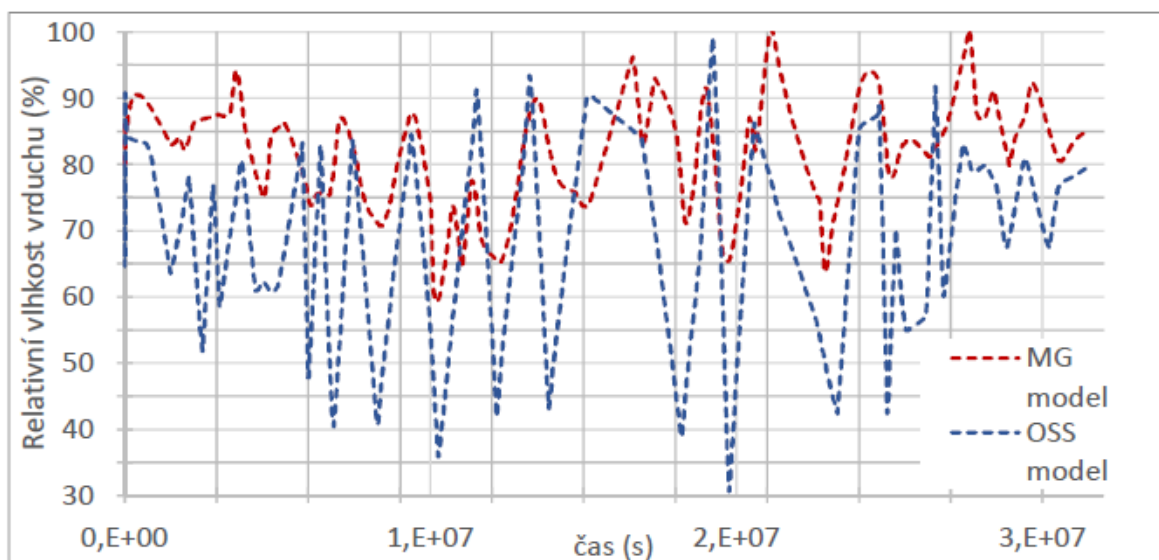
Obr. 32 (vlevo) Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného rámu

Obr. 33 (vpravo) Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného laťového roštu

Na Obr. 32 jsou vykresleny vypočtené průběhy teplot v dřevěném rámu za sledované období. Grafové řady označené číslicemi 1, 2 a 3, představují maximální (2 – zelená) minimální (3 – oranžová) a průměrný (1 – fialová) teplotní průběh dřevěným rámem. Z dlouhodobého hlediska je nejdůležitější průměrný teplotní průběh, který se pohyboval v rozmezí teplot 8–18 °C. Tyto hodnoty přibližně korespondují s rozložením teplotního pole na Obr. 31. Průběh teplot dřevěného laťového roštu, kterého bylo dosaženo numerickým výpočtem na modelové konstrukci zobrazuje

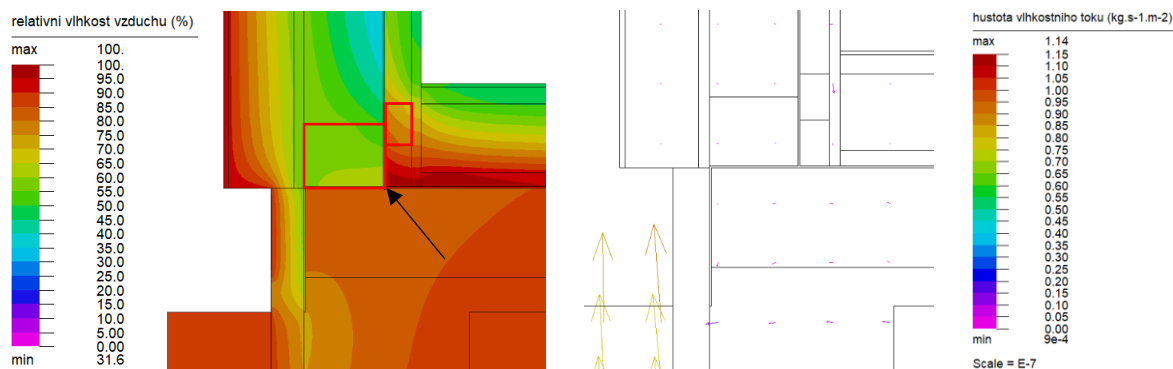
Obr. 33. Označení grafových řad je stejné jako u průběhu teplot v rámu. Zde je průměrný teplotní průběh (1 – fialová) skrz lať v hodnotách od 13 °C až po teplotu 22 °C.

5.2.2.2 Relativní vzdušná vlhkost



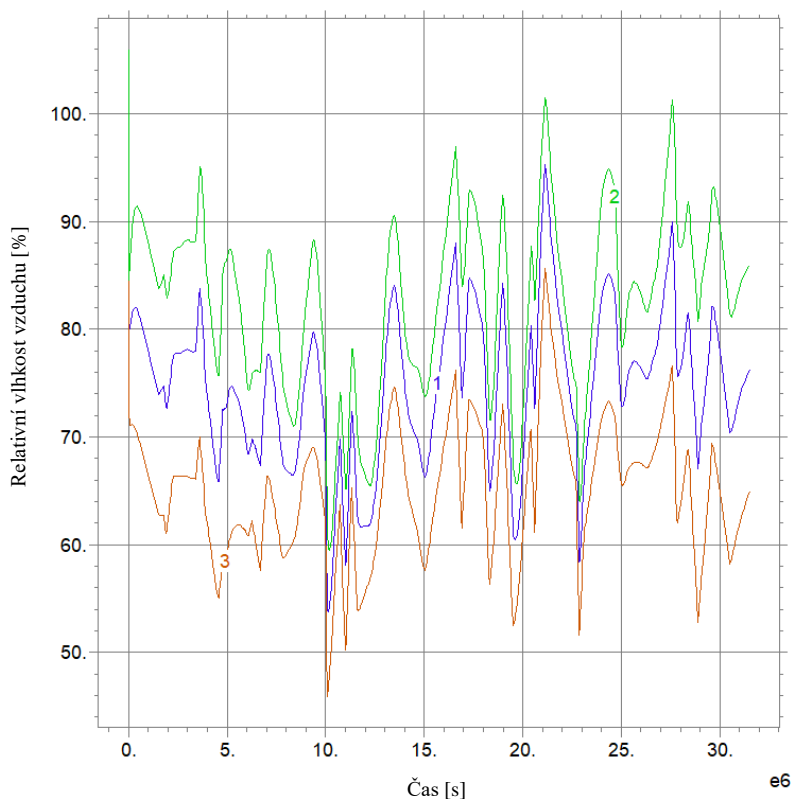
Obr. 34 Průběh relativních vzdušných vlhkostí vypočtených numerickým výpočtem v místě umístěných čidel

Relativní vlhkosti vzduchu a jejich průběh modelem konstrukce je vykreslen na Obr. 34. Grafická řada OSS (modrá) znázorňující průběh vlhkosti skrz obvodovou stěnu se jedinkrát dostala na své maximum až ke 100 % relativní vlhkosti vzduchu a minimum 30 % relativní vlhkosti vzduchu, jinak se ve větším časovém období pohybovala na hodnotách 40 až 90 % relativní vlhkosti vzduchu. Průběh vlhkosti MG vyznačen v grafu červenou přerušovanou čarou zaujímal rozmezí 60 až 100 % relativní vlhkosti vzduchu. Oba dva průběhy vykazují celkem vysoké hodnoty, které mohou mít v dlouhodobém měřítku negativní vliv na konstrukci.



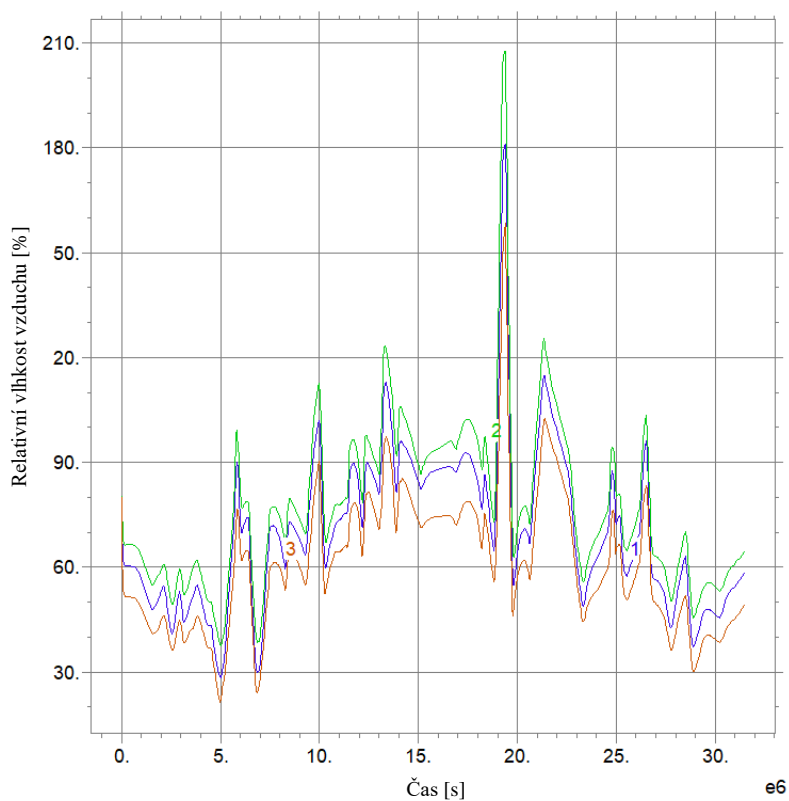
Obr. 35 Přibližný detail rozložení vlhkostního pole (vlevo) a hustoty vlhkostního toku (vpravo)

Obr. 35 zobrazující rozložení teplotního pole na modelové konstrukci velmi zřetelně ukazuje část konstrukce s plně či částečně přerušený vlhkostním tokem. Tento jev je způsoben použitím parozábrany vedenou ve svislé rovině mezi vyznačenými dřevěnými prvky a ve vodorovné rovině je parozábranou podlahová konstrukce odizolována od železobetonové desky. Bohužel na styku svisle a vodorovně vedené parozábrany (označeno černou šipkou) je dle obrázku s rozložením vlhkostního pole velký výskyt relativní vlhkosti vzduchu dosahující až 100 %. Za zmínku stojí i vysoká vlhkost v dřevěném prvku laťového roštu.



Výše uvedené potvrzuje třemi (1 – průměrný, 2 – maximální, 3 – minimální) průběhy vlhkostí v místě dřevěného roštu i Obr. 36. Ten vykresluje hodnoty zprůměrovaného průběhu (fialová) vlhkostí v rozmezí 55–95 %. Maximální hodnoty (zelená) jsou od 60 % do 100 % a minimální hodnoty (oranžová) jsou v rozsahu od 45 % do 85 % relativní vzdušné vlhkosti.

Obr. 36 Průběh relativních vzdušných vlhkostí vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného laťového roštu



Průběh relativní vlhkosti vzduchu získaným numerickým výpočtem v místě dřevěného rámu je vidět na Obr. 37. Na první pohled je zde patrný vlhkostní skok u zprůměrovaného vlhkostního průběhu (fialová) z devadesáti procent na sto osmdesát procent. U maximálního průběhu (zelená) se jedná o hodnoty až ke 210 %. Celkově graf zobrazuje velmi vysoké hodnoty vlhkosti mající při dlouhodobém výskytu v konstrukci špatný vliv na jednotlivé konstrukční prvky.

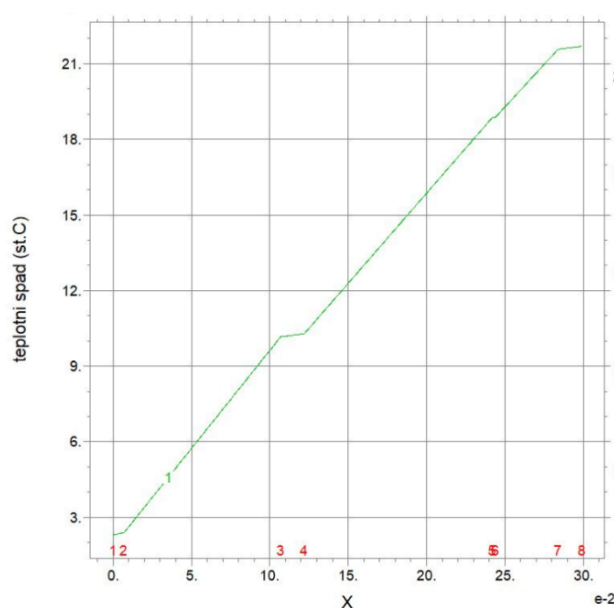
Obr. 37 Průběh relativních vzdušných vlhkostí vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného rámu

5.2.2.3 Teplotní a vlhkostní spády v konstrukcích

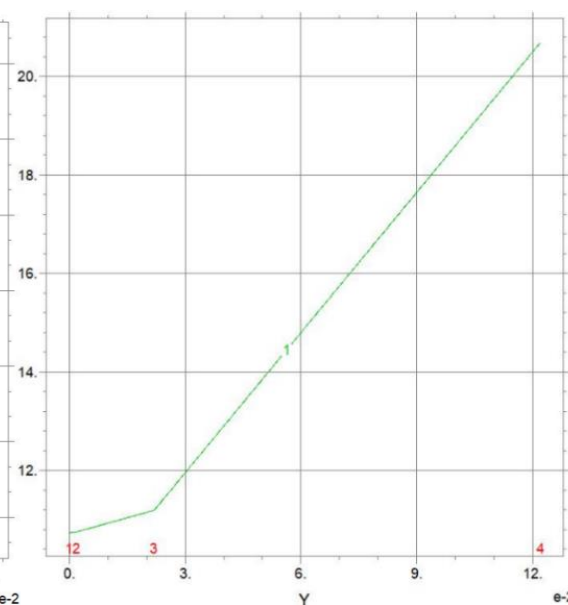
Z důvodu komplexnějších výsledků jsou na následujících obrázcích s příslušným komentářem uvedeny teplotní a vlhkostní spády v obvodové a podlahové konstrukci. Na ose y je vždy hodnota dané veličiny a na ose x pak tloušťka materiálu. Názvy a pozice vrstev ve skladbě jsou pro všechny spádové grafy uvedeny v Tabulka 6.

Obvodová stěna				Podlaha	
Číslo v grafu	Vrstva	Číslo v grafu	Vrstva	Číslo v grafu	Vrstva
1	Omítka	5	PE folie	1	PE folie
2	Polystyren	6	Tepelná izolace	2	Suchý podsyp
3	Fermacell	7	Fermacell	3	Podlahový polystyren
4	Tepelná izolace	8	Fermacell END	4	DTD

Tabulka 6 Legenda vrstev konstrukčních skladeb k spádovým grafům



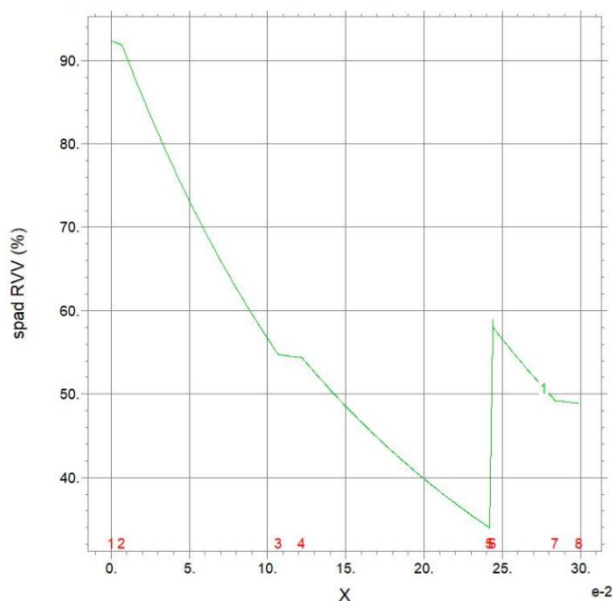
Obr. 38 Teplotní spád v konstrukci obvodové stěny



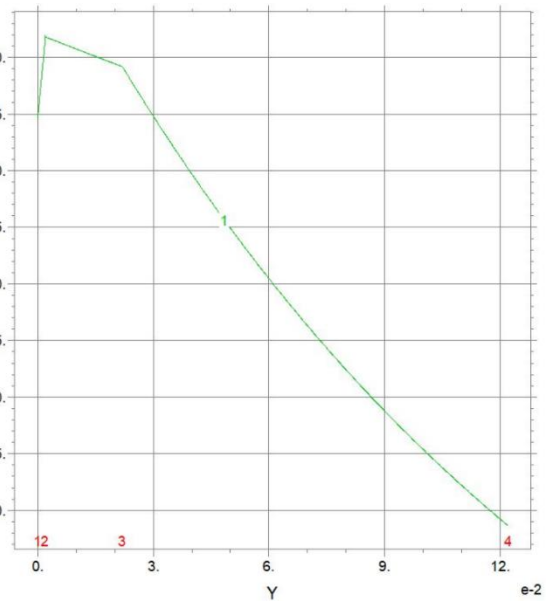
Obr. 39 Teplotní spád v konstrukci podlahy

Teplotní spád v obvodové stěně (Obr. 38) byl při její tloušťce o 297 mm poměrně veliký. Teplota skrz stěnu klesala z necelých 22 °C téměř až na 2 °C. Tedy rozdílem 20 °C.

V případě podlahové konstrukce je teplotní spád zobrazen na Obr. 39., kde byl rozdíl počáteční teploty vstupující do konstrukce a teploty na jejím konci stanoven na necelých 10 °C.



Obr. 40 Vlhkostní spád v konstrukci obvodové stěny



Obr. 41 Vlhkostní spád v konstrukci podlahy

Spád relativní vlhkosti vzduchu v obvodové stěně (Obr. 40) byl přerušen v bodě 5 parozábranou. I přesto je spád poměrně veliký.

Spád relativní vlhkosti vzduchu v podlahové konstrukci je zobrazen na Obr. 41, kde byl parozábranou přerušen v bodě 1 na ose x . Největší spád nastal mezi body 3–4, tedy v podlahovém polystyrenu.

5.3 Porovnání experimentu s modelem

Pro lepší přehlednost při porovnání experimentálního měření s modelovým numerickým výpočtem jsou v následujících třech tabulkách uvedeny minima a maxima zjištěných hodnot včetně jejich aritmetického průměru. Uvedené data v tabulkách doprovázejí hlavní nástroj porovnání dat, čímž jsou níže uvedené bodové grafy s rovnými spojnicemi, kde na ose x je vždy čas v sekundách a na ose y posuzovaná veličina – teplota ve stupních Celsia, nebo v procentech uváděná relativní vlhkost vzduchu. Obě měření byla provedena pro časové období od 1.1.2018 do 31.12.2018.

Naměřené a vypočtené hodnoty teplot [°C] v obvodové konstrukci					
poloha	metoda	max	min	průměr	rozdíl
OSI	model	29,6	10	22,4	0
	experiment	29,5	20,1	22,4	
OSS	model	32,3	2,7	16,7	0,1
	experiment	27,8	6,3	16,6	
OSE	model	36,5	-12	12,6	2,1
	experiment	30,9	-11,5	10,5	

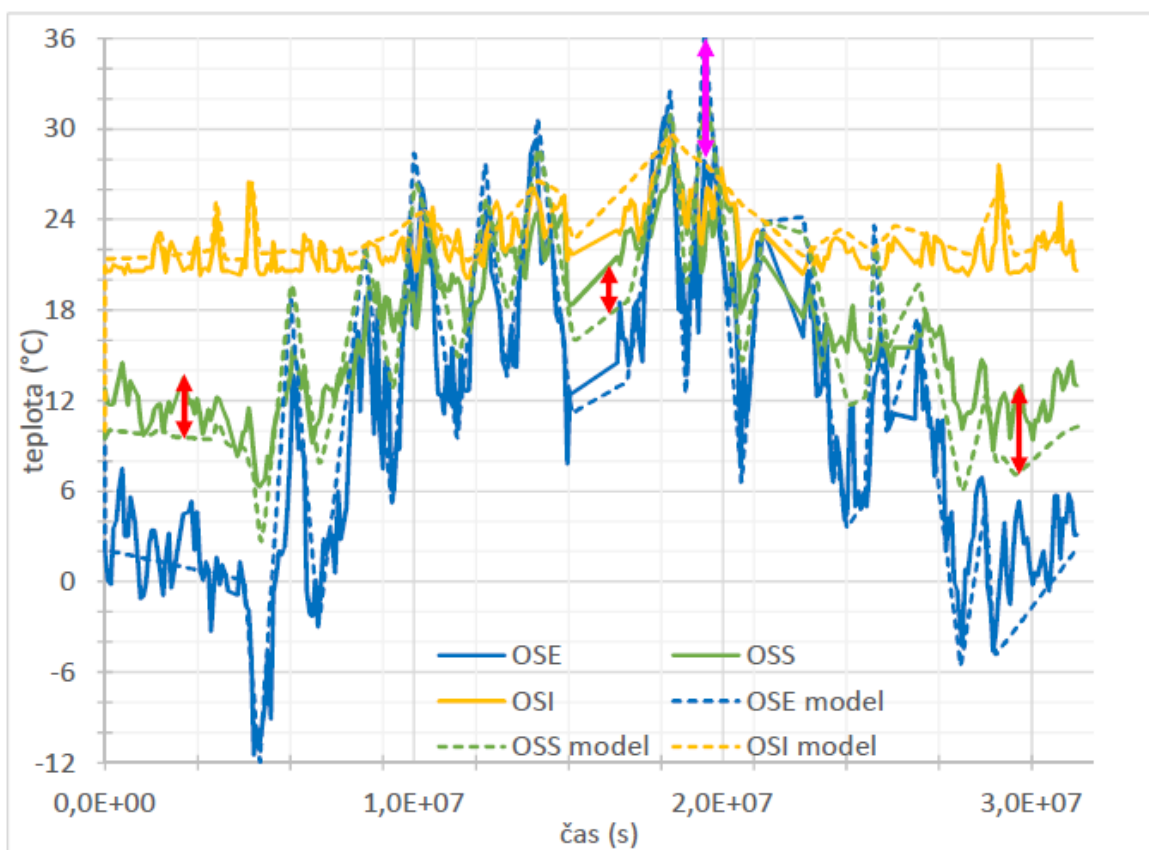
Tabulka 7 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot [°C] v obvodové konstrukci

Naměřené a vypočtené hodnoty teplot [°C] v konstrukci podlahy					
poloha	metoda	max	min	průměr	rozdíl
P	model	27,9	10	21,2	0,3
	experiment	26,7	18,5	20,9	
Z	model	15,1	9,9	12,1	2,5
	experiment	19,2	10	14,6	
MG	model	20,8	10	14,7	1,1
	experiment	24,7	7,7	15,8	

Tabulka 8 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot [°C] v konstrukci podlahy

Naměřené a vypočtené hodnoty relativních vlhkostí vzduchu [%]					
poloha	metoda	max	min	průměr	rozdíl
MG	model	100,5	59,3	79,8	2,1
	experiment	89,8	72,1	81,9	
OSS	model	99,1	30,6	67,3	0,1
	experiment	77,8	61,6	67,4	

Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty relativních vlhkostí vzduchu [%]



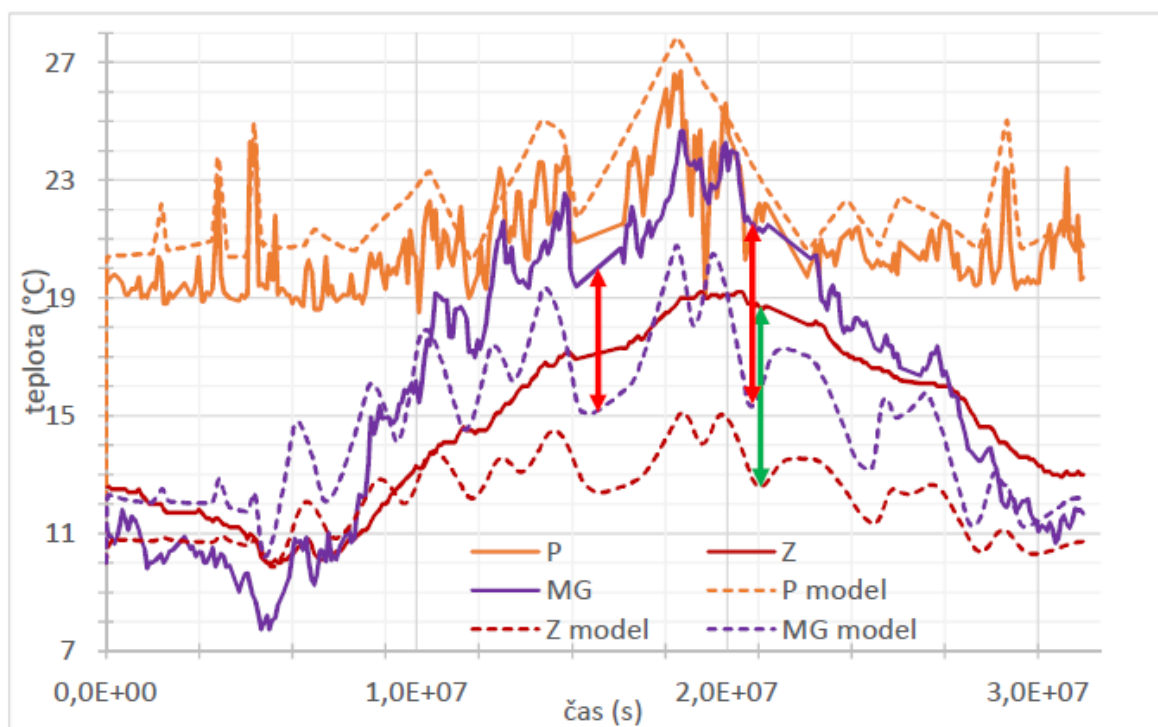
Obr. 42 Průběhy teplot v místě umístění senzorů v obvodové stěně – numerické i experimentální měření

Na Obr. 42 sledující časové období roku 2018 jsou teplotní křivky zaznamenané jak experimentálním, tak numerickým měřením vztaženy k polohám měřicích senzorů uvedených v Obr. 14. Numerickým výpočtem zjištěný teplotní průběh křivky *OSI model* (žlutá přerušovaná) se téměř shoduje s reálným průběhem teplot vyobrazeným křivkou *OSI* (žlutá plná). Což dokazuje i aritmetický průměr dat obou metod uvedených v Tabulka 7, který se shoduje na hodnotě 22,4 °C.

Na opačné exteriérové straně konstrukce se naměřené hodnoty v poloze senzoru *OSE* (modrá) mezi oběma metodami lišily v aritmetickém průměru o 2,1 °C. Ačkoli jsou si dle grafu teplotní průběhy celkem podobné, tak zmíněný rozdíl v průměru doprovází i patrné rozdíly čitelné z grafu. Asi nejviditelnější z nich je znázorněn nahoře růžovou šipkou v časovém období na ose x 2,0E+07s představující letní měsíce, kdy hodnota z numerického výpočtu byla až o 8 °C vyšší než reálná hodnota.

Průběhy teploty uvnitř konstrukce jsou znázorněny křivkami pod označením *OSS* (zelená). Obě měření vykazují stejný průběh teplot, ale s tím rozdílem, že numerická metoda měření (zelená přerušovaná) má intenzivnější kolísání i stoupání teploty uvnitř konstrukce. Dokladem toho jsou i vyšší vypočtená minima a maxima teplot, než vykazují minimální a maximální reálné hodnoty uvedené v Tabulka 7. Rozdíl aritmetického průměru naměřených a vypočtených hodnot je vzhledem k jeho velikosti zanedbatelný. Příklady velikosti rozdílů křivek *OSS* jsou zobrazeny v grafu červenými šipkami a pohybovaly se v rozmezí teplot od 2,5 °C do 6 °C.

Z výše napsaného lze usoudit, že vypočtené teplotní průběhy v obvodové stěně se přes určité odlišnosti na exteriérové straně shodují s reálnými průběhy teplot.



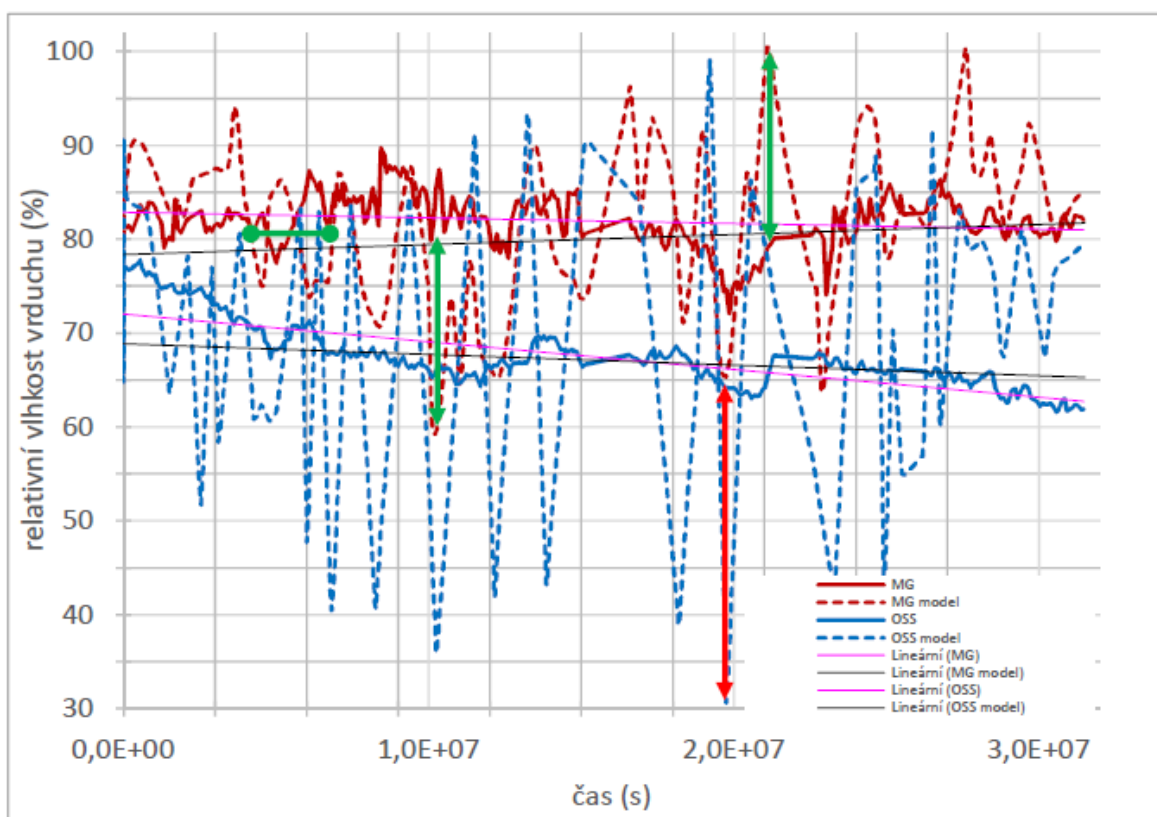
Obr. 43 Průběhy teplot v místě umístění senzorů v podlahové konstrukci – numerické i experimentální měření

Důležitým poznatkem z Obr. 43 znázorňujícím průběhy teplot v podlahové konstrukci jsou všechny teplotní křivky ukazující průběh v teplotách nad bodem mrazu. Při zaměření se na jednotlivé křivky teplotních průběhů jsou patrné větší rozdíly mezi reálnými a simulovanými daty, než tomu bylo u obvodové konstrukce. Jistou analogii s předchozím obrázkem tu nabízí křivky teplotního průběhu *P* (oranžová), které díky své zkoumané poloze v konstrukci pod podlahovým dílcem v interiéru, uvedené na Obr. 14., nevykazují příliš velký rozdíl mezi reálným a numerickým měřením, tak jako teplotní křivky *OSI* a *OSI* model. Tento jev dokládá také nepatrný rozdíl aritmetického průměru dat mezi nimi, který, jak je uvedeno v Tabulka 8, činí 0,3 °C.

Daleko významnější odlišnosti mezi reálným a numerickým měřením jsou na první pohled čitelné u teplotních průběhů pod označením *Z* (červená). V prvních měsících měření se jejich význam pohyboval na nízké hranici 2 °C, ale po dosažení reálného teplotního průběhu svého maxima, nabral na síle 6 °C. Tento význam je promítnut v grafu zelenou šipkou. Měření v této poloze dosahuje se svou hodnotou 2,5 °C (viz Tabulka 8) také největší teplotní odlišnosti v provedených aritmetických průměrech dat.

Podobným způsobem se lišily také průběhy teplot *MG* (fialová) u napojení obvodové svislé konstrukce na konstrukci podlahy. Největší rozsahy nejednoty mezi průběhy jsou v grafu zobrazeny červenými šipkami a dosahují hodnot také až 6 °C. Co se týče podobnosti průběhu teplot, tak ty, se svou tendencí klesat a růst, kolísaly v podobném tempu pouze za střídavých intenzit.

I přes rozdílné intenzity kolísání teploty je možné konstatovat shodu teplotních průběhů v podlahové konstrukci mezi experimentem a numerickým výpočtem.



Obr. 44 Průběhy relativních vzdušných vlhkostí v místě umístění senzorů– numerické i experimentální měření

Zkoumané průběhy rovnovážné vlhkosti vzduchu jsou uvedeny na Obr. 44. Konkrétní polohy zkoumaných míst v konstrukci popisuje Obr. 14. Reálný průběh vlhkosti OSS model (modrá přerušovaná) skrz obvodovou stěnu kolísal oproti simulovanému průběhu (30–99 %) v poměrně malém rozpětí 61–77 %. Ačkoli oba průběhy OSS mají trend klesat, tak v případě reálného průběhu vlhkosti dosahuje tento trend (růžová dole) větší míry klesání, než trend (černá dole) průběhu vlhkostí zjištěného numerickým měřením. Samotné průběhy relativních vlhkostí vzduchu v obvodové stěně mají, i přes velkou diferenci v intenzitě růstu a poklesu, určitou analogii v rytmu klesání a stoupání vlhkosti. Velikost difference v intenzitě kolísání a růstu dosahovala až desítky procent. Příklad její velikosti je v grafu znázorněn červenou šipkou, v tomto případě difference dosáhla až 35 % vlhkosti.

Reálný průběh relativní vzdušné vlhkosti MG vyznačen v grafu červenou plnou čarou má trend (růžová nahoře) pozvolně také klesající. Opakem je tomu však u trendu v modelovém průběhu MG. Ten je pozvolna stoupající. Uvedená odlišnost, ale na tomto zkoumaném vzorku není jediná. U obou metod měření se rozchází opět intenzita, s jakou vlhkost v konstrukci kolísala a také zde hraje roli určitá míra nepravidelnosti kopírování jedné vlhkostní křivky křivkou druhou. Ta je v grafu znázorněna zelenou oválnou šipkou. Teplotní křivka MG (červená plná) v tomto místě vůči křivce MG model (červená přerušovaná) inverzně kolísá. Svislé zelené šipky opět zobrazují v grafu míru diferenciace v intenzitě klesání a růstu vlhkosti v konstrukci. V uvedených místech se jedná o rozdíl 20 % relativní vlhkosti vzduchu mezi reálnými a modelovými hodnotami.

Na základě podobných aritmetických průměrů, ve většině časových období stejných rytmů poklesů a růstů vlhkosti a s ohledem na odlišnosti v intenzitě kolísání, je zde vidět určitá shoda numerického výpočtu s reálným měřením relativní vlhkosti vzduchu v posuzovaném konstrukčním detailu.

6 Diskuze

Hlavním nástrojem pro zjištění reálného chování konstrukčního detailu za působení vlhkosti a tepla byly využity tepelně vlhkostní senzory, které odesílaly data do centrálního počítače. Bylo tedy velice důležité zvolit jejich vhodnou polohu pro získání nejrelevantnějších výsledků. Vzhledem k tomu, že tato práce volně navazuje na projekt, ve kterém bylo zabudovanými sensory v konstrukci sledováno šíření tepla a vlhkosti v dřevostavbě za rok 2018, tak bych rád zmínil, že nebylo v mých silách ovlivnit nic z výběru monitorované dřevostavby, její konstrukční skladby, zeměpisné polohy, či výběrů typů senzorů a jejich poloh pro monitorování stavby. Na základě získaných dat ze sběrnice monitorované budovy jsem ale byl schopen provést jejich analýzu a následnou komparaci s numerickým výpočtem na modelu konstrukčního detailu napojení obvodové stěny a podlahové konstrukce v prvním nadzemním podlaží monitorované dřevostavby.

Úplným základem práce bylo mým úkolem provést vyhodnocení naměřených dat experimentu a posouzení vhodnosti zvolené konstrukční skladby. To jsem provedl na základě teplotních a vlhkostních průběhů. Jelikož ale nebyl v této práci počítán součinitel prostupu tepla posuzovaného detailu, tak následné posouzení s normovými požadavky na tepelné chování konstrukce nemohlo být provedeno. Teplotní průběhy v obvodové stěně i podlahové konstrukci, ale probíhaly dle předpokladů průběhu tepla složenou konstrukcí, tedy z tohoto hlediska jsem usoudil, že skladba by mohla být vyhovující. Z pohledu požadavku na riziko kondenzace vodní páry v konstrukci, tedy že by se v konstrukci dlouhodobě neměla vyskytovat relativní vlhkost vzduchu vyšší než 80 %. V naměřených vlhkostních průbězích konstrukcí jsem zjistil, že vlhkost v obvodové stěně se na počátku měření pohybovala blízko hranice 80 %, ale postupně v průběhu roku snižovala svou hodnotu k 60 %. Počáteční vyšší vlhkost se pravděpodobně dostala do konstrukce při její výrobě či montáži a postupně se z ní odvětrávala ven. Tento jev bývá velmi častý zejména u výroby stěn rovnou na staveništi. Druhé vlhkostní čidlo bylo umístěno k prahu obvodové stěny, kde dochází k napojení na podlahovou a základovou konstrukci. Z hlediska stavební fyziky se jedná o velmi kritické místo. Naměřené hodnoty tento fakt jen potvrdily, protože se zde naměřil vlhkostní průběh, který větší část sledované doby kolísal v rozmezí vlhkosti 80–85 %. Při takhle dlouhé době monitorování je stálé vysoké působení vlhkosti na konstrukci vážnou chybou v konstrukční skladbě detailu a konstrukce je tedy nevyhovující.

Z kontrolních důvodů a pro získání větší představy o rozdílech při použití numerických výpočtů za jiných okrajových podmínek jsem provedl dva výpočty v softwaru FlexPDE, ze kterých jsem na základě porovnání vybral ten výpočet, který byl bližší realitě. Okrajové podmínky byly u prvního výpočtu v čase ustálené (stacionární) a druhý výpočet proběhl za neustále se v čase měnících podmínek okolního prostředí (nestacionární). Porovnávání jednotlivých numerických výpočtů jsem provedl na základě 2 typů vygenerovaných obrázků softwarem FlexPDE. První kategorie obrázků k porovnání výsledků zahrnovala rozložení teplot a relativní vzdušné vlhkosti a jako druhý typ jsem zvolil obrázky znázorňující hustotu tepelného a vlhkostního toku skrz konstrukci. Protože jsem zaznamenal pouze jediný rozdíl v teplotním rozložení mezi metodami výpočtů, tak jsem je vyhodnotil jako velice si podobné. Rozdíl se týkal výrazně menší minimální teploty u stacionárního výpočtu, kde byla vypočtena minimální hodnota $-2,24$ °C a u nestacionárního výpočtu plusová hodnota $2,21$ °C. Rozdíl tedy necelých $4,5$ °C. Dolní hrana fasády představovala bod s nejnižší venkovní teplotou, kterou jsem zaznamenal jak u

výpočtu se stacionárními podmínkami, tak u výpočtu s nestacionárními podmínkami. Výsledky po nestacionárním výpočtu dosahovaly také o 25 % větší intenzity hustoty tepelného toku skrz konstrukci, než tomu bylo u metody nezávislé na čase. U obou metod výpočtu procházel největší tok tepla samozřejmě zeminou, dále na úrovni základové desky a pak skrz dřevěný rám obvodové desky v místě jejího napojení na podlahovou konstrukci, čímž byl tak potvrzen můj předpoklad výskytu tepelného mostu. Napojení obvodové stěny na podlahu a základovou konstrukci se ukázalo jako velmi rizikové místo i při vyhodnocení vlhkostního pole v konstrukci. Nestacionární výpočet v tomto místě vykazoval relativní vzdušnou vlhkost 100 % a nestacionární dokonce 108 %. Tyto hodnoty jsou již za hranicí vzdušné vlhkosti, při které dochází ke kondenzaci vodní páry, a vytváří podmínky vhodné k napadení těchto míst dřevokaznými činiteli, jako jsou hniloby či dřevokazné houby, které mohou znehodnocovat fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů na bázi dřeva a tím také celého konstrukčního detailu. Jedná se o místo, kde se setkávají dvě roviny parozábrany, a to v podání svisle vedené parozábrany v obvodové stěně mezi rámem konstrukce s tepelnou izolací a laťového roštu s tepelnou izolací a v horizontální rovině, kde je vlhkostní tok přerušen na železobetonové desce. Vlhkost je pak koncentrována v místě styku těchto rovin, odkud by za ideálních podmínek měla být odvětrávána ven z konstrukce. V tomto případě k tomu však nedochází, nebo alespoň ne v takové míře, aby byla zajištěna bezpečnost konstrukce. Vysoké hodnoty relativní vzdušné vlhkosti byly vypočteny oběma numerickými metodami také v termofasádě obvodové stěny. Avšak zatímco u stacionárního výpočtu, kde se okrajové podmínky v čase neměnily a působila zde po celou dobu vlhkost vzduchu 87,2 %, se vysoká vlhkost v konstrukci termofasády pohybovala pouze na povrchu, tak v případě působení různých hodnot vlhkostí vzduchu na konstrukci, místy dosahujících až 100 %, se vysoká relativní vzdušná vlhkost pohybovala v konstrukci termofasády až v polovině její tloušťky. I když bylo velice obtížné z obrázků hustot tepelných toků něco vyčíst, tak jsem dle jejich velké podobnosti stanovil i podobný průběh tepelného toku. Pouze 1,5násobně větší intenzitou na straně výpočtu za stacionárních podmínek. Ačkoli se výsledky zjištěné oběma metodami velmi podobaly, jistou míru zkresleného chování konstrukce jsem objevil ve výsledcích provedených stacionárním výpočtem. Tento fakt lze samozřejmě minimalizovat přiřazením okrajových podmínek co nejbližších realitě, ale v případě dlouhodobého monitorování konstrukce v našem podnebí dochází místy k extrémním výkyvům teplot vzduchu a relativní vzdušné vlhkosti, v konsekvenci těchto změn by vznikaly mezi výpočtovými metodami daleko větší rozdíly, než tomu bylo v případě této práce, kdy klimatické podmínky působící na posuzovanou konstrukci byly v průběhu roku celkem mírné. Využití stacionárního výpočtu je na místě, jednak pro jeho větší rychlost, ale také pro kontrolu nestacionárního výpočtu, který za účelem získání přesnějších dat přepočítává velké množství diferenciálních rovnic a trvá tedy mnohem déle.

Za účelem splnění hlavního cíle, tedy komparaci experimentálního řešení a modelového řešení, jsem vybral numerický výpočet za nestacionárních podmínek okolí. Nejdříve jsem musel pomocí softwaru FlexPDE nasimulovat šíření tepla a vlhkost ve zkoumaném konstrukčním detailu. Na základě jeho výstupů jsem pak mohl analyzovat dílčí části konstrukce z pohledu tepelného a vlhkostního průběhu. Pro výpočet bylo s těžejší zadat co nejpresnější hodnoty nejen okrajových podmínek, ale také použitých materiálů v konstrukci. I když jsem po komunikaci se zhotovitelkou firmou stavby získal skladby konstrukcí a velmi stručný přehled materiálů, musel jsem ještě dohledat v technických listech jejich vlastnosti. Je ale jasné, že i přes velkou reflexivnost reálných hodnot, nejsou uváděné hodnoty v technických listech realita, protože, jak již bylo uvedeno v kapitole 3, ve

dřevě neustále probíhají děje snažící se změnami vlastností dřeva dosáhnout rovnováhy. Z tohoto důvodu a z níže uvedených i dalších důvodů se vyznačuje numerický model jistými odchylkami od měření v realitě. Ve výpočtu jsem se zaměřil hlavně na průběh veličin v dřevěných materiálech, konkrétně v dřevěném rámu a laťovém roštu obvodové konstrukce. V případě zjišťovaných teplot byl průběh v dřevěných částech i v celém detailu vzhledem ke skladbě konstrukce celkem očekávaný. Na konstrukci je ale potřeba koukat komplexně, tedy i z pohledu probíhající vlhkosti. V konstrukci ani na jejím povrchu neklesly hodnoty teploty pod bod mrazu, avšak místy docela nízké teploty dřevěných materiálů mohou vést ke kondenzaci vodní páry. Konstrukce je navržena tak, aby byl vlhkostní průběh konstrukcí přerušen instalovanou parozábranou. Problém, ale nastal tehdy, když vlhkost narazila na zmíněnou parozábranu konkrétně u dřevěných roštů z latí. Vlhkost totiž nemohla proudit dál a dle konstrukce detailu nemohla být ani nijak odvětraná, proto se vydala na jediné místo, kam mohla, do dřeva. Uvedené relativní vlhkosti proudící skrz dřevěnou lať na Obr. 37 jsou vysoké se vši pravděpodobností právě díky tomuto faktu. Celkový simulovaný průběh vlhkosti konstrukčním detailem byl velmi kolísavý a čteně dosahující vysokých hodnot nad 80 %. Tyto vysoké hodnoty jsou z hlediska bezpečnosti stavby nepřijatelné. Jak bylo popsáno v kapitole 3.8, nastává tu riziko kondenzace vodní páry, tím se také zhoršují izolační vlastnosti konstrukce a v neposlední řadě vznikají vhodné podmínky pro dřevokazné činitele.

Hlavním cílem této práce, jež jsem si stanovil na začátku, byla komparace reálného chování konstrukčního detailu s numerickým modelem za simulovaného působení tepla a vlhkosti. Tento cíl byl dosažen v kapitole 5.3, kde jsem za pomoci grafů a tabulek poukázal na vzniklé rozdíly mezi experimentem a modelem. Z uvedených výsledků považuji mnou provedený numerický výpočet za verifikovaný, a i přes určité diference mu přisuzuji velkou shodu s měřením provedeným v reálné dřevostavbě. Za téměř shodný považuji vypočtený teplotní průběh skrz obvodovou stěnu, kde v šetřených místech docházelo k velmi nízkým odchylkám kolísání teplot od reality. Za téměř shodný považuji také průběh teploty pod podlahovým dílcem, kde při experimentálním šetření zjišťoval data senzor pod označením *P*. Tato faktická shoda u obou měření je způsobena blízkou vzdáleností zkoumaného místa od působení teplotních podmínek okolí konstrukce. Pokud tedy zadané okrajové podmínky v numerickém výpočtu vychází z reálných hodnot, tak míra shody měření a výpočtu musí být po překonání bariér od jednoho zkoumaného místa k druhému velká. V případě tedy umístění senzoru *P* pod podlahový dílec (5 mm PVC) dochází k překonávání pouze malých bariér. Daleko významnějším způsobem se lišily průběhy teplot v podlahové konstrukci zjišťovaných na úrovni železobetonové desky pod označením *Z* a *MG*, uvedených na Obr. 43. V obou případech jsem zjistil až o 6 °C větší intenzitu kolísání reálné teploty, než tomu bylo u simulovaného průběhu. Zakopaný pes této odchylky numerického řešení od reality leží pravděpodobně v zemině. Zemina totiž v tomto případě šetření průběhu teplot v podlahové konstrukci má z hlediska zkoumané konstrukce k ní přiléhající velký význam. Bohužel při experimentu nebylo provedeno měření teploty ani vlhkosti v přiléhající zemině za sledovaný rok. Musel jsem tedy zvolit okrajové podmínky pro zeminu podle veřejně dostupných informací. Teplota v zemině se v ČR obvykle předpokládá 5 °C a návrhová relativní vlhkost v zemině se uvažuje podle ČSN EN ISO 13788 hodnotou 100 % Z důvodů lokalizace stavby, kde sledovaný rok byl ke konstrukci z hlediska působení klimatických podmínek mnohem přívětivější, jsem zvolil i přívětivější hodnoty. Teplotu vzduchu v zemině 10 °C a relativní vlhkost vzduchu v zemině 80 %. Ve výpočtu tedy byla použita konstantní teplota a vlhkost v zemině, což během roku samozřejmě není pravda. Dokladem

jsou toho také zmíněné odchylky od reality. Dle zobrazených výsledků je ale patrné, že mnou zvolená konstantní teplota zeminy o hodnotě 10 °C by mohla v tomto případě být i vyšší, čímž by se pravděpodobně dosáhlo i shodnějších dat. Toto tvrzení se vztahuje jen a pouze na případ zkoumaný v této práci. Jedním z důvodů, proč se výsledky průběhu teplot zjištěných numerickým výpočtem lišily od reálného měření, je dozajista také výpočetní technikou zanedbaný přenos tepla sáláním. Největší difference při komparaci experimentu s modelem nastaly v případě vlhkostních průběhů v obvodové stěně a na styku posuzované horizontální a vertikální konstrukce. Zde rozdíly intenzit průběhů vlhkostí dosahovaly desítky procent a v případě šetřeného místa ve styku obou konstrukcí se lišil výsledek po numerickém výpočtu od reálně naměřeného výsledku také v opačném kolísání vlhkostních křivek. Tyto jevy mohou být následkem nevhodného zadání okrajových podmínek v zemině, případně také schopností programu počítat jen s konstantními součiniteli přestupu vodní páry materiálů. Možnost důvodu odchylek také vidím ve volbě polohy senzorů, které v případě malé změny souřadnice u modelové konstrukce mohou vést k velkým odchylkám výsledků zjištěných numerickou metodou od měření. K tomuto závěru mě přivedly obrázky 38–41, které znázorňují teplotní a vlhkostní spád mimo jiné i v místech senzorů obvodové a podlahové konstrukce.

Nabízí se tedy otázka, zda byly senzory správně umístěny. Na tuto otázku nelze jednoslovně odpovědět. Na vhodnou polohu se totiž musí pohlížet z vícero aspektů. Z pohledu tepelného a vlhkostního toku si myslím, že senzory by mohly být umístěny více do středu materiálů, kde by poskytovaly více informací o průbězích veličin. Senzory umístěné v obvodové stěně jsou určitě velmi dobrým nástrojem k propagaci skladby konstrukce firmy. Kdy firmy mohou takto veřejnosti simulovat reálný prostup tepla a vlhkostí stěnou a v případě splnění požadavků, pak mohou tvrdit, že jejich konstrukční skladba vyhovuje jak v teoretickém výpočtu, tak reálném měření. Ovšem toto jednoduché pojetí konstrukce bez možných výskytu závažných tepelných mostů a rizikových míst, kde může kondenzovat voda, je značně nedostačující. Velice vítám umístění senzoru u prahu obvodové stěny, jakožto v tomto případě nejrizikovějšího místa v posuzovaném detailu. Vzhledem k tomuto faktu bych zde umístil pro rozšíření informací o šíření teploty a vlhkosti ještě jeden tepelně vlhkostní senzor, který bych posunul více do exteriéru například na styku dřevěného rámu konstrukce, železobetonové desky a perimetru.

Vzhledem k výše diskutovaným závěrům o nepřiliš uspokojivém průběhu relativní vlhkosti vzduchu skrz posuzovaný detail, a tedy požadavkům nevyhovující konstrukci, je na místě zde navrhnout optimalizaci konstrukce, tak aby se eliminovalo riziko kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce. Jelikož nejsem zastáncem nejen z mého pohledu velmi rizikových difuzně uzavřených skladeb konstrukce, tak ani nechci a nebudu se pouštět do úpravy tohoto systému. Naopak mohu doporučit použití takové konstrukční skladby, která bude takřikajíc dýchat. Samozřejmě i tato skladba může být provedena chybně, ale při dodržení základního pravidla – skládat vrstvy za sebe tak, aby byl umožněn přirozený průchod vodní páry z interiéru do exteriéru – se riziko chyby zmenšuje.

V druhé kapitole této práce, kde jsem stanovil její cíle, jsem si vytyčil zodpovědět otázku ohledně věrohodnosti správně používaných konstrukčních skladeb na trhu nabízejících nové dřevostavby. Abych mohl na tuto otázku relevantně odpovědět, bylo by zapotřebí provést výzkum na mnohem více vzorků, než je tento jeden detail z jednoho domu od jedné stavební firmy. I přesto jsem díky této práci a své dosavadní profesní praxi se stavbami, kde hlavním konstrukčním materiálem je dřevo, schopen tvrdit, že s ideálně

zhotovenou stavbou se setkáváme pomálu. Ač jsou projektové práce v kanceláři připravené sebelíp, nebo se projekt dodělává zpětně dle reálného stavu, vždy bude záležet na řemeslníkovi, v horším případě jen na dělníkovi jako na konečném zhotoviteli stavby.

7 Závěr

V předkládané práci jsem se v teoretické části věnoval převážně numerickému řešení šíření tepla a vlhkosti, nastínil jsem rozdělení dřevostaveb včetně uvedení jejich příkladů a pokusil se alespoň stručně vystihnout hlavní body z legislativy upravující požadavky na obálku budovy. Praktická část obsahuje popis mé vlastní práce, která před jejím započítím pro mě byla velká neznámá, až se později stala dobrou známou a její výstupy jsem mohl shrnout do reprezentativních grafů s komentáři popisujícími znázorňující jevy. Svě vysvětlení, domněnky, úvahy a názory o problematice dřevostaveb jsem pak řádně prodiskutoval v diskuzi.

Při analýze dat naměřených v rámci projektu TAČR TH2020792 jsem na základě vyobrazení teplotních a vlhkostních průběhů skrz konstrukci zjistil, že konstrukční detail je v místě styku obvodové a podlahové konstrukce náchylný ke kondenzaci vodní páry. Z tohoto důvodu nevyhovuje požadavkům na obálku budovy.

Před splněním hlavního úkolu, jsem v softwaru FlexPDE provedl dva výpočty. Stacionární výpočet za konstantních podmínek okolí a nestacionární výpočet s podmínkami okolí v závislosti na čase. Jejich porovnáním jsem si potvrdil větší shodu s realitou u nestacionárního výpočtu. Ten jsem následně více analyzoval i v kritických místech dřevěných materiálů. Výsledkem bylo zjištění, že dřevěná lať plnicí funkci roštu je ve velmi intenzivním kontaktu s vysokou relativní vzdušnou vlhkostí téměř po celou dobu sledovaného roku. Tím pádem zde vzniká riziko jak kondenzace vodní páry, tak vytvoření vhodných podmínek pro hniloby a dřevokazné houby.

Hlavního cíle této práce jsem dosáhl porovnáním experimentálního měření provedeného na konstrukčním detailu napojení obvodové stěny s podlahou v dřevostavbě rámové konstrukce, která byla osazena vlhkostními a teplotními senzory, a simulovaného analogického konstrukčního detailu ve formě numerického modelu za nestacionárních podmínek. Ty byly simulovány z dat získaných experimentálním měřením. Obě měření byla provedena pro stejný kalendářní rok 2018. Výsledkem bylo i přes určité nuance, které byly podrobně probrány v diskuzi, stanovení, že se obě šetřící metody ve svých výstupech shodují. Toto konstatování může tedy vést k možnosti využít tuto práci jako argument pro zahájení rekonstrukce objektu.

Výsledky shody by se pravděpodobně mohly ještě zlepšit. Jejich kvalita je totiž závislá převážně na zadaných datech do numerického výpočtu, jako je například v diskuzi analyzované zadání okrajových podmínek v přilehlé zemině, či přesná shoda souřadnic polohy senzorů. Interpretované výsledky numerického modelu jsou také závislé na vlastnostech, které by pravděpodobně ovlivnit nešly, nebo by to bylo svou pracností nad rámec této práce. Je to výpočtem zanedbaná schopnost přenosu tepla sáláním a také schopností výpočetního softwaru pracovat s konstantou součinitele prostupu tepla.

Na základě výsledků z experimentu i numerického výpočtu jsem došel k závěrům, že posuzovaná dřevostavba v konstrukčním detailu napojení obvodové stěny na konstrukci podlahy má své nedostatky konstrukčního typu, které mohou vést až k poškození a následné brzké rekonstrukci celé stavby.

Pro optimalizaci jsem zvolil kompletně se odprostit od záměru uzavřít konstrukci. Z pohledu menší rizikovosti kondenzace vodní páry v konstrukci a zachování přirozené vlastnosti difúze vodní páry se pohybovat ve směru teplotního gradientu jsem navrhl nahrazení posuzované difuzně uzavřené konstrukce konstrukcí difuzně otevřenou.

S přihlédnutím ke všem informacím, kterými jsem si v průběhu této práce rozšiřoval vědomosti, nejen o šíření vlhkosti a tepla, mohu s velkou radostí konstatovat, že tato práce pro mě měla velký profesní smysl. Probudila opět mou touhu se dál věnovat poznávání problematiky dřevostaveb, a především zvýšila mé přesvědčení o důležitosti kvalifikace řemeslníků zabývajících se stavbami na bázi materiálu tak složitého, a přesto natolik skvělého jako je dřevo.

8 Summary

In the presented work, in the theoretical part, I focused mainly on the numerical solution of heat and moisture propagation, I outlined the division of wooden buildings, including their examples, and tried to at least briefly capture the main points of the legislation governing the requirements for building envelope. The practical part contains a description of my own work, which before it began was a big unknown to me until later it became well known and I could summarize its outputs in representative graphs with comments describing the phenomena. I then duly discussed my explanations, assumptions, reflections and opinions on the issue of wooden buildings in the discussion.

When analysing the data measured within the project TAČR TH2020792, based on the depiction of temperature and humidity curves through the structure, I found that the construction detail is prone to condensation of water vapor at the point of contact between the perimeter and floor structures. For this reason, it does not meet the requirements for the building envelope.

Before completing the main task, I performed two calculations in FlexPDE software. Stationary calculation under constant ambient conditions and non-stationary calculation with ambient conditions as a function of time. By comparing them, I confirmed a greater agreement with reality in non-stationary calculation. Subsequently, I analysed it more in critical places of wooden materials. The result was the finding that the wooden slat fulfilling the function of the grate is in very intensive contact with high relative humidity for almost the entire period of the observed year. As a result, there is a risk of both condensation of water vapor and the creation of suitable conditions for rot and wood-destroying fungi.

I achieved the main goal of this work by comparing experimental measurements performed on the structural detail of the perimeter wall connection with the floor in a wooden frame structure, which was equipped with humidity and temperature sensors, and simulated analogous structural detail in the form of a numerical model under non-stationary conditions. These were simulated from data obtained by experimental measurements. Both measurements were performed for the same calendar year 2018. The result was, despite certain nuances that were discussed in detail in the discussion, the determination that both research methods are the same in their outputs. This statement may therefore lead to the possibility of using this work as an argument for starting the reconstruction of the building.

The results of the agreement could probably be further improved. Their quality depends mainly on the data entered into the numerical calculation, such as the input of boundary conditions in the adjacent soil analysed in the discussion, or the exact agreement of the coordinates of the position of the sensors. The interpreted results of the numerical model are also dependent on properties that would probably not be affected or would be beyond the scope of this work. It is a neglected ability to transfer heat by radiation and the ability of computer software to work with the constant heat transfer coefficient.

Based on the results of the experiment and numerical calculation, I came to the conclusion that the assessed wooden building in the structural detail of the perimeter wall connection to the floor structure has its shortcomings of the structural type, which can lead to damage and subsequent early reconstruction of the whole building.

For optimization, I chose to completely free myself from the intention to close the structure. From the point of view of lower risk of water vapor condensation in the structure and preservation of the natural property of water vapor diffusion to move in the direction of the temperature gradient, I proposed to replace the assessed diffusely closed structure with a diffuse open structure.

Considering all the information with which I expanded my knowledge during this work, not only about the spread of moisture and heat, I can state with great pleasure that this work had a great professional meaning for me. It reawakened my desire to continue to learn about the issue of wooden buildings, and above all, increased my belief in the importance of the qualification of craftsmen dealing with buildings based on material as complex, and yet as great as wood.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] **4DZ MK** www.flickr.com [Online] // MK 4DZ - album - 1st & 2nd year. - 2007. - <https://www.flickr.com/photos/mk3ds/186729678/in/photostream/lightbox/>.
- [2] **Ansys** Ansys Mechanical [Online] // Products. - 2015. - <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Structural+Analysis/ANSYS+Mechanical>.
- [3] **CBD** Contemporary Building Desing [Online] // Timber Structures -CLT/XLAM. - 2015. - <http://www.cbd.si/en/timber-structures/cross-laminated-timber-xlam>.
- [4] **Conti Aldo** Universal Design: zukunftsweisende Wohngebäudekonzepte [Kniha]. - Brescia : Fakultät für Architektur, 2016. - str. 307.
- [5] **ČSN 73 0540-3** Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin [Kniha]. - Praha : Český normalizační institut, 2005. - str. 96.
- [6] **ČSN EN ISO 1011** Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích [Kniha]. - Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. - str. 48.
- [7] **Horáček Petr** Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. [Kniha]. - Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. - Sv. 2. : str. 124. - ISBN 978-80-7375-169-2.
- [8] **Inspections DAK Home** www.firerescue1.com [Online] // Fighting the balloon-frame construction fire. - 2015. - <https://www.firerescue1.com/building-construction/articles/fighting-the-balloon-frame-construction-fire-r7WTUe6QEmgytrUY/>.
- [9] **izolace-info.cz** www.izolace-info.cz [Online]. - 2013. - <https://www.izolace-info.cz/aktuality/9208-rosny-bod-a-kondenzace-vodnich-par-ve-zdivu-a.html#.XuZm5EUza70>.
- [10] **Jarolímková Barbora** Analýza kvality vnitřního prostředí v rodinných domech vybavených sběrníci pro dlouhodobý monitoring // Diplomová práce. - Praha : [autor neznámý], 2019.
- [11] **Karásek Jiří, Veleba Jan a Kaločai Ladislav** www.mmr.cz [Online] // Ministerstvo pro místní rozvoj ČR. - 2017. - http://www.mmr.cz/getmedia/e80a3392-2612-4591-8504-73f51cfc96fd/8-2_Analyzy-dopadu-pravnich-predpisu-MMR.pdf.
- [12] **Kleinstreuer Clement** Biofluid Dynamics: Principles and Selected Applications [Book] / trans. Dušek Vaclav. - Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. - Vol. 1. : p. 528. - 978-0849322211.
- [13] **Kolb Josef** Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště [Kniha] / překl. Ing. Bohumil Koželouh CSc.. - Praha : Grada Publishing, a.s., 2011. - str. 320. - ISBN 978-80-247-7115-1.
- [14] **Kurjatko Stanislav** Náuka o dreve. Metódy zistovania fyzikálnych vlastností dreva a veľkoplošných drevných materiálov. Návodý na cvičenia [Kniha]. - Zvolen : VŠLD, 1990. - str. 116.

- [15] **Lokaj Antonín a kolektiv** Dřevostavby a dřevěné konstrukce I. a II. díl [Kniha]. - Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2010. - str. 309. - ISBN: 978-80-7204-732-1.
- [16] **Luedi Urs** Holzbausysteme [Konference] // Holz und Bau. - Bern : Berner Fachhochschule Architektur, 2007.
- [17] **Pavlas Marek** Dřevostavby z vrstvených masivních panelů: Technologie CLT [Kniha]. - Praha : Grada Publishing, a.s., 2016. - str. 96. - ISBN 978-80-271-0055-2.
- [18] **Pohloudek Jiří, Trgala Kamil a Holub Jan** Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledků [Kniha]. - 2017.
- [19] **Rektorys Karel** Variační metody v inženýrských problémech a v problémech matematické fyziky [Kniha]. - Praha : Academia, 1999. - str. 602. - ISBN 80-20007-14-8.
- [20] **Růžička Martin** Moderní dřevostavba [Kniha]. - Praha : Grada Publishing, a.s., 2014. - str. 160. - ISBN 978-80-247-3298-5.
- [21] **Vaverka Jiří** Stavební tepelná technika a energetika budov [Kniha]. - Brno : Akademické nakladatelství, VUTIUM, 2006. - str. 648. - ISBN 8021429100.
- [22] **Vaverka Jiří, Havířová Zdena a Jindrák Miroslav a kol.** Dřevostavby pro bydlení [Kniha]. - Praha : Grada Publishing, a.s., 2008. - str. 380. - ISBN 978-80-247-2205-4.
- [23] **Velfel Petr** Energie pro rodinný dům [Kniha]. - Hradec Králové : Paradise Studio, 2010. - str. 176. - ISBN 978-80-254-7679-6.
- [24] **Vitásek Emil** Základy teorie numerických metod pro řešení diferenciálních rovnic. Praha: Academia, 1994, 409 s. [Kniha]. - Praha : Academia, 1994. - str. 409. - ISBN 8020002812.
- [25] **www.cerdo-fachwerkhaus.de** Haus in Oberfranken [Online] // Bildergalerie modernen Fachwerkhäuser. - https://www.cerdo-fachwerkhaus.de/sites/default/files/gallery-images/beitrag-58/cerdo-fachwerkhaus-img_9901.jpg.
- [26] **www.dlk-melle.de** Bildergalerie Einfamilienhäuser [Online] // Deutsche Landhaus Klassiker. - https://www.dlk-melle.de/content/upload/galerie/einfamilienhaeuser/efhgalerie_058.jpg.
- [27] **XLAM Dolomiti** www.xlamdolomiti.it [Online] // Production Catalog. - 2019. - https://www.xlamdolomiti.it/assets/site/doc/Xlam_Dolomiti_Construction.pdf.

9.1.1 Seznam uvedených obrázků

Obr. 1 Prostup tepla stěnou (vlastní zdroj)	21
Obr. 2 Malý srub sloužící pro prodej potravin od zemědělců (vlastní zdroj).....	26
Obr. 3 Vícepodlažní dům z CLT panelů (XLAM Dolomiti, 2019)	27
Obr. 4 Moderní hrázděná stavba s viditelnou nosnou konstrukcí (www.dlk-melle.de).....	28
Obr. 5 Moderní skeletová dřevostavba (www.cerdo-fachwerkhaus.de)	29
Obr. 6 (vpravo) Model konstrukčního systému Balloon-Frame (Inspections, 2015)	29
Obr. 7 (dole) Model konstrukčního systému Platform-Frame (4DZ, 2007).....	29
Obr. 8 (nahore) Rámová dřevostavba 3. den výstavby (vlastní zdroj).....	30
Obr. 9 (vlevo) Rámová dřevostavba při předání majiteli (vlastní zdroj)	30
Obr. 10 Geometrie konstrukčního detailu napojení svislé stěny na konstrukci podlahy (vlastní zdroj).....	34
Obr. 11 Instalace teplotně vlhkostních senzorů do podhledu stropní konstrukce (Projekt TH202079).....	36
Obr. 12 Instalace teplotně vlhkostních senzorů do svislé konstrukce (Projekt TH202079)	36
Obr. 13 (vlevo) Rozmístění monitorovacích čidel v budově (Projekt TH202079)	37
Obr. 14 (vpravo) Geometrie polohy čidel v posuzovaném detailu (vlastní zdroj)	37
Obr. 15 Posuzovaný detail po rozdělení na jednotlivé uzly nástrojem Mesh.....	39
Obr. 16 Ukázka výstupu ze softwaru FlexPDE v textové podobě.....	40
Obr. 17 Ukázka výstupu ze softwaru FlexPDE v grafické podobě.....	40
Obr. 18 Reálný průběh vnitřní (tempin) a vnější (tempout) teploty vzduchu okolního prostředí.....	42
Obr. 19 Reálný průběh vnitřní (fin) a vnější (fout) relativní vlhkosti vzduchu okolního prostředí.....	43
Obr. 20 Průběh teplot naměřených čidly umístěnými ve svislé konstrukci	43
Obr. 21 Průběh teplot naměřených čidly umístěnými v podlahové konstrukci.....	44
Obr. 22 Průběh relativních vlhkostí vzduchu naměřených čidly umístěnými v konstrukci posuzovaného detailu	45
Obr. 23 Průběh vnitřní (1) a vnější (2) teploty vzduchu okolního prostředí u nestacionárního výpočtu	46
Obr. 24 Průběh vnitřní (2) a vnější (1) relativní vlhkosti vzduchu okolního prostředí u nestacionárního výpočtu	47
Obr. 25 Průběhy teplot [°C] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem.....	47
Obr. 26 Průběhy relativních vlhkostí vzduchu [%] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem.....	48

Obr. 27 Průběhy hustoty tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem.....	49
Obr. 28 Průběhy hustoty vlhkostního toku [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$] v konstrukci detailu provedené stacionárním a nestacionárním výpočtem.....	50
Obr. 29 Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě umístěných čidel ve svislé konstrukci.....	51
Obr. 30 Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě umístěných čidel v podlahové konstrukci.....	51
Obr. 31 Přiblížený detail rozložení teplotního pole (vlevo) a hustoty tepelného toku (vpravo) zjištěnou numerickou metodou	52
Obr. 32 (vlevo) Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného rámu	52
Obr. 33 (vpravo) Průběh teplot vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného laťového roštu	52
Obr. 34 Průběh relativních vzdušných vlhkostí vypočtených numerickým výpočtem v místě umístěných čidel.....	53
Obr. 35 Přiblížený detail rozložení vlhkostního pole (vlevo) a hustoty vlhkostního toku (vpravo)	53
Obr. 36 Průběh relativních vzdušných vlhkostí vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného laťového roštu	54
Obr. 37 Průběh relativních vzdušných vlhkostí vypočtených numerickým výpočtem v místě dřevěného rámu.....	54
Obr. 38 Teplotní spád v konstrukci obvodové stěny.....	55
Obr. 39 Teplotní spád v konstrukci podlahy.....	55
Obr. 40 Vlhkostní spád v konstrukci obvodové stěny.....	56
Obr. 41 Vlhkostní spád v konstrukci podlahy	56
Obr. 42 Průběhy teplot v místě umístění senzorů v obvodové stěně – numerické i experimentální měření.....	58
Obr. 43 Průběhy teplot v místě umístění senzorů v podlahové konstrukci – numerické i experimentální měření.....	59
Obr. 44 Průběhy relativních vzdušných vlhkostí v místě umístění senzorů– numerické i experimentální měření.....	60

9.1.2 Seznam uvedených tabulek

Tabulka 1 Druhy přeměn skupenství látky (vlastní zdroj)	13
Tabulka 2 Hodnoty koeficientu difúze D pro smrkové dřevo (Kurjatko, 1990)	17
Tabulka 3 Hodnoty tepelně-vlhkostních vlastností vybraných materiálů převzatých z (ČSN 73 0540-3, 2005)	25
Tabulka 4 Vývoj součinitele prostupu tepla (Karásek, a další, 2017).....	33
Tabulka 5 Hodnoty vlastností materiálů použitých v konstrukci	35
Tabulka 6 Legenda vrstev konstrukčních skladeb k spádovým grafům	55
Tabulka 7 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot [°C] v obvodové konstrukci.....	57
Tabulka 8 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot [°C] v konstrukci podlahy.....	57
Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty relativních vlhkostí vzduchu [%].....	57

10 Přílohy

10.1 Seznam příloh ve vazbě diplomové práce

- Příloha 1) Skript pro výpočet teplotního a vlhkostního pole v konstrukci posuzovaného detailu za stacionárních podmínek
- Příloha 2) Skript pro výpočet teplotního a vlhkostního pole v konstrukci posuzovaného detailu za nestacionárních podmínek

10.2 Seznam vložených příloh

- Výkres č. 1. Půdorys 1.NP s vyznačenými čidly
- Výkres č. 2. Řez A-A s vyznačenými čidly
- Výkres č. 3. Detail D s čidly a skladbami konstrukcí

Příloha 1

Skript pro výpočet teplotního a vlhkostního pole v konstrukci posuzovaného detailu za stacionárních podmínek

TITLE 'Prestup tepla složenou stenou (steady) '

SELECT

errlim=1e-3
painted
cell_limit=10000

VARIABLES

temp
p

DEFINITIONS

temp_ini=273.15+10

tempin=273+21.7

{stacionarni vypocet}

tempout=273-2.1

{stacionarni vypocet}

f_ini=0.6

fout=0.872

{stacionarni vypocet}

fin=0.505

{stacionarni vypocet}

temppuda=273.15+10

p0puda = if (temppuda>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temppuda-273.15)/(237.3+(temppuda-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(temppuda-273.15)/(265.5+(temppuda-273.15)))

ppuda=p0puda*0.9

{obvodova stena}

OMd=0.007

OMh=2.665+0.317

sPSd=0.1

sPSh=2.665+0.317

FERd1=0.015

FERh1=2.665+0.317

SMd1=0.12

SMh1=0.09

SMd2=0.12

SMh2=0.12+0.03

TIId1=0.12

TIh1=2.665-(0.12-0.025)

PEFd=0.002

PEFh=2.665

SMd3=0.04

SMh3=0.06

SMd4=0.04

SMh4=0.06

TIId2=0.04

TIh2=2.665-SMh4

FERd2=0.015

FERh2=2.665

{strop}

dd=1

DTDh=0.022

TIh3=0.24

LRh=0.03

SKh=0.025

{podlaha}

vz=OMd+2*sPSd/3

os=OMd+sPSd+FERd1+TIId1+PEFd+TIId2+FERd2

PKd=0.005

DTDd=0.025

pPSd=0.1

SPd=0.02

EPSd=0.05

EPSh=0.43

ZBh=0.13

Bh1=0.05

Bd2=0.3

Zh=0.75

```

{cidla}
osex=0
osey=1.5
ossx=OMd+sPSd+FERd1/2
ossy=1.5
osix=os
osiy=1.5
px=os+0.5
py=PEFd+SPd+pPSd
zx=os+0.5
zy=0

R=8.31441                                {univerzalni plynova konstanta}
M=0.0180153

p0_ini = if (temp_ini>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp_ini-273.15)/(237.3+(temp_ini-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(temp_ini-273.15)/(265.5+(temp_ini-273.15)))
p_ini=f_ini*p0_ini

p0in = if (tempin>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempin-273.15)/(237.3+(tempin-273.15))) else 610.5*EXP(21.875*(tempin-
273.15)/(265.5+(tempin-273.15)))
p0out = if (tempout>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempout-273.15)/(237.3+(tempout-273.15))) else 610.5*EXP(21.875*(tempout-
273.15)/(265.5+(tempout-273.15)))

pout=p0out*fout
pin=p0in*fin

p0 = if (temp>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp-273.15)/(237.3+(temp-273.15))) else 610.5*EXP(21.875*(temp-
273.15)/(265.5+(temp-273.15)))
f=p/p0

kx
ky
cw
Gw
deltax
deltay

htin=8

htout=25
hpin=2.04e-6*htin/temp
hpout=2.04e-6*htout/temp

q=vector(-kx*dx(temp),-ky*dy(temp))
j=vector(-deltax*dx(p),-deltay*dy(p))

temp_ram_prum=integral(temp,4)/(0.12*0.09)-273.15
temp_ram_max=globalmax(temp,4)-273.15
temp_ram_min=globalmin(temp,4)-273.15
f_ram_prum=integral(f,4)/(0.12*0.09)*100
f_ram_max=globalmax(f,4)*100
f_ram_min=globalmin(f,4)*100

temp_lat_prum=integral(temp,9)/(0.04*0.06)-273.15
temp_lat_max=globalmax(temp,9)-273.15
temp_lat_min=globalmin(temp,9)-273.15
f_lat_prum=integral(f,9)/(0.04*0.06)*100
f_lat_max=globalmax(f,9)*100
f_lat_min=globalmin(f,9)*100

INITIAL VALUES
temp=temp_ini                                {pocatecni teplota}

p=p_ini                                       {pocatecni parcialni tlak vodnich par}

EQUATIONS
temp: dx(kx*dx(temp))+dy(ky*dy(temp))=0
p: dx(deltax*dx(p))+dy(deltay*dy(p))=0

BOUNDARIES
REGION 1 {omitka}

```

```

kx=0.18
ky=kx
cw=850
Gw=1800
deltax=0.00543e-9
deltay=deltax
start (0,0)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to (OMd,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd,OMh)
line to (0,OMh)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to close

REGION 2 {sedy PS}
kx=0.032
ky=kx
cw=1270
Gw=15
deltax=0.00633e-9
deltay=deltax
start (OMd,0)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to (vz,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd,0)
line to (OMd+sPSd,sPSh)
line to (OMd,sPSh)
line to close

REGION 3 {FERMACELL1}
kx=0.32
ky=kx
cw=1100
Gw=1150
deltax=0.01462e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1,0)
line to (OMd+sPSd+FERd1,FERh1)
line to (OMd+sPSd,sPSh)
line to close

REGION 4 {SM ram}
kx=0.18
ky=kx
cw=2510
Gw=400
deltax=0.0012e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFd)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFd+SMh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1,PEFd+SMh1)
line to close

REGION 5 {SM ram}
kx=0.18
ky=kx

```

```

cw=2510
Gw=400
deltax=0.0012e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,TIh1)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd2,TIh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd2,TIh1+SMh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1,TIh1+SMh2)
line to close

REGION 6 {Tep. izolace 1}
kx=0.035
ky=kx
cw=800
Gw=40
deltax=0.0019e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,PEFd+SMh1)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFd+SMh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,TIh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1,TIh1)
line to close

REGION 7 {PE folie}
kx=0.35
ky=kx
cw=1470
Gw=1450
deltax=3.8e-15
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,0)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFh)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFh)
line to close

REGION 8 {Tep. izolace 2}
kx=0.037
ky=kx
cw=840
Gw=15
deltax=0.019e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,TIh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,TIh2)
line to close

REGION 9 {SM late}
kx=0.18
ky=kx
cw=2510
Gw=400
deltax=0.00121e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFd+0.06)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd+0.06)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd+0.06+SMh3)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFd+0.06+SMh3)
line to close

REGION 10 {SM late}
kx=0.18
ky=kx

```

```

cw=2510
Gw=400
deltax=0.00121e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,FERh2-SMh2)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,FERh2-SMh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,FERh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,FERh2)
line to close

REGION 11 {FERMACELL2}
kx=0.32
ky=kx
cw=1100
Gw=1150
deltax=0.01462e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3+FERd2,PEFd)
    natural(temp)=-htin*(temp-tempin)
    natural(p)=-hpin*(p-pin)
! value(temp)=tempin
! value(p)=pin
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3+FERd2,FERh2)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,FERh2)
line to close

{PODLAHA}

REGION 12 {zemina}
kx=1.4
ky=kx
cw=920
Gw=1800
deltax=0.12666e-9
deltay=deltax
start (-0.5,-0.18)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to (vz,-0.18)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,-0.18)
line to (dd,-0.9)
    value(temp)=temppuda
    value(p)=ppuda
line to (-0.5,-0.9)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to close

REGION 13 {zelezobeton}
kx=1.58
ky=kx
cw=1020
Gw=2400
deltax=0.006552e-9
deltay=deltax
start (vz,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,0)
line to (dd,0-ZBh)
line to (vz,0-ZBh)
line to close

REGION 14 {beton}

```



```

kx=1.36
ky=kx
cw=1020
Gw=2300
deltax=0.008261e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-ZBh)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
    line to (dd,0-ZBh)
    line to (dd,0-ZBh-Bh1)
    line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-ZBh-Bh1)
    line to close
start (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-ZBh-Bh1)
    line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd+Bd2,0-ZBh-Bh1)
    line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd+Bd2,0-Zh)
    line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-Zh)
    line to close

```

```

REGION 15 {sokl EPS}
kx=0.035
ky=kx
cw=1270
Gw=25
deltax=0.0038e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
    line to (OMd+sPSd+FERd1,0)
    line to (OMd+sPSd+FERd1,0-EPSH)
    line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-EPSH)
    line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,-0.18)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
    ! value(temp)=tempout
    ! value(p)=pout
    line to close

```

```

REGION 16 {PE folie}
kx=0.35
ky=kx
cw=1470
Gw=1450
deltax=3.8e-15
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
    line to (dd,0)
    line to (dd,PEFd)
    line to (OMd+sPSd+FERd1,PEFd)
    line to close
start (OMd+sPSd+FERd1,0)
    line to (OMd+sPSd+FERd1,-0.18)
    line to (OMd+sPSd+FERd1+PEFd,-0.18)
    line to (OMd+sPSd+FERd1+PEFd,0)
    line to close

```

```

REGION 17 {suchy podsyp}
kx=0.16
ky=kx
cw=1260
Gw=450
deltax=0.054286e-9
deltay=deltax
start (OS,PEFd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
    line to (dd,PEFd)
    line to (dd,PEFd+SPd)
    line to (OS,PEFd+SPd)
    line to close

```

```

REGION 18 {PS podlaha}

```

```

kx=0.037
ky=kx
cw=1270
Gw=20
deltax=0.0038e-9
deltay=deltax
start (OS,PEFd+SPd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,PEFd+SPd)
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd)
line to (OS,PEFd+SPd+pPSd)
line to close

REGION 19 {DTD}
kx=0.11
ky=kx
cw=1500
Gw=800
deltax=0.00356e-9
deltay=deltax
start (OS,PEFd+SPd+pPSd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd)
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
line to (OS,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
line to close

REGION 20 {podlahova krytina}
kx=0.2
ky=kx
cw=1100
Gw=1380
deltax=2.02e-15
deltay=deltax
start (OS,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd+DTDd+PKd)
    natural(temp)=-htin*(temp-tempin)
    natural(p)=-hpin*(p-pin)
! value(temp)=tempin
! value(p)=pin
line to (OS,PEFd+SPd+pPSd+DTDd+PKd)
line to close

PLOTS
    contour(temp-273.15) as "teplota (st.C)"
    contour(f) fixed range (0,1) as "relativni vlhkost vzduchu (x100 %)"
    contour(p) as "parcialni tlak nenasycenych vodnich par (Pa)"
    contour(p0) as "parcialni tlak nasycenych vodnich par (Pa)"
    vector(q) fixed range (0,25) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
    vector(j) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"
    elevation(temp-273.15) from (osex,osey) to (osix,osiy) as "teplotni spad (st.C)" !export format "#y#b#1" file="teplotni spad.txt"
    elevation(temp-273.15) from (zx,zy) to (px,py) as "teplotni spad (st.C)" !export format "#y#b#1" file="teplotni spad.txt"
    elevation(temp-273.15) from (0,0.025) to (dd,0.025) as "teplotni spad (st.C)" !export format "#y#b#1" file="teplotni spad.txt"
    elevation(f*100) from (osex,osey) to (osix,osiy) as "spad RVV (%)" !export format "#y#b#1" file="vlhkostni spad.txt"
    elevation(f*100) from (zx,zy) to (px,py) as "spad RVV (%)" !export format "#y#b#1" file="vlhkostni spad.txt"
    elevation(f*100) from (0,0.025) to (dd,0.025) as "spad RVV (%)" !export format "#y#b#1" file="vlhkostni spad.txt"

SUMMARY
report "SM ram"
report(temp_ram_prum, temp_ram_max, temp_ram_min) as "teplota - prum, max., min. (st.C) "
report(f_ram_prum, f_ram_max, f_ram_min) as "RVV - prum, max., min. (%) "
report ""
report "SM lat"
report(temp_lat_prum, temp_lat_max, temp_lat_min) as "teplota - prum, max., min. (st.C) "
report(f_lat_prum, f_lat_max, f_lat_min) as "RVV - prum, max., min. (%) "

END

```

Příloha 2

Skript pro výpočet teplotního a vlhkostního pole v konstrukci posuzovaného detailu za nestacionárních podmínek

TITLE 'Prestup tepla slozenou stenou (un-steady)'

SELECT

errlim=1e-2
painted
cell_limit=10000

VARIABLES

temp
p

DEFINITIONS

temp_ini=273.15+10
tempin=table ('tempin.tbl')
tempout=table ('tempout.tbl')
f_ini=0.8
fin=table ('fin.tbl')
fout=table ('fout.tbl')

temppuda=273.15+10

p0puda = if (temppuda>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temppuda-273.15)/(237.3+(temppuda-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(temppuda-273.15)/(265.5+(temppuda-273.15)))
ppuda=p0puda*0.9

{obvodova stena}

OMd=0.007
OMh=2.665+0.317
sPSd=0.1
sPSh=2.665+0.317
FERd1=0.015
FERh1=2.665+0.317
SMd1=0.12
SMh1=0.09
SMd2=0.12
SMh2=0.12+0.03
TId1=0.12
TTh1=2.665-(0.12-0.025)
PEFd=0.002
PEFh=2.665
SMd3=0.04
SMh3=0.06
SMd4=0.04
SMh4=0.06
TId2=0.04
TTh2=2.665-SMh4
FERd2=0.015
FERh2=2.665

{strop}

dd=1
DTDh=0.022
TTh3=0.24
LRh=0.03
SKh=0.025

{podlaha}

vz=OMd+2*sPSd/3
os=OMd+sPSd+FERd1+TId1+PEFd+TId2+FERd2
PKd=0.005
DTDd=0.025
pPSd=0.1
SPd=0.02
EPSd=0.05
EPSh=0.43
ZBh=0.13
Bh1=0.05
Bd2=0.3
Zh=0.75

```

{cidla}
osex=0
osey=1.5
ossx=OMd+sPSd+FERd1
ossy=1.5
osix=os
osiy=1.5
px=os+0.5
py=PEFd+SPd+pPSd
zx=os+0.5
zy=0
mgx=0.245    !OMd+sPSd+FERd1+SMd1
mgy=0.0625   !SMh1/3

R=8.31441                                { univerzalni plynova konstanta }
M=0.0180153                              { molarni hmotnost vodni pary }

p0_ini = if (temp_ini>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp_ini-273.15)/(237.3+(temp_ini-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(temp_ini-273.15)/(265.5+(temp_ini-273.15)))
p_ini=f_ini*p0_ini
p0in = if (tempin>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempin-273.15)/(237.3+(tempin-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(tempin-273.15)/(265.5+(tempin-273.15)))
p0out = if (tempout>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempout-273.15)/(237.3+(tempout-273.15))) else 610.5*EXP(21.875*(tempout-
273.15)/(265.5+(tempout-273.15)))
pout=p0out*fout
pin=p0in*fin
p0 = if (temp>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp-273.15)/(237.3+(temp-273.15))) else 610.5*EXP(21.875*(temp-
273.15)/(265.5+(temp-273.15)))
f=p/p0

kx
ky
cw
Gw

deltax
deltay

htin=8
htout=25
hpin=2.04e-6*htin/temp
hpout=2.04e-6*htout/temp

q=vector(-kx*dx(temp),-ky*dy(temp))
j=vector(-deltax*dx(p),-deltay*dy(p))

temp_ram_prum=integral(temp,4)/(0.12*0.09)-273.15
temp_ram_max=globalmax(temp,4)-273.15
temp_ram_min=globalmin(temp,4)-273.15
f_ram_prum=integral(f,4)/(0.12*0.09)*100
f_ram_max=globalmax(f,4)*100
f_ram_min=globalmin(f,4)*100

temp_lat_prum=integral(temp,9)/(0.04*0.06)-273.15
temp_lat_max=globalmax(temp,9)-273.15
temp_lat_min=globalmin(temp,9)-273.15
f_lat_prum=integral(f,9)/(0.04*0.06)*100
f_lat_max=globalmax(f,9)*100
f_lat_min=globalmin(f,9)*100

INITIAL VALUES
temp=temp_ini                                { pocatecni teplota }
p=p_ini                                      { pocatecni parcialni tlak vodnich par }

EQUATIONS
temp: dx(kx*dx(temp))+dy(ky*dy(temp))-Gw*cw*dt(temp)=0
p: dx(deltax*dx(p))+dy(deltay*dy(p))-M/(R*temp)*dt(p)=0

BOUNDARIES
REGION 1 { omitka }
kx=0.18
ky=kx
cw=850
Gw=1800
deltax=0.00543e-9
deltay=deltax

```

```

start (0,0)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to (OMd,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd,OMh)
line to (0,OMh)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to close

REGION 2 {sedy PS}
kx=0.032
ky=kx
cw=1270
Gw=15
deltax=0.00633e-9
deltay=deltax
start (OMd,0)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to (vz,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd,0)
line to (OMd+sPSd,sPSh)
line to (OMd,sPSh)
line to close

REGION 3 {FERMACELL1}
kx=0.32
ky=kx
cw=1100
Gw=1150
deltax=0.01462e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1,0)
line to (OMd+sPSd+FERd1,FERh1)
line to (OMd+sPSd,sPSh)
line to close

REGION 4 {SM ram}
kx=0.18
ky=kx
cw=2510
Gw=400
deltax=0.0012e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFd)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFd+SMh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1,PEFd+SMh1)
line to close

REGION 5 {SM ram}
kx=0.18
ky=kx
cw=2510
Gw=400
deltax=0.0012e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,Tih1)
    natural(temp)=0

```

```

        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd2,TIh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd2,TIh1+SMh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1,TIh1+SMh2)
line to close

REGION 6 { Tep. izolace 1 }
kx=0.035
ky=kx
cw=800
Gw=40
deltax=0.0019e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,PEFd+SMh1)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFd+SMh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,TIh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1,TIh1)
line to close

REGION 7 { PE folie }
kx=0.35
ky=kx
cw=1470
Gw=1450
deltax=3.8e-15
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,0)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,0)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFh)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1,PEFh)
line to close

REGION 8 { Tep. izolace 2 }
kx=0.037
ky=kx
cw=840
Gw=15
deltax=0.019e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFd)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,TIh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,TIh2)
line to close

REGION 9 { SM late }
kx=0.18
ky=kx
cw=2510
Gw=400
deltax=0.00121e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFd+0.06)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd+0.06)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd+0.06+SMh3)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,PEFd+0.06+SMh3)
line to close

REGION 10 { SM late }
kx=0.18
ky=kx
cw=2510
Gw=400
deltax=0.00121e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,FERh2-SMh2)
        natural(temp)=0

```

```

        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,FERh2-SMh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,FERh2)
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd,FERh2)
line to close

```

```

REGION 11 {FERMACELL2}
kx=0.32
ky=kx
cw=1100
Gw=1150
deltax=0.01462e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,PEFd)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3+FERd2,PEFd)
        natural(temp)=-htin*(temp-tempin)
        natural(p)=-hpin*(p-pin)
! value(temp)=tempin
! value(p)=pin
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3+FERd2,FERh2)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1+SMd1+PEFd+SMd3,FERh2)
line to close

```

```
{PODLAHA}
```

```

REGION 12 {zemina}
kx=1.4
ky=kx
cw=920
Gw=1800
deltax=0.12666e-9
deltay=deltax
start (-0.5,-0.18)
        natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
        natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to (vz,-0.18)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (dd,-0.18)
line to (dd,-0.9)
        value(temp)=temppuda
        value(p)=ppuda
line to (-0.5,-0.9)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to close

```

```

REGION 13 {zelezobeton}
kx=1.58
ky=kx
cw=1020
Gw=2400
deltax=0.006552e-9
deltay=deltax
start (vz,0)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (dd,0)
line to (dd,0-ZBh)
line to (vz,0-ZBh)
line to close

```

```

REGION 14 {beton}
kx=1.36
ky=kx
cw=1020
Gw=2300
deltax=0.008261e-9
deltay=deltax

```

```

start (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-ZBh)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,0-ZBh)
line to (dd,0-ZBh-Bh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-ZBh-Bh1)
line to close
start (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-ZBh-Bh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd+Bd2,0-ZBh-Bh1)
line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd+Bd2,0-Zh)
line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-Zh)
line to close

```

```

REGION 15 {sokl EPS}
kx=0.035
ky=kx
cw=1270
Gw=25
deltax=0.0038e-9
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (OMd+sPSd+FERd1,0)
line to (OMd+sPSd+FERd1,0-EPSH)
line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,0-EPSH)
line to (OMd+sPSd+FERd1-EPSd,-0.18)
    natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
    natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(temp)=tempout
! value(p)=pout
line to close

```

```

REGION 16 {PE folie}
kx=0.35
ky=kx
cw=1470
Gw=1450
deltax=3.8e-15
deltay=deltax
start (OMd+sPSd+FERd1,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,0)
line to (dd,PEFd)
line to (OMd+sPSd+FERd1,PEFd)
line to close
start (OMd+sPSd+FERd1,0)
line to (OMd+sPSd+FERd1,-0.18)
line to (OMd+sPSd+FERd1+PEFd,-0.18)
line to (OMd+sPSd+FERd1+PEFd,0)
line to close

```

```

REGION 17 {suchy podsyp}
kx=0.16
ky=kx
cw=1260
Gw=450
deltax=0.054286e-9
deltay=deltax
start (OS,PEFd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,PEFd)
line to (dd,PEFd+SPd)
line to (OS,PEFd+SPd)
line to close

```

```

REGION 18 {PS podlaha}
kx=0.037
ky=kx
cw=1270
Gw=20
deltax=0.0038e-9
deltay=deltax

```



```

start (OS,PEFd+SPd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,PEFd+SPd)
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd)
line to (OS,PEFd+SPd+pPSd)
line to close

REGION 19 {DTD}
kx=0.11
ky=kx
cw=1500
Gw=800
deltax=0.00356e-9
deltay=deltax
start (OS,PEFd+SPd+pPSd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd)
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
line to (OS,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
line to close

REGION 20 {podlahova krytina}
kx=0.2
ky=kx
cw=1100
Gw=1380
deltax=2.02e-15
deltay=deltax
start (OS,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd+DTDd)
line to (dd,PEFd+SPd+pPSd+DTDd+PKd)
    natural(temp)=-htin*(temp-tempin)
    natural(p)=-hpin*(p-pin)
! value(temp)=tempin
! value(p)=pin
line to (OS,PEFd+SPd+pPSd+DTDd+PKd)
line to close

TIME
0 to 3.15e7

PLOTS
for t = 0, 3600, 10000 by 50000 to 3.15e7
    contour(temp-273.15) as "teplota (st.C)"
    contour(f*100) fixed range (0,100) as "relativni vlhkost vzduchu (%)"
    contour(p) as "parcialni tlak nenasycenych vodnich par (Pa)"
    contour(p0) as "parcialni tlak nasycenych vodnich par (Pa)"
    vector(q) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
    vector(j) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"
    elevation(temp-273.15) from (osex,osey) to (osix,osiy) as "teplotni spad (st.C)" !export format "#y#b#1" file="teplotni spad.txt"
    elevation(temp-273.15) from (zx,zy) to (px,py) as "teplotni spad (st.C)" !export format "#y#b#1" file="teplotni spad.txt"
    elevation(f*100) from (osex,osey) to (osix,osiy) as "spad RVV (%)" !export format "#y#b#1" file="vlhkostni spad.txt"
    elevation(f*100) from (zx,zy) to (px,py) as "spad RVV (%)" !export format "#y#b#1" file="vlhkostni spad.txt"

HISTORIES
    history (tempin-273.15, tempout-273.15)
    history (fout, fin)
    history (temp-273.15) at (osex,osey) (ossx,osy) (osix,osiy) (px,py) (zx,zy) (mgx,mgz) as "prubeh teplot (°C)" export format "##r#b#i"
file="teplota.txt"
    history (temp_ram_prum, temp_ram_max, temp_ram_min)
    history (temp_lat_prum, temp_lat_max, temp_lat_min)
    history (f*100) at (osex,osey) (ossx,osy) (osix,osiy) (px,py) (zx,zy) (mgx,mgz) fixed range (0,120) as "prubeh rel. vzdus. vlhkosti (%)"
export format "##r#b#i" file="rvv.txt"
    history (f_ram_prum, f_ram_max, f_ram_min)
    history (f_lat_prum, f_lat_max, f_lat_min)
    history (q) at (osex,osey) (ossx,osy) (osix,osiy) (px,py) (zx,zy) (mgx,mgz) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
    history (j) at (osex,osey) (ossx,osy) (osix,osiy) (px,py) (zx,zy) (mgx,mgz) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"

END

```