

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Nestacionární a nelineární výpočet teplotního pole v konstrukci
obvodového pláště dřevostavby**

Diplomová práce

Samostatná příloha: Výkresová část

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: Nestacionární a nelineární výpočet teplotního pole v konstrukci obvodového pláště dřevostavby

vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnici o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:

.....

Podpis

Poděkování:

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu panu Mgr. Ing. Miroslavu Trcalovi Ph.D za odborný dohled nad mou diplomovou prací, vstřícný přístup, cenné rady a čas, který mi věnoval. Dále chci poděkovat mým blízkým za projevenou podporu během celého mého studia.

Autor diplomové práce: **David Ptáček**

Název diplomové práce: **Nestacionární a nelineární výpočet teplotního pole v konstrukci obvodového pláště dřevostavby**

Abstrakt

Diplomová práce analyzuje teplotní pole v detailech obvodové konstrukce dřevostavby. Stěžejní náplní práce je srovnání stacionárního a nestacionárního výpočtu při zohlednění nebo nezohlednění závislosti materiálových vlastností na teplotě.

Dílčím úkolem bylo navrhnout konstrukci obvodového pláště dřevostavby a na základě této konstrukce vytvořit 2-D geometrické modely v softwaru Comsol Multiphysics, který pracuje na metodě konečných prvků. Pro výpočet teplotního pole je použita okrajová podmínka 3. řádu se skutečnými teplotními hodnotami exteriéru v zimním období. Pro co největší věrohodnost simulací jsou v softwaru uvažovány rovnice vyjadřující závislost materiálových vlastností dřeva a minerální vaty na teplotě. Ve výsledném hodnocení numerických modelů obvodového pláště mezi stacionárním a nestacionárním dějem je analyzováno vzájemné chování teplotního pole s využitím numerických simulací. Ve výsledcích jsou dále objasněny příčiny těchto stavebně fyzikálních jevů.

Klíčová slova

Teplotní pole, stacionární a nestacionární děj, lineární a nelineární model

The author of the thesis: **David Ptacek**

Title of the thesis: **Transient and nonlinear analysis of temperature field in an envelope of wooden houses**

Abstract

The thesis analyzes the temperature field in construction details in an envelope of a wooden house. The fundamental task is a comparison of steady and unsteady calculation taking into account or disregarding the material properties depending on temperature.

The partial task was to design a construction of envelope for wooden building and on the basis of this construction to create 2-D geometric models in the software Comsol Multiphysics which is based on the finite element method. For the calculation of the temperature field is applied boundary condition of the third order with actual values of the exterior temperature in winter. To maximize the credibility of simulation software are included the equation expressing the dependence on the temperature of material constants of timber and mineral wool. As the final result to the temperature field numerical models of the peripheral wall between stationary and non-stationary plot is analyzed mutual description of the behavior of thermal processes. In the results are further clarified the cause of the construction physical phenomena.

Key words

Thermal field, stationary and unsteady process, linear and nonlinear model

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíl práce	11
3	Literární přehled	12
3.1	Tepelný tok	15
3.2	Součinitel tepelné vodivosti	15
3.3	Součinitel teplotní vodivosti	15
3.4	Součinitel prostupu tepla	16
3.5	Měrná tepelná kapacita	16
3.6	Přenos tepla	17
3.6.1	Vedení (kondukce) tepla	17
3.6.2	Proudění (konvekce) tepla	19
3.6.3	Šíření tepla sáláním	20
3.7	Vliv Faktorů na difúzi tepla ve dřevě	20
3.8	Okrajové podmínky	21
3.9	Počáteční podmínky	22
3.10	Klimatické okrajové podmínky	22
3.11	Tepelné mosty	23
3.12	Tepelná stabilita místností	23
3.12.1	Tepelná stabilita místností v zimním období	23
3.12.2	Tepelná stabilita místností v letním období	24
3.13	Energetická náročnost staveb	25
3.14	Metoda konečných prvků MKP (FEM)	26
3.15	Comsol Multiphysics	28
3.16	Rozdělení dřevostaveb	29
4	Metodika	31
4.1	Konstrukční systém stěn	31
4.2	Návrh obvodového pláště	31
4.3	Tvorba numerických modelů	34

5	Výsledky.....	40
5.1	Výsledky numerických simulací nelineárních modelů	41
5.2	Výsledky numerických simulací lineárních modelů	50
6	Diskuze	59
7	Závěr.....	61
8	Summary	63
9	Seznam použité literatury.....	64
9.1	Knižní zdroje.....	64
9.2	Internetové zdroje	65
9.3	Normy	66
10	Seznam příloh	66
10.1	Výkresová část	66
11	Seznam obrázků a tabulek	67

1 Úvod

V současnosti se zvyšujícím se trendem výstavby dřevostaveb, především v nízkoenergetickém, pasivním standardu je nezbytností zabývat se tepelně technickými vlastnostmi. Na stavitele dřevostaveb se zvyšuje tlak ze strany legislativy Evropské Unie ve směru hledání nákladově nízkoenergetických řešení s ohledem na celoroční spotřebu tepelné energie v budovách. A to konkrétně Evropská komise o energetické náročnosti budov vyžaduje od roku 2020 všechny novostavby jako téměř energeticky nulové. Z řad zákazníků je to tlak na snížení ekonomické náročnosti těchto staveb. Z tohoto pohledu je žádoucí navrhnout obvodovou konstrukci v co nejpříjemnějším poměrem cena, kvalita použitých materiálů, tepelně izolační vlastnosti, atd. Z čehož vyplývá správně zvolit při hledání kompromisu mezi dostatečnými tepelně-izolačními podmínkami a tloušťkou izolace.

Dřevostavby mají obdobné vlastnosti jako samotný materiál – dřevo. Mají velmi dobré tepelně izolační vlastnosti a naopak malou schopnost akumulovat teplo. Tepelně izolační vlastnosti dřeva závisí na hustotě dřeviny, vlhkosti, teplotě dřeviny a směru vláken.

Při výpočtech tepelných vlastností obvodových konstrukcí staveb se stavební fyzika opírá o analytické výpočty za použití návrhových hodnot. Etablované stavební výpočty počítají ztráty či zisky tepla tak, jakoby v každém okamžiku byl v konstrukci ustálený teplotní profil. Může však jít jen o hrubý odhad, protože k ustálení teplot v konstrukci, např. při změně venkovní teploty, nedochází ihned a při obvyklém střídání denních a nočních teplot k němu nemusí dojít nikdy. Vzniká tak otázka, zda v neustálých podmínkách nevykazují tepelné izolace vyšší propustnost tepla, než odpovídá difúzním výpočtům. A to proto, že ohřátá a chladná místa si v izolaci předávají, díky sálení, teplo na relativně velké vzdálenosti. Obecně je známo, že při výzkumu lehkých stavebních konstrukcí na bázi dřeva je vhodnější numerická implicitní metoda, zejména pro řešení nestacionárních vícerozměrných tepelných úloh. Nestacionární metoda spočívá v diskretizaci prostoru, resp. času. Numerické metody umožňují získat řešení tepelného problému v konečném počtu diskrétních míst (uzlů) zvolené sítě a to v celé oblasti, nebo její části. Tato metoda více odpovídá skutečnosti, protože v každém časovém okamžiku působí na konstrukci různá teplota. Kdežto při

výpočtu metodou stacionární difúze tepla se teplotní spád chová jako konstantní, což neodpovídá skutečnosti.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je srovnat výpočet teplotního pole stacionárního a nestacionárního děje v lineárním nebo nelineárním modelu zohledňujícím závislost vstupních materiálových veličin na teplotě. Práce bude obsahovat podrobný návrh konstrukce obvodového pláště rodinného domu, na němž bude proveden výpočet teplotního pole. Pomocí výpočetního softwaru COMSOL Multiphysics založeném na metodě konečných prvků se vyřeší modely obvodové konstrukce a vytvoří se příslušné numerické simulace. S využitím numerických simulací se provede analýza teplotního pole mezi stacionárním a nestacionárním dějem lineárního a nelineárního modelu. Dále bude v práci popsána analýza tepelného toku v konstrukci, především Fourierův zákon, parciální diferenciální rovnice, okrajové a počáteční podmínky a metoda konečných prvků.

3 Literární přehled

Dřevěné stavby si dnes dobývají své důležité postavení ve světě staveb a k těmto úspěchům přistupuje i vědomí o tom, že dřevo příkladně uskutečňuje ekologický a trvalý hospodářský oběh. Základem pro každé použití dřeva je les. V lese se začíná proces, který od trvalého obhospodařování přes získávání dřeva jako suroviny, ke zpracování a užívání výrobků z něho až po zpětnou vazbu tvoří oběh a životní cyklus, který je jedinečný a příkladný. Takovýto životní cyklus dřeva se dá shrnout do pěti stupňů: les, dřevo, konstrukce, používání a recyklace. (Kolb, 2010)

Dřevěné bytové stavení se na celkové výstavbě v ČR podílí cca 4 %, což představuje roční výstavbu asi 500 rodinných, převážně montovaných domů. Kapacita výrobců montovaných domů je několikanásobná, větší část produkce se proto, pro nezáměr domácích investorů vyváží. To silně kontrastuje nejen s „dřevo-bytovými“ velmocemi, jako jsou USA (95 % rodinných domů v Americe je dřevěných) a skandinávské země (podíl dřevostaveb zde je přes 60 %), ale i s Německem, Rakouskem a Švýcarskem, v nichž se tento podíl pohybuje mezi 7 a 12 %. (Jelínek, 2008)

Výjimečně nadčasový výrok stanovil architekt (Wachsmann, 1995) v roce 1930: *„Dnes vyrábějí dřevěný dům stroje v továrně, nikoli řemeslná provozovna. Staré, velmi rozvinuté řemeslné umění se mění na moderní strojní techniku. Zde nachází nová použití, novou podobu“*. Tento výrok dalo by se říct, potvrzuje převážně dnešní způsob výstavby dřevěných domů.

V předprůmyslových dobách byli lidé rádi, když ve svých domovech nemuseli příliš mrznout a nižší teploty kompenzovali odpovídajícím oblečením, došlo především po 2. Světové válce v nárocích na komfort bydlení k zásadní změně. Do 70. Let 20. Století se tepelná izolace staveb prakticky téměř nezlepšila, spotřeba energie na vytápění plochy a požadavků na komfort drasticky stoupala. Nejpozději začátkem 90. Let začalo být všeobecně zřejmé, že z ohledu na konečné energetické zdroje a omezení emisí škodlivých látek je nutné spotřebu energie na vytápění omezit. Kromě vzdání se komfortu bydlení tomu lze docílit jen účinným vyžíváním energie a moderními technologiemi. (Gabriel, 2013)

Hodnocení stěn z hlediska tepelné techniky se v prvopočátku týkalo převážně vnějších (obvodových) stěn. Vycházelo se ze zkušeností, že v našich klimatických podmínkách je vyhovující obvodová stěna z plných cihel o tloušťce $d = 0,45$ m. V případě, že se realizovala stěna z jiného materiálu, byla považována za vyhovující tehdy, když byla její tepelně izolační schopnost na stejné úrovni. Hodnotícím faktorem se stal tepelný odpor konstrukce, který charakterizuje pouze ustálený (stacionární) stav ve stěně. Takový stav je však výjimečný, parametry tepelného stavu vnitřního a vnějšího prostředí jsou ve skutečnosti časově proměnlivé. Z toho důsledku dochází i k časově proměnlivému průběhu teplot a tepelných toků ve stěně. (Řehánek, 2002)

Podnět ke vzniku hodnocení obvodových stěn budov z hlediska tepelné akumulace (tepelné jímavosti) byl ten, že se po první světové válce rozšířila výstavba lehkých budov a režim vytápění se ponechal stejný jako v tradičních cihelných stavbách, tj. s nočním přerušováním. To mělo za následek velmi rychlé a podstatné vychládání těchto budov. A tak k dosud prováděnému hodnocení obvodových stěn budov z hlediska tepelné izolace (tepelného odporu), založeného na předpokladu ustáleného tepelného stavu, připojilo další hodnocení – hodnocení obvodových stěn z hlediska tepelné akumulace. (Řehánek, 2002)

Při hodnocení tepelně-izolačních vlastností se nejprve používali analytické metody, které dále hodnotí norma ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov. Jak analytickými, tak numerickými výpočetními metodami tepelných vlastností se zabývala (Bošová, 2014) nebo (Kulhánek, 2009).

Mezi hlavní důvody využití simulačních programů pro numerické výpočty se uvádí možnost modelování složitých technologických procesů, provádět citlivostní analýzu jednotlivých parametrů systému, úspora času oproti prováděným měřením nebo optimalizace stávajícího řešení. Při výpočtu dvojrozměrných a trojrozměrných teplotních polí je vzhledem k náročnosti třeba využít výpočetní techniky. V poslední době se pro výpočty využívají především metody konečných prvků. Používané programy obvykle umožňují kromě numerického výstupu i grafický výstup výsledků např. ve formě zobrazení izoterem, směru a hustoty tepelných toků nebo teplotního pole. Simulace trojrozměrného teplotního pole se považuje za nadstandardní, protože zadávání vstupních údajů je časově náročné a výpočet vyžaduje výkonnou výpočetní

techniku. Obvykle se volí zjednodušení trojrozměrné úlohy a její převedení na dvojrozměrné teplotní pole s použitím korekčních koeficientů. (Bošová, 2014)

(Künzel, 1995) se dost podrobně zabýval ve své studii jedno a dvou dimenzionálními výpočty transportu tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích, avšak pouze v ustálených podmínkách.

(Řehánek, 2002) popisuje řešení problémů šíření tepla vedením v případech, ve kterých jsou veličiny charakterizující vedení tepla závislé na teplotě při ustálených nebo i neustálených podmínkách. Teplota vnitřního vzduchu je po celou dobu simulace konstantní a venkovní teplota vzduchu se mění.

Neustáleným vedením tepla se podrobně zabýval také (Ficker, 2004) a to v souvislosti tepelné stability místností a teplotním útlumem. K teplotnímu útlumu uvedl, že vnitřní teplota povrchu konstrukce bude sledovat změny vnější teploty a bude také vykazovat sinusoidní průběh jako venkovní teplota. Avšak následkem tepelně-tlumících efektů stavebních konstrukcí bude amplituda vnitřní povrchové teploty menší než té venkovní.

3.1 Tepelný tok

Tepelný tok je možno popsat, jako stacionární nebo nestacionární děj. Pokud má po celou dobu vedení tepla v tělese konstantní teplotní spát, nazýváme takový přenos tepla stacionární. Nestacionární děj popisujeme, jako vedení tepla v tělese při nekonstantním teplotním spádu. Vypočítat se dá jako podíl přenášeného tepla a příslušného času, výsledek je ve W (J/s).

3.2 Součinitel tepelné vodivosti

Vyjadřuje množství tepla, které proteče jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém gradientu teploty. Jednoduše řečeno koeficient popisuje změnu teploty v prostoru za předpokladu konstantního průběhu v čase. (Horáček, 2004)

Součinitel tepelné vodivosti je závislý na mnoha faktorech, např. na vlhkosti, objemové hmotnosti, střední teplotě, tloušťce materiálu.

Dobrymi tepelnými vodiči jsou kovy, kdežto ostatní pevné látky jsou spíše špatnými tepelnými vodiči. Nejmenší hodnotu součinitele tepelné vodivosti mají plyny, proto jsou považovány dobrými tepelnými izolátory materiály, obsahující drobné dutiny vyplněné vzduchem. (Ficker, 2004)

Součinitel tepelné vodivosti se uvádí jako λ [W/(m·K)] a je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad}\theta} \quad (3.1)$$

Kde q ... vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího stejnorodým isotropním materiálem [Wm²]

grad θ ... teplotní gradient [K/m]

(Tzb-info)

3.3 Součinitel teplotní vodivosti

Jedná se o schopnost stejnorodého materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla. Podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti

lze usuzovat na rychlost změny teploty v určitém místě materiálu v důsledku změny jeho povrchové teploty. Tedy pokud je hodnota teplotní vodivosti materiálu vyšší, tím je teplota v určitém místě materiálu výrazněji závislá na změně jeho povrchové teploty.

$$a = \frac{\lambda}{(c \cdot \rho)} \quad (3.2)$$

ρ - objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [kg/(m³)]

λ - součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]

c - měrná tepelná kapacita [J/kg·K]

(izolace-info)

3.4 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla U [W/(m²·K)] vyjadřuje, kolik tepla unikne konstrukcí o ploše 1m² při rozdílu teplot jejích povrchů 1 K. U hodnota je také měřítkem pro rychlost tepelné ztráty či zisku z konstrukce materiálů. Čím nižší je součinitel prostupu tepla, tím větší je odpor materiálu (větší izolační hodnota). (engineeringtoolbox)

$$U_T(U) = \frac{1}{R_T} \quad (3.3)$$

R_T je odpor konstrukce při prostupu tepla

3.5 Měrná tepelná kapacita

Je množství tepla, které musíme dodat 1 kg látky, aby se ohřál o 1K. Měrná tepelná kapacita neboli měrné teplo dřeva závisí na teplotě a vlhkosti. Výrazný je vliv vlhkosti na tepelnou kapacitu u tepelně izolačních materiálů ve vztahu k velikosti pórů. Větší pórovitost odpovídá zvětšená schopnost absorpce vody, a tím i růst tepelné kapacity. (Veverka, 2006)

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (3.4)$$

Kde c – měrné teplo (J.kg⁻¹. K⁻¹), Q - množství tepla (J), m – hmotnost tělesa (kg), ΔT - rozdíl teplot (K)

3.6 Přenos tepla

Přenos nebo také sdílení tepla je složitý děj. Při jeho popisu zavádíme řadu zjednodušení, která nám pak usnadní tvorbu modelů pro matematický popis sledovaných dějů. Přenos tepla ve dřevě se teoreticky uskutečňuje ve třech formách, a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekci) a sáláním (radiací). Přenos tepla v reálných situacích je obvykle kombinací dvou nebo i všech tří uvedených způsobů. Pro přenos tepla konstrukcí bude však dále zmiňován pouze způsob vedením (kondukcí).

Teplu se přenáší vnitřním pohybem molekul v závislosti na jejich vzdálenosti a kinetické energii. (Horáček, 2008)

3.6.1 Vedení (kondukce) tepla

U tohoto šíření tepla dochází k přenosu tepelné energie z jedné části látky na druhou a to hlavně v pevných látkách. Části látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší kinetickou energií. Při tomto procesu se však částice nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. To nám popisuje Fourierův zákon:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (3.5)$$

\vec{q} - hustota tepelného toku (W.m⁻²)

λ - koeficient tepelné vodivosti (W.m⁻¹.K⁻¹)

∇T - teplotní gradient v tělese (K).

Rovnice I. Fourierova zákona v integrálním tvaru:

$$\frac{Q}{St} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.6)$$

Q - množství tepla (J)

S - plocha tělesa (m²)

t - čas (s)

ΔT - teplotní rozdíl na koncích tělesa (K)

Δx - vzdálenost rozdílných teplot (m)

λ - koeficient tepelné vodivosti (W.m-1.K-1).

Stacionární difúzi tepla ve dřevě popisujeme I. Fourierovým zákonem, který je obdobou Darcyho a I. Fickova zákona pro popsání pohybu vody ve dřevě. (Horáček, 2008)

nebo také s využitím stacionarity děje:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Přenos tepla látkou – dřevem – je obvykle počítán jako stacionární děj podle I. Fourierova zákona. Tento postup je adekvátní pro dobře izolované a lehké konstrukce.

Nestacionární difúze tepla:

Při nestacionární difúzi tepla řešíme změny rozložení teploty v tělese v čase, přičemž je nutné rovnici vedení tepla podle I. Fourierova zákona derivovat podle času a vzdálenosti. Pro masivní tlusté zdi se značnou tepelnou kapacitou, jako je tomu u konstrukcí z masivních dřevěných trámů, jsou ztráty tepla v materiálu nezanedbatelné, a proto musíme použít výpočtu II. Fourierova zákona pro nestacionární vedení tepla s odpovídajícími okrajovými podmínkami.

Nestacionární difúzi tepla popisuje II. Fourierův zákon:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} \lambda_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} \lambda_{zz} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{xy} + \lambda_{yx}) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{yz} + \lambda_{zy}) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} (\lambda_{xz} + \lambda_{zx}) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.8)$$

S okrajovými podmínkami:

$$q = \alpha_T (T_{povrch} - T_{okolí}) \quad (3.9)$$

Při řešení nestacionární difúze tepla je nutné znát okrajové podmínky pro vyrovnávání teploty na povrchu tělesa, rozložení teploty v počátečním okamžiku a hodnotu cílové teploty, na kterou se má těleso ohřát nebo ochladit.

Pro vlastní řešení nestacionární difúze tepla je rozhodující tzv. charakteristická délka tělesa L_c určená poměrem objemu tělesa V a plochy S kolmé k tepelnému toku q (Horáček, 2008)

3.6.2 Proudění (konvekce) tepla

Šíření tepla konvekcí je možný pouze u kapalin a plynů, u látek pevného skupenství není proudění možné. K proudění dochází tak, že se částice látek pohybují a tím si předávají teplo. Výměna tepla konvekcí může být rychlejší než přenos tepla vedením. Pokud místně (lokálně) zahřejeme (ochladíme) kapalinu nebo plynou látku, vyvoláme přirozené proudění, kterým dojde k vyrovnání teplot v prostředí. Přirozené proudění má ohraničenou rychlost a proto je intenzita výměny poměrně malá. Pokud chceme zvýšit intenzitu výměny tepla, musíme použít nucené proudění, které lze vytvořit při použití externích technických zařízení – čerpadel nebo ventilátorů. (Ficker, 2004)

Obecně je možno říci, že šíření tepla prouděním (se změnou teploty se také mění hustota, což vyvolává proudění) je téměř vždy spojeno se šířením tepla vedením.

Děj popisuje Newtonův zákon ochlazování:

$$\vec{q} = \alpha (T_s - T_\infty) S \quad (3.10)$$

Kde q - tepelný tok (W), α - koeficient přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), T_s - teplota povrchu pevné látky (K), T_∞ - teplota kapaliny (K) a S - plocha kolmá k tepelnému toku (m^2). (Horáček, 2004)

3.6.3 Šíření tepla sáláním

Sálání je přenos energie mezi dvěma tělesy o různé teplotě pomocí elektromagnetických vln.(Horáček, 2008)

Při tomto ději látka uvolňuje do prostoru elektromagnetické záření, které je forma energie (tepla). Každé těleso vydává elektromagnetické záření o teplotě vyšší než 0 K, přičemž tělesa záření vydávají, pohlcují nebo ho propouští či odráží. Oproti šíření tepla prouděním a vedením k přenosu energie není potřeba zprostředkující medium. (Ficker, 2004)

Tepelná radiace je dána základním vztahem Stefan-Boltzmanův :

$$\vec{q} = \sigma T_s^4 S \quad (3.11)$$

Kde σ – Stefan-Boltzmanova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, S – plocha (m^2), T_s – absolutní teplota na povrchu tělesa, (Horáček, 2008)

3.7 Vliv Faktorů na difúzi tepla ve dřevě

Jelikož obvodová konstrukce dřevostavby se skládá v celém průřezu ze dřeva, nebo v případě rámové konstrukce dřevostavby velký podíl zaujímá dřevo, je podstatné zaměřit se na faktory ovlivňující difúzi tepla ve dřevě. Největší vliv na vedení tepla ve dřevě má anatomická stavba dřeva, hustota a vlhkost dřeva. Vlivem anatomické struktury dřeva se projevuje rozdílná tepelná a teplotní vodivost v podélném a příčném směru, kdy v podélném směru je vodivost 1,5 – 2,5 krát větší než v příčném. Rozdíl mezi tangenciálním a radiálním směrem je patrný pouze u koeficientu tepelné vodivosti λ , například u jehličnanů s vysokým procentem letního dřeva, kde $\lambda_R < \lambda_T$. Se zvyšující se hustotou dřeva tepelná vodivost roste, ale teplotní vodivost klesá. S rostoucí hustotou dřeva roste podíl dřevní substance a klesá podíl vzduchu v daném objemu dřeva a tím i roste tepelná vodivost λ . Teplotní vodivost vzduchu je až 100 krát větší než teplotní vodivost dřevní substance, proto je závislost na hustotě dřeva opačná. Závislost tepelné a teplotní vodivosti na vlhkosti dřeva je obdobná jako u závislosti na hustotě, kdy teplotní vodivost zvláště klesá nad mezí hygroskopicity. (Horáček, 2008)

3.8 Okrajové podmínky

Okrajové teplotní podmínky se používají na hranici Γ nejčastěji ve tvaru:

Dirichletovy (nazývané též I. Druhu)

$$T(\Gamma, t) = f(\Gamma, t) \quad (3.12)$$

Zadáva se ve tvaru funkce rozložení teploty na povrchu materiálu v libovolném čase. Tyto podmínky se aplikují zejména tam, kde je známa teplota povrchu nebo tam, kde je hranice tvořena izotermou (málo kdy je nám však při nestacionárním ději teplota na hranici známa)

Neumannovy (nazývané též II. Druhu)

Tyto podmínky představují bilanci tepelného toku s příslušnou hranicí

$$q_n(\Gamma, t) = g(\Gamma, t) \quad (3.13)$$

Kde $g(\Gamma, t)$ je známá funkce hustoty tepelného toku ve směru normály n na hranici Γ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Zadáva se tedy ve tvaru funkce hustoty tepelného toku ve směru normály n pro každý bod tělesa na příslušné hranici v závislosti na čase. Homogenní podmínka tohoto typu se používá například při geometrické symetrii.

Newtonovy (nazývané též III. Druhu)

Tyto podmínky reprezentují přestup tepla konvekcí do prostředí o teplotě T_{ext} .

$$q_n(\Gamma, t) = \alpha_T(w, T) (T(\Gamma, t) - T_{\text{ext}}(t)) \quad (3.14)$$

Kde $\alpha_T(w, T)$ je koeficient přestupu tepla z jednoho prostředí do druhého ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

Hustota tepelného toku ve směru normály nabývá hodnoty $q_n(\Gamma, t)$

$$\text{Kde } q_n(\Gamma, t) = \mathbf{q}(\Gamma, t) \cdot \mathbf{n}(\Gamma) \quad (3.15)$$

$$q_n(\Gamma, t) = q_x(\Gamma, t)n_x(\Gamma) + q_y(\Gamma, t)n_y(\Gamma) + q_z(\Gamma, t)n_z(\Gamma) \quad (3.16)$$

Kde $\mathbf{q}(\Gamma, t)$ je vektor hustoty tepelného toku vzhledem k obecným osám x, y, z .

(Trcala, 2009)

3.9 Počáteční podmínky

Obecně lze počáteční podmínky v čase t_0 psát ve tvaru:

Pro teplotu: $T = f(x, y, z, t_0)$ (3.17)

(Trcala, 2009)

3.10 Klimatické okrajové podmínky

Výpočtové teploty vnějšího vzduchu podle ČSN 73 0540 se stanoví na základě polohy posuzovaného objektu. Pro území České republiky byly stanoveny dvě základní výpočtové venkovní teploty:

$t_e = -15^\circ\text{C}$ v první teplotní oblasti

$t_e = -18^\circ\text{C}$ v druhé teplotní oblasti

Přičemž se pro místa s nadmořskou výškou nad 600 m se v první teplotní oblasti počítá s výpočtovou teplotou -18°C

Pro místa s nadmořskou výškou nad 800 m se v druhé teplotní oblasti počítá s výpočtovou teplotou -21°C



Obr. 1 – Hranice teplotních oblastí v zimním období dle ČSN 73 0540

3.11 Tepelné mosty

Pod pojmem tepelný most je označováno slabé místo, u kterého na základě konstrukčních nebo geometrických předpokladů dochází k úniku velkého množství tepla na malém prostoru. K tepelným mostům dochází, když vodivý prvek prochází nebo obchází tepelnou bariéru, jinak řečeno poskytují cestu menšího odporu přes izolaci a zvyšují nebo snižují vnitřní teplotu. Geometrické tepelné mosty se vyskytují převážně u arkýřů a vikýřů, ale také na vnějších hranách budov. Konstrukční tepelné mosty se vyskytují zejména u napojení různých stavebních dílů.

Při vzniku tepelných mostů dochází nejen k nežádoucím tepelným ztrátám, ale v důsledku toho také snadno k poškození stavby. Na chladných plochách stavebních částí dochází k výskytu vlhkosti ve formě orosení na základě čehož se na konstrukci vytvoří plísně. (Totten, 2008)

3.12 Tepelná stabilita místností

Tepelná stabilita místností se hodnotí zvlášť pro zimní a zvlášť pro letní období. V zimním období je kritériálním hlediskem pokles výsledné teploty v místnosti, v letním období je kritériem nejvyšší denní vzestup teploty vzduchu nebo nejvyšší denní teplota vzduchu v místnosti. Výhodou numerických řešení tepelné stability místností je možnost získat časový průběh teploty místností a také povrchových teplot konstrukce a to nám pomůže sledovat možný vznik povrchové kondenzace vodní páry na chladnoucích površích stěn.

3.12.1 Tepelná stabilita místností v zimním období

Tepelná stabilita místností v zimním období se hodnotí za podmínek neustáleného teplotního stavu. Vychází se z předpokladu, že během noci nebo na konci týdne, popř. při poruše otopného systému se přeruší přívod potřebné energie pro krytí tepelných ztrát místnosti. Doba ustáleného vytápění je nahrazena chladnutím, na které navazuje ohřev místnosti také nazývaný zátop. (Bošová, 2014)

V případě mé diplomové práce bude zkoumána tepelná stabilita obvodové konstrukce za podmínek neustáleného teplotního stavu ve venkovním prostředí nikoliv vnitřním prostředím.

Tepelná stabilita místností v zimním období se počítá z energetické bilance prostoru a zahrnuje tepelné ztráty prostupem i infiltrací na jedné straně bilanční rovnice, tepelné zisky z chladnoucích konstrukcí, případně i zisky z dalších vnitřních zdrojů tepla na druhé straně rovnice. (Bošová, 2014)

Hodnotícím kritériem tepelné stability místnosti v zimním období je pokles výsledné teploty v kritické místnosti. V případě zimní tepelné stability se za kritickou místnost považuje prostor s nejvyšší hodnotou průměrného součinitele prostupu tepla obalových konstrukcí místnosti. Například rohová místnost v posledním podlaží budovy. (Kulhánek, 2014)

O průběhu chladnutí místnosti jsou rozhodujícím konstrukčním prvkem průsvitné konstrukce. Ke zlepšení zimní stability místnosti vede především zlepšení tepelně izolačních vlastností otvorových výplní (zasklení, konstrukce rámu a křídel, osazení do obvodových konstrukcí). Snížení infiltrace vnějšího vzduchu spárami otvíravých okenních konstrukcí. Zdalších možností směřujících ke zlepšení tepelné stability místnosti v zimním období se dá uvést zlepšení tepelně izolačních vlastností obalových konstrukcí, vnitřních ochlazovaných konstrukcí. Zvýšení akumulační schopnosti vnitřních vrstev obalových konstrukcí tím, že budou preferovány konstrukce s vrstvami z materiálů o vysoké objemové hmotnosti na vnitřním líci. Dále zvýšení akumulační schopnosti vnitřních konstrukcí a vytvoření akumulačních jader uvnitř objektu. (Bošová, 2014)

3.12.2 Tepelná stabilita místností v letním období

Hodnocení tepelné stability místnosti v letním období nabývá z hlediska tepelné ochrany budov stále větší význam, protože narůstá podíl objektů s rozměrnými prosklenými plochami v obvodových konstrukcích. Stabilita se hodnotí z důvodu přehřátí interiéru z důsledku skleníkového efektu. V průběhu denního cyklu se mění teplota vnitřního prostoru, takže se jedná o neustálý teplotní stav. Výpočtové hodnocení se provádí pro kritickou místnost v budově, která je charakterizovaná jako prostor s předpokládanou největší tepelnou zátěží. Jedná se nejčastěji o místnosti s největším podílem přímo osluněných prosklených ploch ve fasádě. (Kulhánek, 2014)

Zásadami pro navrhování jsou minimalizace tepelných zisků v letním období a získávání co největšího množství solární energie v období zimním. Optimálním řešením jsou clonící prvky s regulací tepelných zisků v kombinaci s pevnými

stavebními prvky, jako jsou markýzy, římsy, balkonové desky nebo přesahující střešní konstrukce. Mezi dalšími faktory ovlivňujícími letní tepelnou stabilitu místnosti patří:

- Snížení tepelného toku neprůsvitnými obalovými konstrukcemi vhodnou volbou barvy a struktury jejich vnějšího povrchu (především světlé barvy)
- Návrh obalových konstrukcí budov formou dvouplášťových konstrukcí s provětrávanou vzduchovou vrstvou, kdy vnější plášť konstrukce působí jako radiační clona, snižující prostup solární energie do interiéru.
- Návrh obalových konstrukcí se zvýšenou akumulační schopností - preference situování vrstev s vysokou objemovou hmotností k vnitřnímu líci konstrukce.
- Návrh akumulačních prvků uvnitř budovy (Bošová, 2014)

3.13 Energetická náročnost staveb

V současnosti lze pro hodnocení stavebně architektonického řešení budovy využít normové hodnocení prostřednictvím průměrného součinitele prostupu tepla obálky budovy, které lze doplnit i energetickým štítkem obálky budovy a příslušným protokolem. Tento způsob hodnocení vychází z požadavků ČSN 73 0540-2 z roku 2017 a z následné modifikace, dané novelou uvedené normy z roku 2011. Hodnotícím kritériem vyjadřující vliv stavebně technického řešení budovy na její spotřebu tepla na vytápění a tím i na její energetickou náročnost, je průměrný součinitel prostupu tepla obálky budovy. Komplexnější způsob hodnocení energetické náročnosti budovy je dán Směrnicí Evropského parlamentu a Rady č. 2010/31/EU (EPBD II) a následné novely českého energetického zákona č. 318/2012 Sb. Podle těchto předpisů, hodnocení energetické náročnosti budovy zahrnuje veškerou energii, dodanou na systémovou hranici budovy a pracuje i s hodnotami primární energie či energie z obnovitelných zdrojů. (Kulhánek, 2014)

Dokument prokazující energetickou náročnost budovy je nazýván průkazem energetické náročnosti budovy. Tento protokol je požadován při výstavbě nových budov, při prodeji nebo nájmu budov a i při větších změnách ovlivňujících energetickou náročnost dokončených budov. (Bošová, 2014)

3.14 Metoda konečných prvků MKP (FEM)

Metoda konečných prvků neboli anglickým názvem The Finite Element Method (FEM) poukazuje na hlavní myšlenku této metody, spočívající v dělení celku na určitý počet částí konečných rozměrů. To je odlišné od pohledu klasické pružnosti, jejíž princip je založen na rovnováze na elementu nekonečně malých rozměrů. Části konečných rozměrů jsou vzájemně spojeny společnými uzly. Tyto uzly jsou definované neznámými parametry, které se nazývají stupně volnosti. Neznámé parametry v prvcích a uzlech jsou funkčně závislé, tato závislost je nazývána jako bázová funkce. Tímto způsobem dojde ke zjednodušení matematického popisu složitých tvarů na popis jednodušších základních geometrických obrazců. MKP mění úlohu hledání spojitých funkcí na problém hledání konečného počtu neznámých parametrů, který mi se hledané funkce přibližně aproximují. Celý tento přechod se nazývá diskretizací spojitého problému. Diskrétní problém je pak řešitelný algebraickými prostředky v konečném počtu kroků na počítači. Metoda MKP se stala nezbytným principem řešení modelování fyzikálního jevu v různých inženýrských oborech. MKP je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Numerické řešení dokáže řešit prakticky každou matematicky popsatelnou úlohu, avšak limitujícím faktorem je kapacita dostupného hardwaru a časové nároky na výpočet. (Madenci, 2006)

Vznik MKP je možno datovat od roku 1943, kdy matematik Courant publikoval práci zabývající se problémem torse, a vní nastínil matematický postup, který byl základem MKP. Další publikované práce vycházející z konstrukčního, inženýrského pojetí byly sepsány autory Hrenikov, Argyris, Clough, a dále na ně pak koncem padesátých a začátkem šedesátých let navázala řada autorů Turner, Melosh, Martin, Zienkiewicz, Cheung. V šedesátých letech byla teorie a aplikace MKP rozvíjena řadou dalších autorů, a přitom byl postupně kladen větší důraz na matematickou formulaci problému. (Teplý, 1981)

Hlavními kroky metody konečných prvků jsou:

- Diskretizaci úlohy – rozdělení řešené oblasti na konečný počet prvků
- Výběr interpolačních funkcí

- Sestavení matice neznámých parametrů pro každý prvek
- Sestavení globální matice neznámých parametrů pro řešenou oblast
- Zadání okrajových podmínek
- Vyřešení úlohy
- Dodatečné výpočty (pokud jsou požadovány)

(Madenci, 2006)

Na základě konceptu MKP existují 3 hlavní přístupy k hledání aproximovaného řešení:

Přímý přístup, který je používán pro relativně jednoduché úlohy a obvykle slouží jako prostředek vysvětlení principu MKP

Dalším přístupem je metoda vážených reziduí. Jedná se o univerzální metodu, která umožňuje aplikaci MKP na problémy, jejichž funkcionář nemůže být sestaven. Pomocí tohoto přístupu se využívá diferenciálních rovnic a používá se při řešení přenosu tepla nebo v mechanice tekutin.

Poslední metodou je variační přístup, který je založený na zjištění, že procesy v přírodě probíhají běžně tak, že ze všech možností se realizují procesy minimalizované. Tento princip spočívá v hledání funkcí, pro které má funkcionář stacionární hodnotu. Funkcionál Φ je operátor, který funkci přiřazuje číslo (např. absolutní extrém funkce, integrál funkce, hodnota funkce v definovaném bodě). (Veverka, 2006)

Z důvodu pracnosti a složitosti výpočtů je výhodnější řešit výpočty teplotního pole s využitím výpočetní techniky metodou konečných prvků. Fyzikální jev dvourozměrného stacionárního teplotního pole je popsán parciální diferenciální rovnicí :

$$\frac{\partial}{\partial x} \lambda_x(x, y) \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y(x, y) \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} = 0 \quad (3.18)$$

Pro tuto rovnici se uvádí okrajová podmínka:

$$-\lambda(x, y) \cdot \left[\frac{\partial T(x, y)}{\partial n} \right] = \alpha \cdot (T - \bar{T}) \quad (3.19)$$

Kde (x, y) je souřadnice bodu v rovině v m,

λ součinitel tepelné vodivosti ve $W m^{-1}K^{-1}$

α součinitel přestupu tepla ve $W m^{-2}K^{-1}$

\bar{T} teplota v okolním prostředí v K

$\partial x, \partial y$ derivace podle x a y ,

∂n derivace podle normály

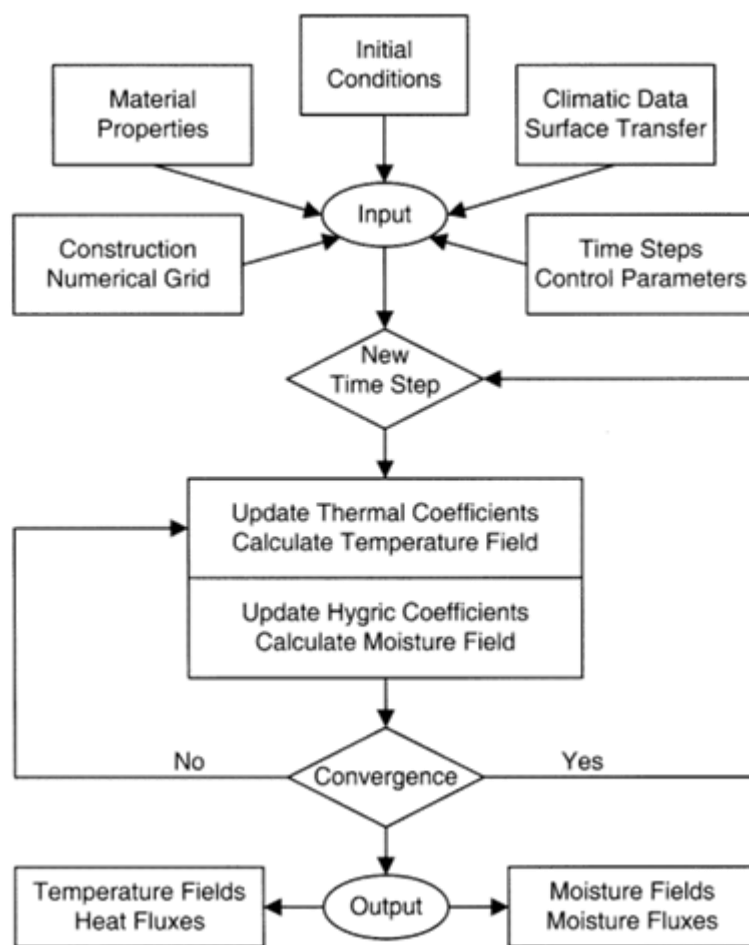
3.15 Comsol Multiphysics

Mnoho vědeckých problémů ve stavební fyzice může být popsáno jako PDE (partial differential equation – parciální diferenciální rovnice). K řešení PDE jsou vyvinuty software pracující na principu FEM, které slouží za účelem získání výsledků simulace v krátkém čase. Jejich výhodou je jednoduchost vstupu dat, např. geometrická data. Nevýhodou je to, že nejsou velmi flexibilní, když chce uživatel změnit nebo kombinovat modely. Komerční software COMSOL je vyvinut speciálně pro řešení PDE, kde uživatelé v zásadě mohou simulovat jakýkoliv systém spřažených PDE. Uživatelé v software mohou řešit technické problémy související se stavební fyzikou v oblasti přenosu tepla, transportu vlhkosti, dynamiky tekutin a stavební mechaniky. COMSOL řeší soustavy parciálních diferenciálních rovnic až o 32 nezávislých proměnných. Software dokáže řešit rovnice, které mohou být nelineární a časově závislé a působit na 1D, 2D nebo 3D geometrie. Numerická analýza popisující nestacionární a stacionární teplotní pole při kondukcii a konvekci tepla v anizotropním materiálu je provedena dle následujících parciálních diferenciálních rovnic:

$$\text{Nestacionární:} \quad \rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla T = 0 \quad (3.20)$$

$$\text{Stacionární:} \quad \nabla \cdot \lambda \nabla T = 0 \quad (3.21)$$

Kde T je teplota (K), λ je matice koeficientů tepelné vodivosti ($W m^{-1}K^{-1}$), ρ je hustota dřeva ($kg m^{-3}$), C je měrné teplo ($J kg^{-1}K^{-1}$) a ∇ značí vektor parciálních derivací. (A.W.M. Van Schijndel, H.L. Schellen, 2009)



Obr. 2 – Vývojový diagram výpočtového postupu v software (Künzel, 1995)

3.16 Rozdělení dřevostaveb

Dřevostavbu definujeme, jako dům s nosnou konstrukcí z dřevěných prvků nebo materiálů na bázi dřeva. Podle konstrukčních systémů v současnosti rozdělujeme dřevostavby na:

- Rámové stavby
- Masivní dřevěné stavby
- Skeletové stavby

Dále bude zmíněn pouze systém rámové stavby

Rámové stavby jsou charakteristické svou nosnou konstrukcí tvořenou dřevěnou kostrou z řeziva opláštěnou velkoplošnými (deskovými) materiály, které s dřevěnou kostrou spolupůsobí při přenosu zatížení. Dřevěná nosná kostra přenáší svislé zatížení ze střechy a mezipatrových stropů, kdežto opláštění z desek na bázi dřeva přenáší vodorovná zatížení, která vznikají účinkem větru a výztužných sil. Tento druh výstavby k nám pronikl ze Severní Ameriky, kde byl postupně modifikován z pohledu opracování jednotlivých prvků a prefabrikace. Podle průřezových rozměrů dřevěné kostry byl americký systém nazýván „Two by four“ a současný americký systém „Two by six“. Konstrukční systémy domů u nás vyráběných jsou tvořeny dřevěnými prvky s průřezem 60/120 mm nebo 60/160 mm, kdy spojením s horizontálními prvky tvoří rám. Svislé dřevěné prvky jsou umístěny v pravidelných osových vzdálenostech (modulech) 400, 600, 625 mm podle rozměrů velkoplošných materiálů. Vytvořený rám je vyplněn tepelnou izolací a z vnější strany může být opatřen termofasádou nebo odvětrávanou fasádou. Pro rozvod instalací je vytvořena vnitřní předstěna tzv. instalační předstěna, která slouží jako eliminace poruch případné parozábrany, narušení statických prvků nebo zejména pro snadnější montáž rozvodů. Výhodou tohoto systému domů je především krátká doba výstavby a volnost architektonických řešení. (Kolb, 2008)

4 Metodika

4.1 Konstrukční systém stěn

Z hlediska aspektů stavební fyziky lze rozdělit konstrukční systém stěn na difúzně otevřený a na difúzně uzavřený. Systém otevřeného nebo uzavřeného konstrukčního systému spočívá v prostupu vlhkosti stěnou.

Difúzně uzavřený systém využívá tzv. parotěsnou vrstvu zabraňující prostupu vodních par z interiéru do konstrukce a předchází jejich případné kondenzaci. Pro vytvoření parotěsné vrstvy se využívá PE folie. U toho systému hrozí nebezpečí porušení celistvosti parotěsné vrstvy (PE folie) montážní firmou a následnému vnikání vyššího objemu vlhkosti do konstrukce, která může začít narušovat odolnost samotné konstrukce. Nicméně kvalitní návrh konstrukce s dostatečnou tloušťkou fasádního izolantu (nejčastěji fasádní polystyren) při porušení parotěsné vrstvy posune rosný bod na vnější stranu fasádního izolantu.

U skladby difúzně otevřené je stěna navržena tak, aby umožňovala průchod molekul vodní páry konstrukcí. Tomu umožňuje klesající difúzní odpor skladby konstrukce interiér > exteriér. Takovou stěnu je složitější navrhnout, zejména parobrzdnou vrstvu (kaširované sádrovláknité desky, OSB desky a podobně), která musí brzdit průchod těchto vodních par z interiéru směrem do exteriéru. Tato vrstva musí také plnit přísná kritéria na vzduchotěsnost celé konstrukce. Díky vyšší měrné tepelné kapacitě materiálů (dřevovláknité desky), které nahrazují polystyren, dosahují maximální hodnoty teplot v interiéru v horkých letních měsících nižších hodnot.

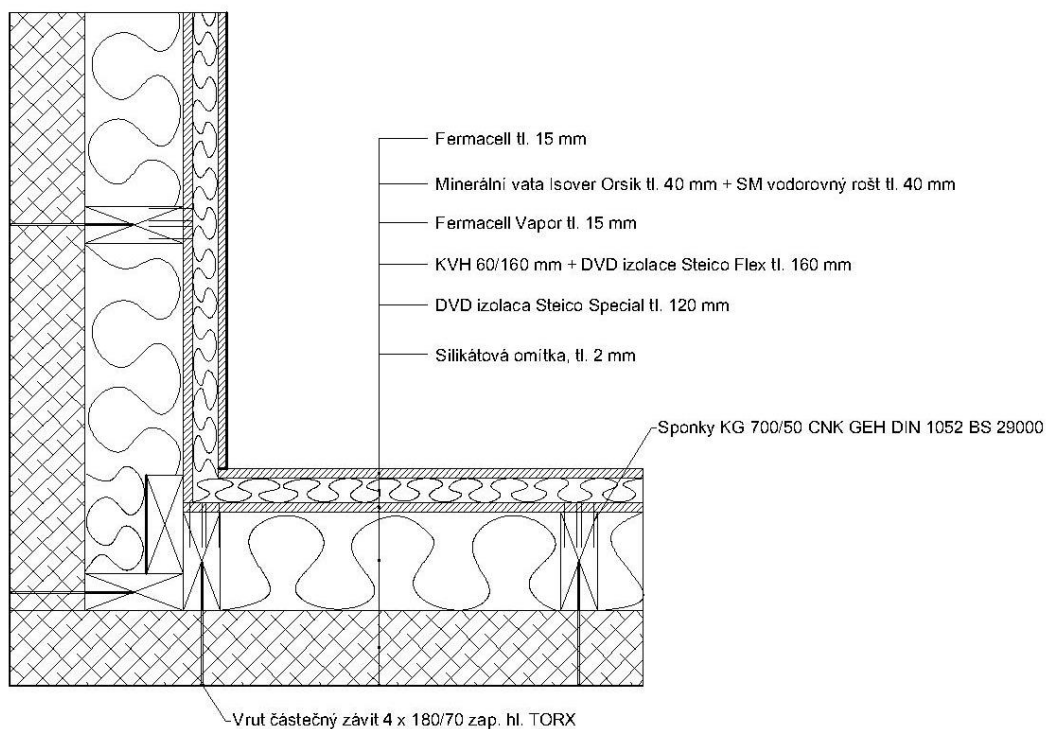
4.2 Návrh obvodového pláště

Dřevostavby v současné době musí splňovat kromě požadavků na mechanickou odolnost a stabilitu, požární bezpečnost, bezpečnost při užívání a ochranu proti hluku také požadavky na hygienu, ochranu zdraví, ochranu životního prostředí, tepelnou ochranu a úsporu energie.

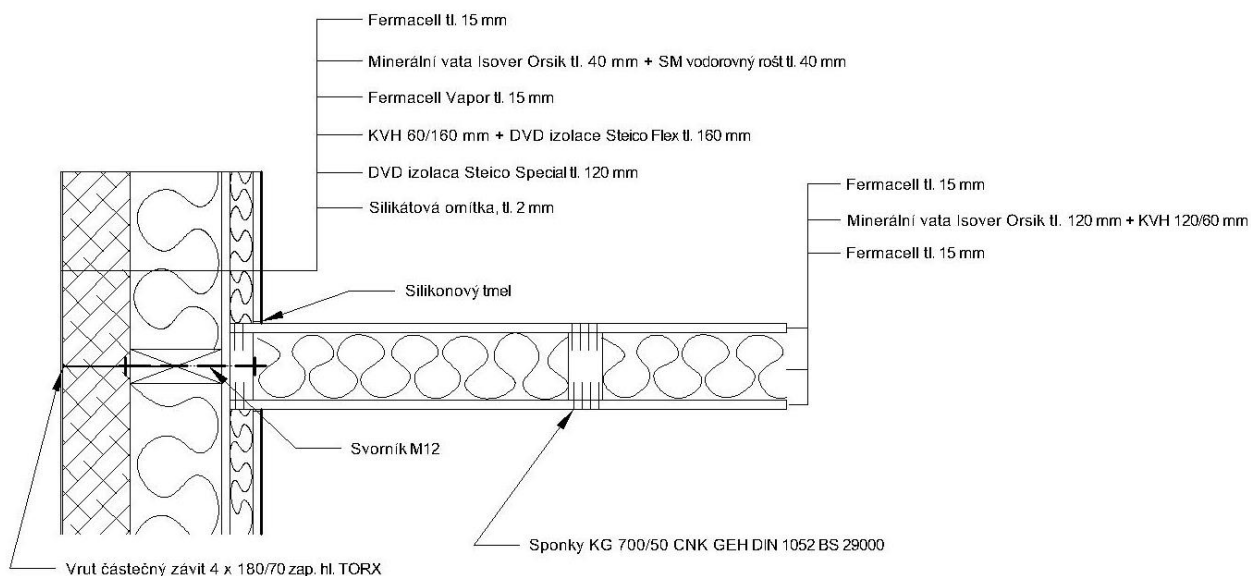
Správný návrh materiálů dle principů trvale udržitelné výstavby by měl být veden snahou šetřit neobnovitelnými materiály, používat konstrukce s dlouhou životností

s možností rekonstrukcí a modernizací a používat materiály, jež umožňují dobrou recyklaci a likvidaci.

Vlastní složení pláště dřevostavby jsem zvolil jako difúzně otevřenou konstrukci, kterou upřednostňuji z důvodu přirozeného transportu vlhkosti z interiéru do exteriéru. V reakci na požadavky na mechanickou odolnost a stabilitu jsem zvolil sloupky z KVH hranolu o průřezu 60/160 mm. Takto zvolený průřez je v dnešní době unifikovaný a používá se především pro dostatečnou tloušťku stěny z hlediska tepelné izolace. Izolační vrstvou mezi sloupky jsem se inspiroval firmou Steico, konkrétně dřevovláknitou deskou Steico Flex o tloušťce 160 mm. Z důvodu dostatečné tepelné ochrany a případné úspore energie je žádoucí opatřit plášť dřevostavby dostatečnou tloušťkou "termofasády". V tomto ohledu jsem využil taktéž izolaci od společnosti Steico, tedy dřevovláknitou desku Steico Special o tloušťce 120 mm. Při navrhování difúzně otevřené konstrukce je nezbytné brát ohled na difúzní odpor daných izolačních materiálů označovaný - μ . Ochranou proti povětrnostním vlivům celé konstrukce zabezpečuje silikátová omítka o nízkém součinitelu difúzního odporu. Parobrzdovou vrstvou zde tvoří kaširovaná sádrovláknitá deska Fermacell Vapor tloušťky 15 mm. Pro snadné vedení instalací je v dnešní době nezbytné navrhnout tzv. instalační předstěnu vymezenou horizontálními smrkovými latěmi o tloušťce 40 mm. Prostor instalační předstěny je vyplněn minerální vatou Isover Orsik. Povrchovou vrstvou z interiérové strany tvoří sádrovláknitá deska Fermacell o tloušťce 15 mm. Pro skladbu stěny jsem využil desky Fermacell z důvodu jejich vynikajících vlastností, zejména odolnosti proti požáru, biologickou nezávadností, odolností proti vlhku a především díky obsahu sádry v desce, která přispívá k dobrému klimatu interiéru. Toto opláštění dokonale doplňuje izolace od firmy Steico, z důvodu nízké tepelné vodivosti a vysoké akumulární kapacity 2100 J/kgK (více než dvojnásobek než má minerální vlna) chrání místnosti v létě proti přehřátí. Izolace Steico je vyráběna z přírodního dřevovláknatého dřeva jako takového. Při výrobě těchto materiálů je dbáno na zdravotní nezávadnost a to především minimalizací formaldehydu. Flexibilní, pružné izolační desky jsou difúzně otevřené, takže nebrání prostupu vlhkosti směrem ven. Kromě toho dřevovláknitá izolace přijímá vlhkost do vláken a její kapacita je mnohonásobně větší než u běžných izolačních materiálů. Takže Steico přispívá nejen k regulaci vlhkosti, ale je odolný i vůči rychle vznikajícímu kondenzátu. Celá konstrukce je tak velmi odolná proti poškození vlhkem.



Obr. 3 - Rohový detail obvodového pláště dřevostavby (autor)



Obr. 4 - Detail napojení příčky na obvodový plášť dřevostavby (autor)

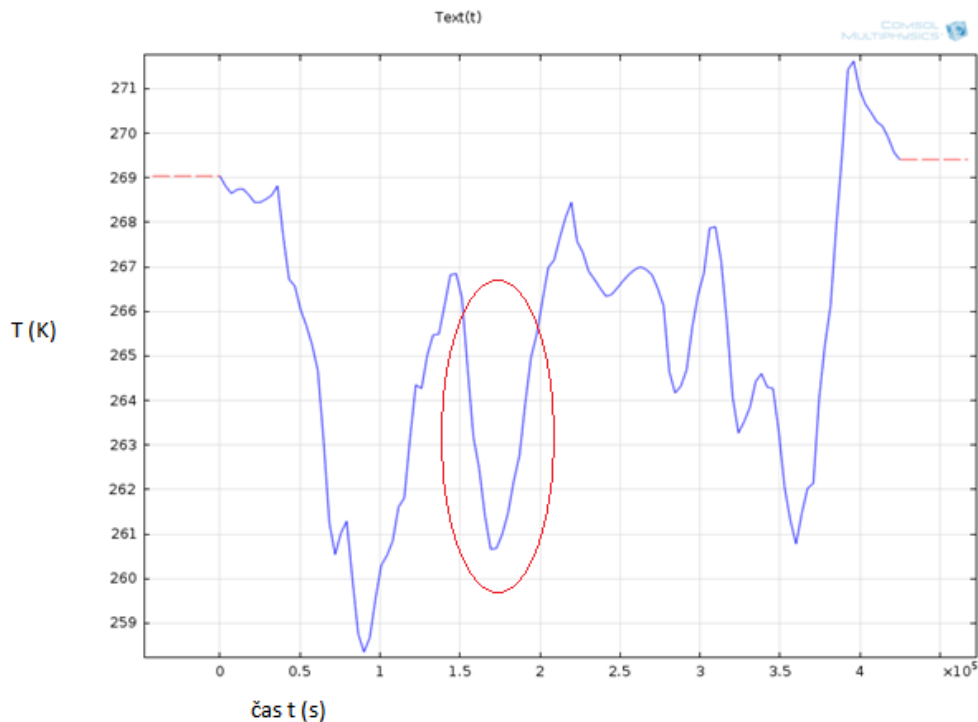
Tabulka 1- Materiálové vlastnosti (Horáček, 2008), (Fermacell), (Steico), (Isover)

Materiál	d [mm]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
KVH	160	0,18	450	1630
Fermacell	15	0,32	1150	1100
Fermacell Vapor	15	0,32	1150	1100
Isover orsík	40	0,038	80	800
Steico Flex	160	0,038	50	2100
Steico Special	120	0,048	240	2100
Silikátová omítka	2	0,7	1800	840

Součinitel tepelné vodivosti u KVH hranolu jsem uvažoval jako u smrkového dřeva. Podle (Horáček, 2008) je součinitel tepelné vodivosti SM v příčném směru λ (0,12 – 0,18), vzhledem k obsahu lepidla a vyšší hustotě KVH jsem použil v numerické simulaci při lineární závislosti $\lambda = 0,18$ [W·m⁻¹·K⁻¹]. Ostatní hodnoty materiálových vlastností jsem uvedl z technických listů výrobků (Steico, Isover, Fermacell).

4.3 Tvorba numerických modelů

Po navržení dvou detailů, které jsou posuzovány na tepelné vlastnosti v software Comsol je nutné stanovit teplotní okrajové podmínky. Použité teplotní data vzduchu venkovního prostředí pro numerickou simulaci jsou z meteorologické stanice Chrudim. Jedná se o data naměřená v hodinových intervalech po dobu 5 dnů v prosinci roku 2012 (Obr. 5). Okrajové podmínky pro interiér jsem stanovil podle normy ČSN EN 1283 a použil tak výpočtovou vnitřní teplotu 20°C pro obyvací místnosti obytné budovy. Metodika této práce spočívá v porovnání teplotních vlastností detailů v lineárních modelech a nelineárních modelech v určitých časových okamžicích pro danou teplotu. Konkrétní časové body jsem zvolil od 18. hodiny do 6. hodiny ráno, kdy od 18. hodiny teplota klesá do 24 hodiny. Od 1 hodiny ráno do 6. hodiny teplota stoupá.



Obr. 5 - Graf průběhu teplot vzduchu z meteorologické stanice Chrudim (2010.12.15 - 2010.12.19) (autor)

Prvním krokem při vytváření numerické simulace je volba druhu simulace, v mém případě tedy tepelná pole. Krokem druhým je potřeba zvolit stacionární simulaci (nezávislou na čase) nebo nestacionární simulaci (závislou na čase). Pro co nejpřesnější popis teplotního pole v obvodové konstrukci dřevostavby je zapotřebí do software implementovat přesné hodnoty materiálových vlastností, jako součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost (hustota) a měrná tepelná kapacita. Materiálové vlastnosti, zejména závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě, vlhkosti a pórovitosti u dřeva jsem stanovil dle vztahů uvedených ve skriptech Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Taktéž jsem postupoval u závislosti měrného tepla na teplotě a vlhkosti.

Vyjádření hustoty dřeva v závislosti na vlhkosti:

$$\rho_w = \rho_0 \frac{1+w}{1+0,993 \rho_0 w} \quad (4.1)$$

$$\rho_w = 0,420 \cdot \frac{1+0,12}{1+0,993 \cdot 0,420 \cdot 0,12} \quad (4.2)$$

ρ_w - hustota dřeva při dané vlhkosti ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), ρ_0 - Hustota dřeva v suchém stavu ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), w - vlhkosti dřeva ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

Vyjádření pórovitost:

$$P_w = [1 - \rho_k \cdot (0,653 + w)] \cdot 100 \quad (4.3)$$

$$P_w = [1 - 0,370 \cdot (0,653 + 0,12)] \cdot 100 \quad (4.4)$$

P_w - pórovitost vlhkého dřeva v (%), ρ_k - hustota konvenční ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a w - vlhkost dřeva ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

Vyjádření závislosti součinitele tepelné vodivosti na hustotě a vlhkosti:

$$\lambda = \rho_w \cdot (0,217 + a \cdot w) + 0,024 \cdot P_w \quad (4.5)$$

$$\lambda = 0,370 \cdot (0,217 + 0,004 \cdot 12) + 0,024 \cdot P_w \quad (4.6)$$

ρ_w - hustota dřeva při dané vlhkosti ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), w - vlhkosti dřeva (%), P_w - pórovitost (-) a a - koeficient $a = 0,004$ pro $w < 40$ %

Vyjádření závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě:

$$\lambda_t = \lambda \cdot (1 + 0,004 \cdot ((273,15 - T) - 30)) \quad (4.7)$$

λ_t - součinitel tepelné vodivosti pro konkrétní teplotu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), λ - součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T - teplota v K

Vyjádření závislosti měrného tepla na teplotě:

$$c_0 = 1,571 + 0,00277 \cdot T \quad (4.8)$$

Vyjádření závislost měrného tepla na vlhkosti:

$$c_w = \frac{c_0 + w c_v}{1 + w} \quad (4.9)$$

$$c_w = \frac{c_0 + 0,12 \cdot 4,182}{1 + 0,12} \quad (4.10)$$

c_w - hodnota měrného tepla pro konkrétní teplotu ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), c_0 - měrné teplot suchého dřeva ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), c_v - měrné teplo vody ($c_v = 4,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), w - absolutní vlhkost dřeva ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), T - teplota v K

Pro dřevovláknité desky není k dispozici vyjádření závislosti tepelných parametrů na teplotě, vlhkosti nebo jiných podmínkách. Proto jsem uvažoval konstantní

návrhové hodnoty od společnosti Steico. Stejným způsobem jsem postupoval pro materiály Fermacell a silikátovou omítku. Jako poslední materiál, který je obsažen v konstrukci dřevostavby je minerální vata Isover Orsik. Vyjádření součinitele tepelné vodivosti závislé především na teplotě a vlhkosti jsem provedl přepočtem podle evropské normy ČSN EN ISO 10 456.

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_T F_m \quad (4.11)$$

Teplotní přepočet $F_T = e^{ft} (T_2 - T_1)$

$$F_T = e^{0,0051} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad (4.12)$$

f_t - převodní teplotní součinitel, T_1 - teplota prvního souboru podmínek (K), T_2 - teplota druhého souboru podmínek (K), F_T - teplotní přepočet, F_m - vlhkostní přepočet

Vlhkostní přepočet $F_m = e^{f\psi} (\psi_2 - \psi_1)$

$$F_m = e^4 (0-0) \quad (4.13)$$

$f\psi$ - převodní vlhkostní součinitel

Celému výpočtu v Comsolu předchází geometrie detailů ve 2D. Geometrie spočívá v jednoduchém zadávání číselných hodnot x (horizontálním směru) a y (vertikálním směru). Důležité je však zvolit správný rozměr geometrických modelů, které jsou odvozeny v závislosti na velikosti oblasti deformací teplotního pole v místě vícerozměrného šíření tepla. V případě nedodržení tohoto rozměru budou výsledky zatíženy chybou. Proto jsem zvolil rozměry v hodnotě 1,5 násobek modulu (1,5*625 mm) od pomyslného středu detailu. Po vymodelování modelu nastává přiřazování materiálových vlastností kurčité geometrické ploše v doméně materials. U nelineárního způsobu výpočtu zvolíme k vybraným materiálům, které mají vyjádření závislosti na nějaké podmínce hodnotu proměnnou (např. $\lambda_t(T)$).

Z řešení II. Fourierova zákona je zřejmé, že rozložení teploty v čase závisí jak na tepelně-izolačních vlastnostech materiálu (tepelné vodivosti, teplotní vodivosti), tak i na okrajové podmínce vyjádřené koeficientem přestupu tepla α . (Horáček, 2008)

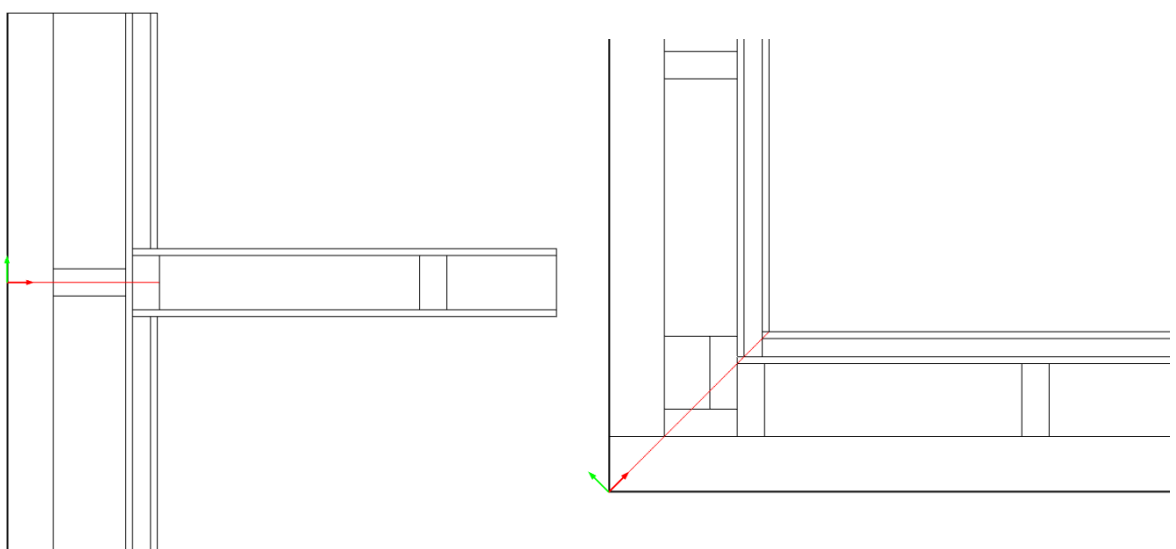
Na povrchu konstrukce, v mezní vrstvě, dochází k výměně tepla mezi konstrukcí a okolním prostředím. Tato výměna tepla se nazývá přestup tepla a dochází k ní na vnitřním povrchu tak i na vnějším povrchu konstrukce. K přestupovým jevům dochází

na základě proudění vzduchu na povrchu konstrukce a sáláním mezi povrchem konstrukce a okolními tělesy (stěnami, budovami apod.). (Kulhánek, 2005)

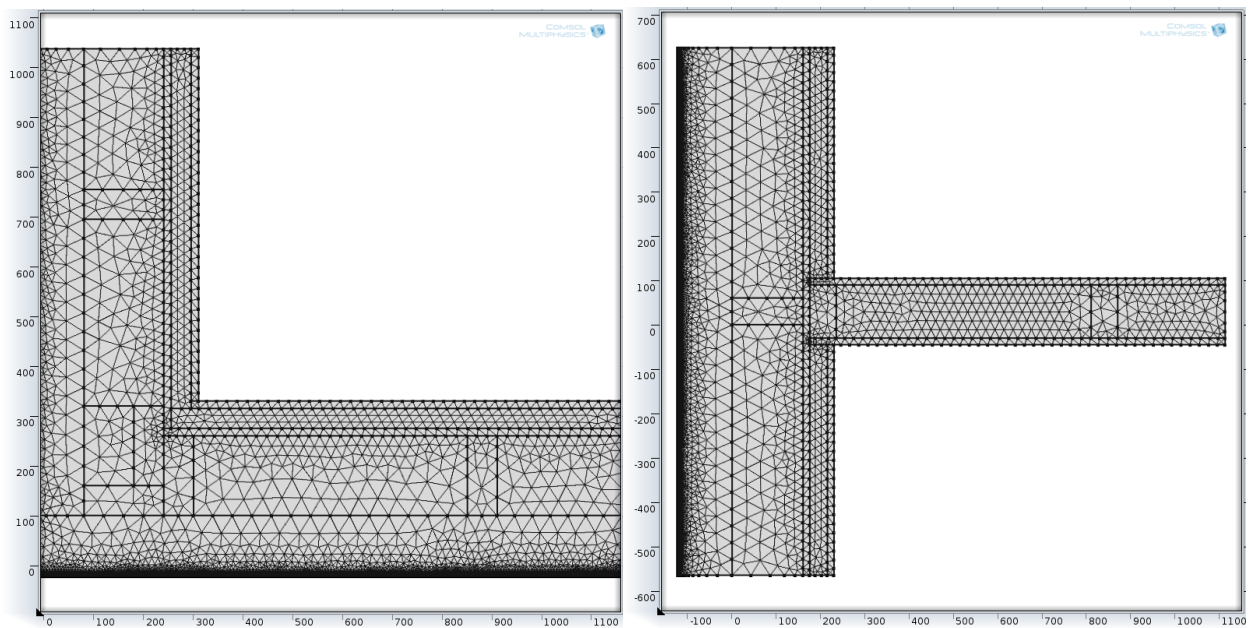
Dle ČSN 73 0540 jsem použil součinitele přestupu tepla pro interiér a exteriér. Pro vnější povrch jsem využil hodnotu koeficientu přestupu tepla $\alpha = 23 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$ (zimním období) a v software jsem ji přiřadil k vnější linii modelu. Stejný postup je i pro interiér, pouze hodnota koeficientu přestupu tepla je $\alpha = 8 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$. V místě řezu konstrukce je nutno zvolit adiabatickou hranici z důvodu teoretického pokračování konstrukce, což napomáhá v nasimulování co nejněvhodnější situace.

Podle (Veverka, 2006) se teplotní pole 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.

Výsledky teplotního pole budou zobrazeny po úsečce definované pomocí dvou bodů zadané souřadnicemi. Úsečku jsem definoval v kritických místech obvodové konstrukce vedenou přes KVH sloupky, kde lze nejlépe zkoumat teplotní pole a teplotní setrvačnost. A to z důvodu nejlépe objasněných a zavedených hodnot tepelných vlastností závislých na okolních vlivech u smrkového dřeva. Mimo jiné sloupky z KVH hranolu zde tvoří tepelné mosty z důvodu jejich nižších tepelně izolačních hodnot než je tomu u přilehlé izolace z dřevovláknitých desek. Úsečka definující místo zkoumaného teplotního pole je zobrazena v Obr. 6 červenou barvou.



Obr. 6 - Úsečka definující místo zkoumaného průběhu teplotního pole u detailů obvodové konstrukce (autor)



Obr. 7 - Diskretizace sítě (autor)

Každý materiál byl definován pomocí tepelně technických vlastností: objemové hmotnosti, měrné tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti. Následující krok je tvorba sítě, kdy byly přiřazeny jednotlivým plochám modulu jejich atributy, celý prvek byl rozdělen sítí a byly vytvořeny uzly. Poslední fází už je jen výpočet softwaru metodou konečných prvků.

5 Výsledky

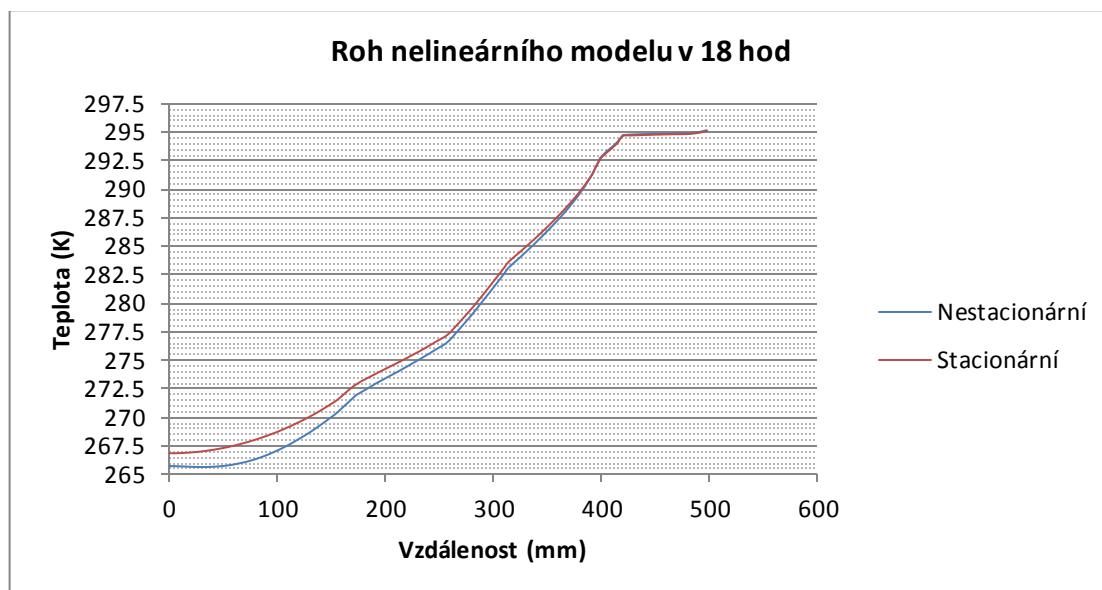
Stěžejní této práce je porovnat výpočet teplotního pole stacionárního děje s nestacionárním dějem v nelineárních modelech a lineárních modelech. Tedy nelineární modely obsahují teplotně závislé vstupní veličiny např. materiálové konstanty, koeficient přestupu tepla atd. U lineárních modelů vstupní veličiny nejsou závislé na teplotě. Toto srovnání je provedeno u dvou detailů, napojení příčky na obvodovou stěnu a rohové spojení obvodové stěny.

(Veverka, 2006) uvádí, že tepelná nestejnorodost vzájemného styku dvou nebo více druhů stavebních konstrukcí se nazývá tepelnou vazbou, což je zvláštní případ tepelného mostu. Tepelná vazba je klasifikována jako rozhraní mezi dvěma a více konstrukcemi (např: konstrukční styk obvodového pláště a příčky). Podle tohoto tvrzení se mnou zvolené detaily mohou definovat, jako tepelné vazby.

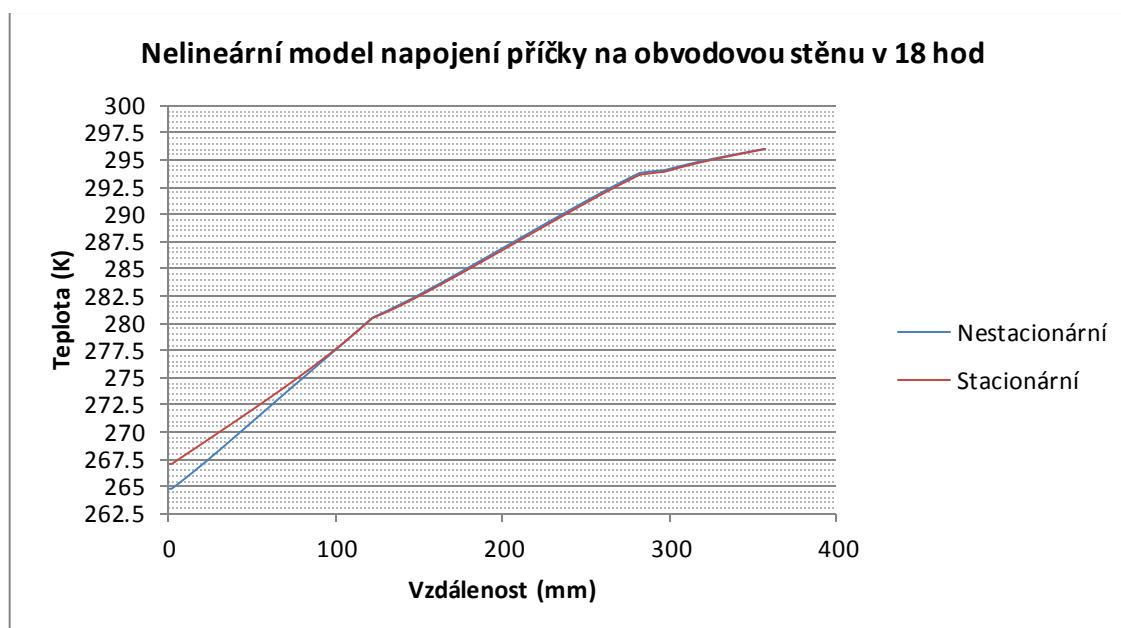
Výsledky budou porovnávány a vyhodnoceny pro 3 časové okamžiky a to pro 18. hodinu, 24. hodinu a 6. hodinu ráno, které udávají exteriérové okrajové podmínky. Pro všechny časové okamžiky je interiérová okrajová podmínka stanovena na 20 °C.

5.1 Výsledky numerických simulací nelineárních modelů

Jako první vyhodnocuji teplotní pole pro nelineární modely nestacionárního a stacionárního výpočtu u detailů obvodové konstrukce.



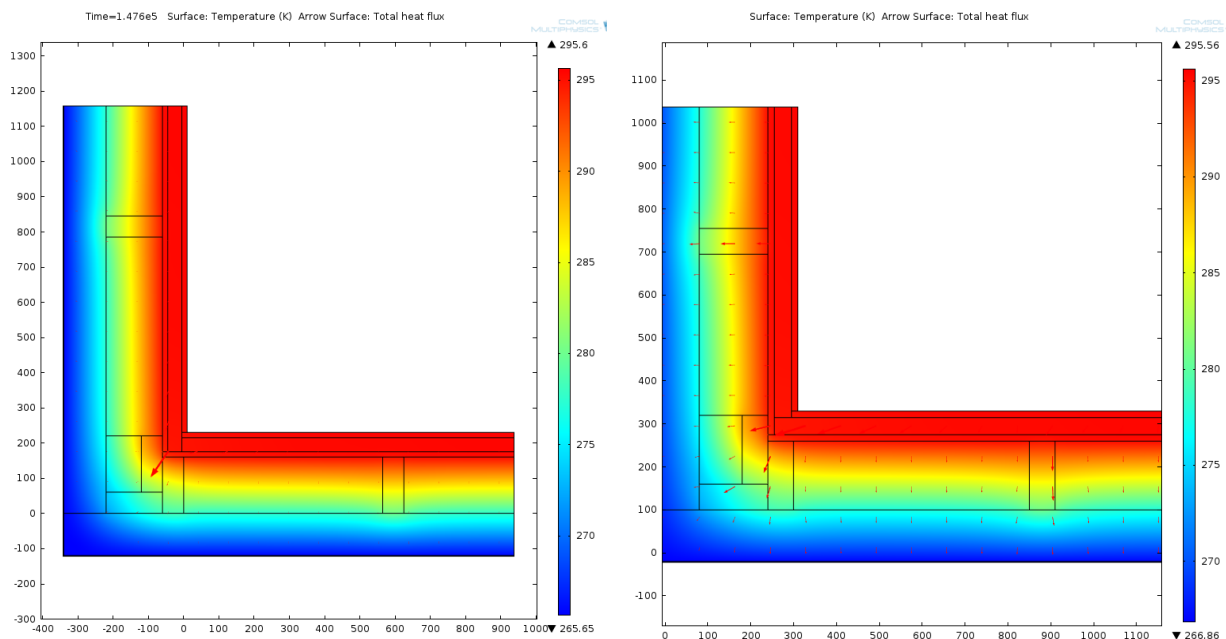
Obr. 8 - Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 18 hod. (autor)



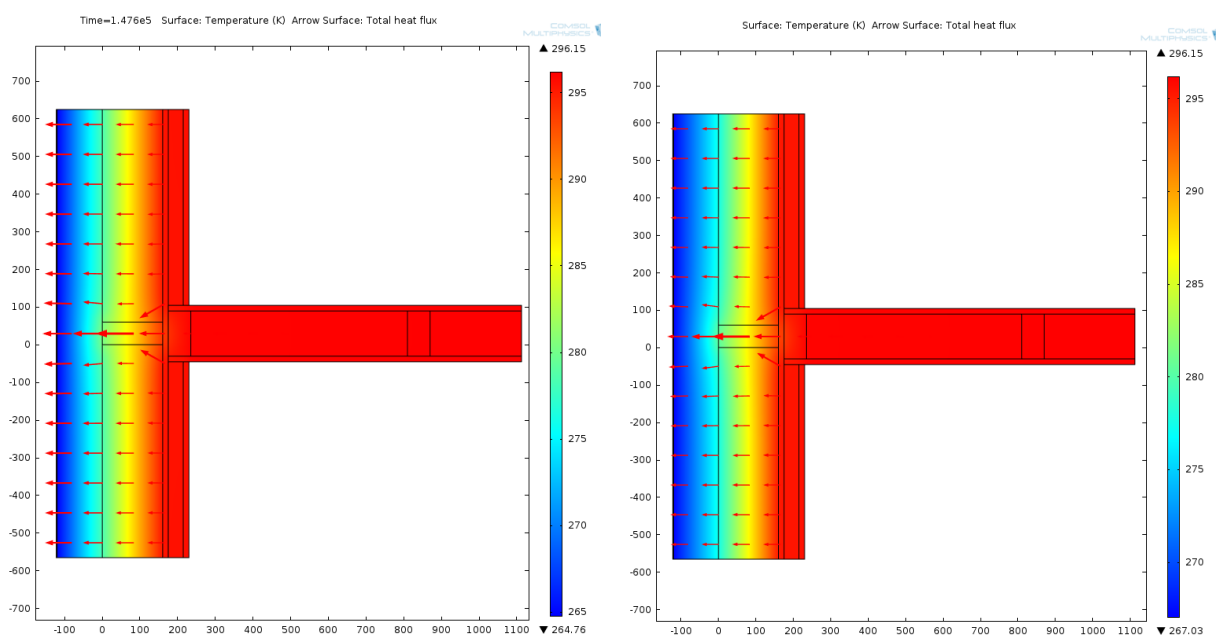
Obr. 9 – Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 18 hod. (autor)

V 18. hodině večerní je exteriérová teplota vzduchu 266,85 K (-6,30 °C) v hodinových intervalech před 18. hodinou byly naměřeny teploty nižší -8,88°C, -

8,13°C, -7,68°C, -7,01°C, -6,33°C. Naměřený průběh teploty podle Obr. 8 ukazuje, jakým způsobem se konstrukce díky svým tepelně izolačním vlastnostem vyrovnává s rozdílem vnitřních a venkovních teplot. Zatímco vnější povrch konstrukce je zatěžován velkým rozdílem povrchových teplot, tak na povrchu interiéru tomu tak není. Jelikož je interiérová teplota konstantní 296,15 tedy 20 °C je na povrchu z interiérové strany, tedy povrchu fermacell desky teplota stejná ve stacionárním tak i v nestacionárním ději. Kdežto na povrchu exteriéru, konkrétně na povrchu silikátové omítky a v místě kontaktní izolace je významný rozdíl teplot mezi nestacionárním a stacionárním dějem. Nižší teplota u nestacionárního děje je vyvolána teplotní setrvačností v důsledku, že v předešlých intervalech na konstrukci působila exteriérová teplota vzduchu nižších hodnot. Největší rozdíl je patrný v oblasti od 0 mm do cca 120 mm, tedy v oblasti izolace Steico Special. Tento fakt může být způsoben rozdílnou hodnotou součinitele teplotní vodivosti u materiálů obsažených v konstrukci. A to tak, že čím je hodnota součinitele teplotní vodivosti materiálu vyšší, tím rychleji se mění teplota uvnitř materiálu vzhledem ke změně teploty na jeho povrchu. V tomto případě izolace Steico Special má nižší hodnotu součinitele teplotní vodivosti než KVH, respektive smrkové dřevo. Dalším pravděpodobným aspektem je fakt, že čím je měrná tepelná kapacita izolačního materiálu vyšší, tím je i vyšší teplotní setrvačnost. Měrná tepelná kapacita izolačních materiálů Steico dosahuje vyšších hodnot než smrkový KVH hranol.



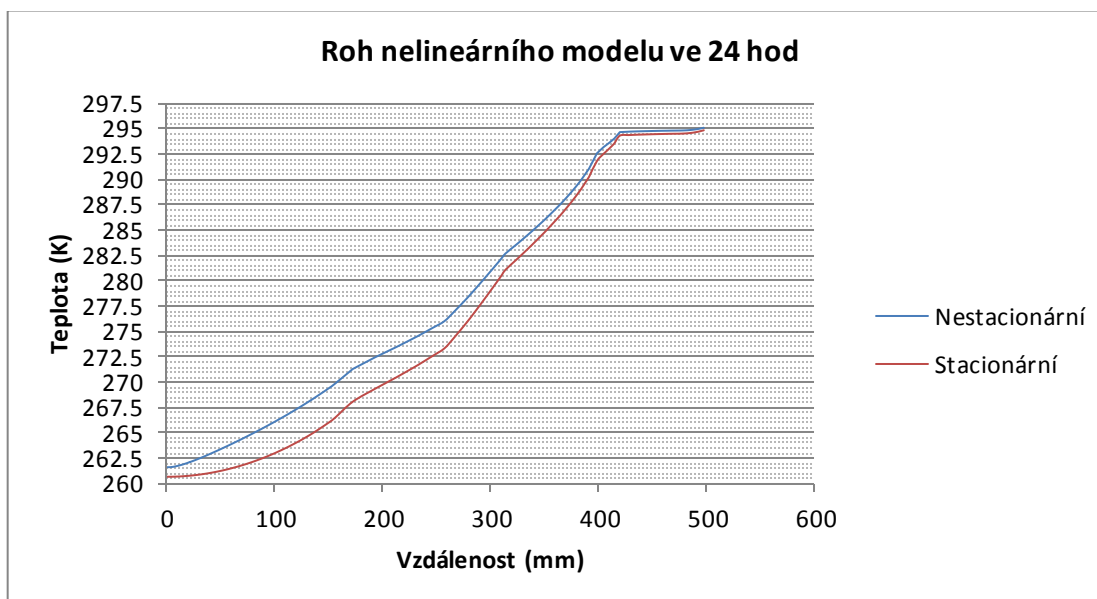
Obr. 10 - Rozložení teploty v nelineárních modelech rohový chdetailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) 18 hod (autor)



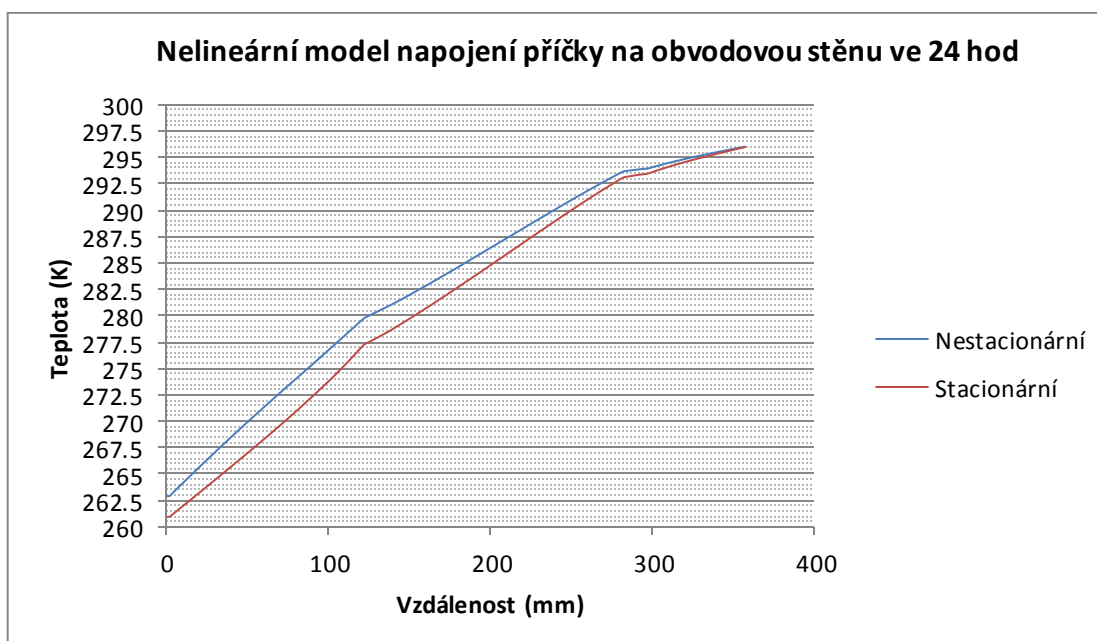
Obr. 11 - Rozložení teploty v nelineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) v 18 hod (autor)

V Obr. 10, 11 je znázorněn plynulý přechod teploty, bez žádných extrémních výchylek, patrných na první pohled. Ovšem v místě a na rozhraní KVH sloupku je znázorněn červenou šipkou největší tepelný tok, kde je taky patrný výskyt vyšší teploty oproti okolnímu prostředí což způsobuje tepelný most. Tento tepelný most je vyvolán

zejména vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti KVH oproti izolačním dřevovláknitým materiálům. Ovšem při porovnání rozložení teplot mezi stacionárním a nestacionárním dějem modely nevykazují na první pohled významné rozdíly, jak by se mohlo jevit z Obr. 8, 9. Avšak velmi nepatrný rozdíl barev mezi těmito ději v rozhraní Steico Special lze pozorovat, který je pravděpodobně vyvolán teplotní setrvačností.

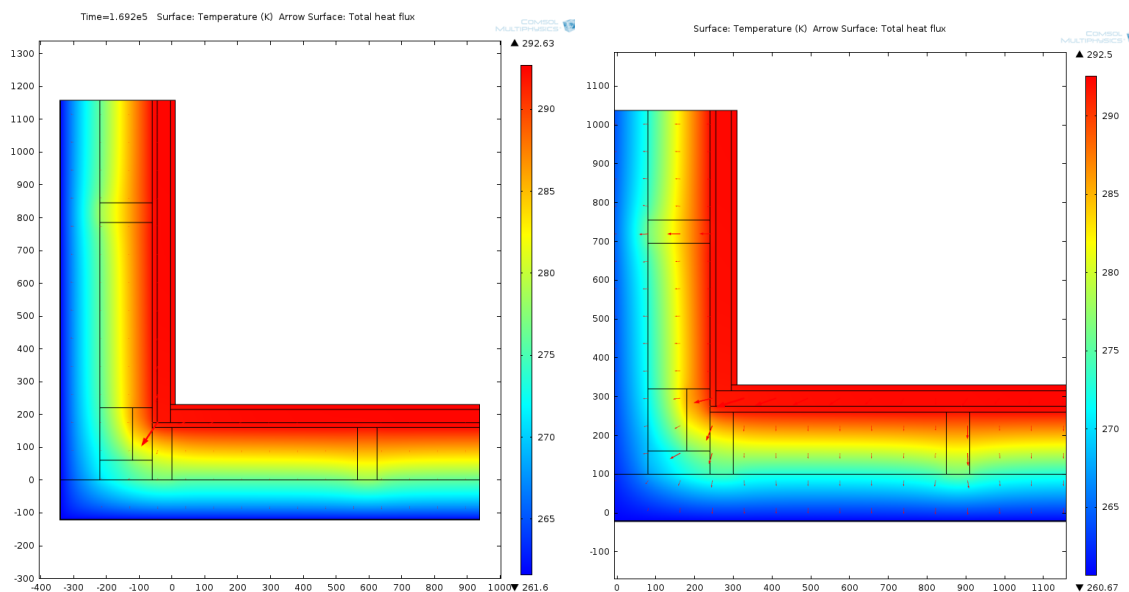


Obr. 12 Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu ve 24 hod. (autor)

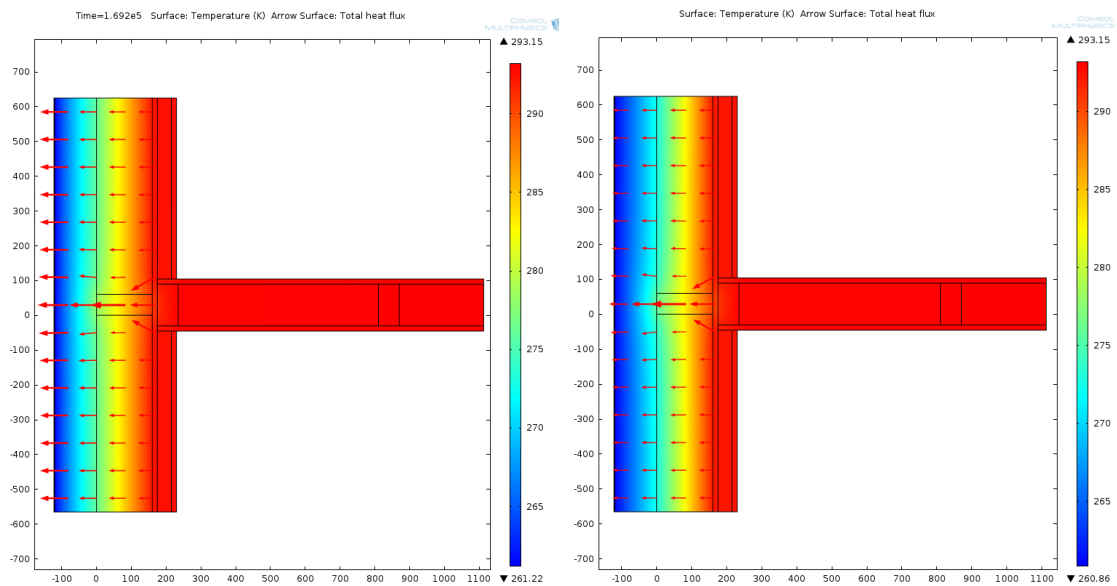


Obr. 13 - Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu ve 24 hod. (autor)

Při zkoumání teplotního pole pro 24. hodinu večerní, kdy exteriérová okrajová podmínka činí 260,66 K (-12,49 °C) s předešlými hodinovými teplotami od 18 hodiny - 6,84°C, -8,44°C, -9,97°C, -10,68°C, -11,74°C je teplotní setrvačnost opět znát. Avšak oproti předešlému srovnání stacionárního děje s nestacionárním v tomto případě vykazuje nižší teplotu stacionární děj. Tento fakt je vyvolán nižšími hodnotami teplot v předchozím časovém intervalu, kdy si nestacionární děj akumuloval teplo. Kdežto stacionární děj pracuje s konstantní okrajovou podmínkou pro konkrétní časový okamžik a neuvažuje tedy akumulované teploty v materiálech z předešlých časových intervalů. V tomto časovém okamžiku jsou patrné velké rozdíly v křivkách stacionárního a nestacionárního děje v určitých místech až 2,5 K. Křivky se prakticky spojují až na povrchu interiéru, což dokazuje teplotní setrvačnost v celé obvodové konstrukci. V těchto případech může nelineární model přispívat k většímu rozdílu teplot vlivem závislosti materiálových konstant na teplotě z předešlých časových intervalů.

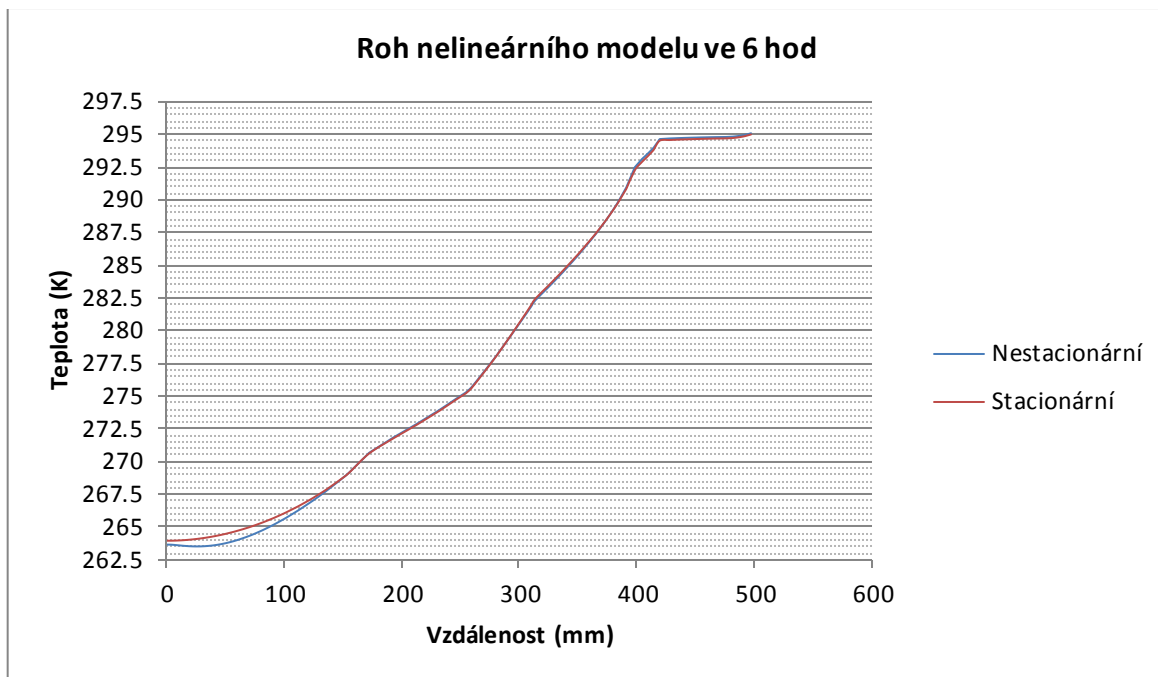


Obr. 14- Rozložení teploty v nelineárních modelech rohových detailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail ve 24 hod (autor)

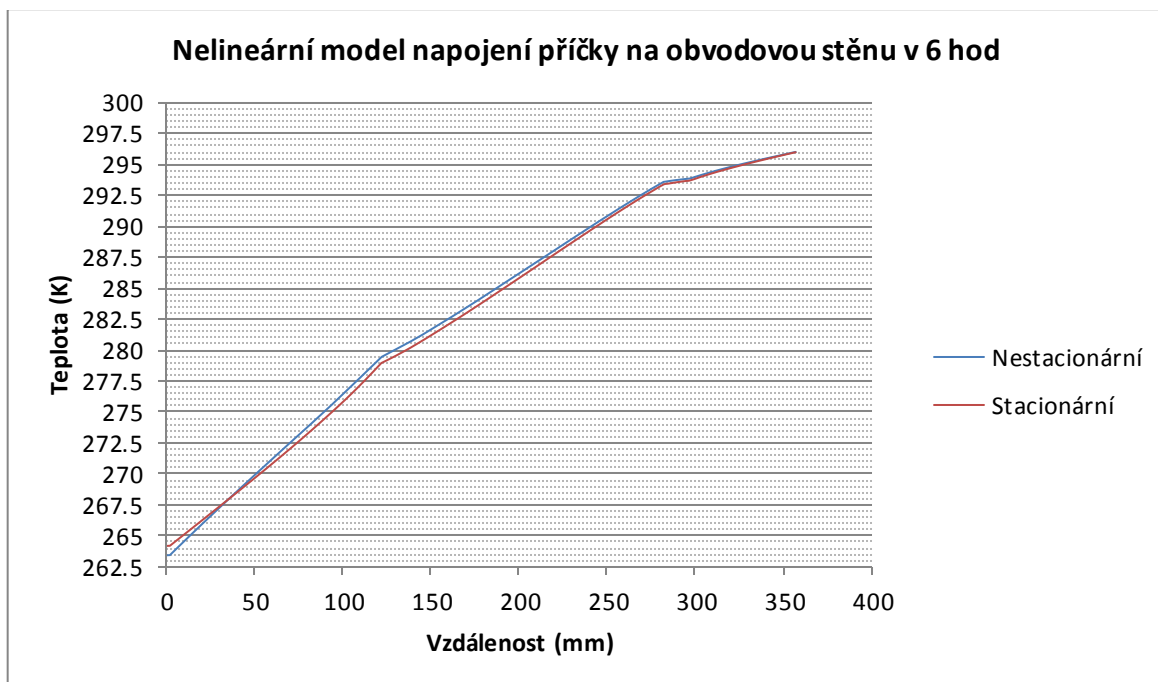


Obr. 15 - Rozložení teploty v nelineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) ve 24 hod (autor)

Při zkoumání teplotního průběhu v celých detailech konstrukce je z uvedeného Obr. 14, 15 mírně zřetelný rozdíl teplotního rozložení mezi stacionárním a nestacionárním dějem. U obou detailů nestacionární děj vykazuje vyšší teploty blíž exteriéru než je tomu u stacionárního děje. Tato skutečnost je zřetelná především v oblasti kontaktní izolace a izolace mezi sloupky, což je opět vyvoláno teplotní setrvačností.



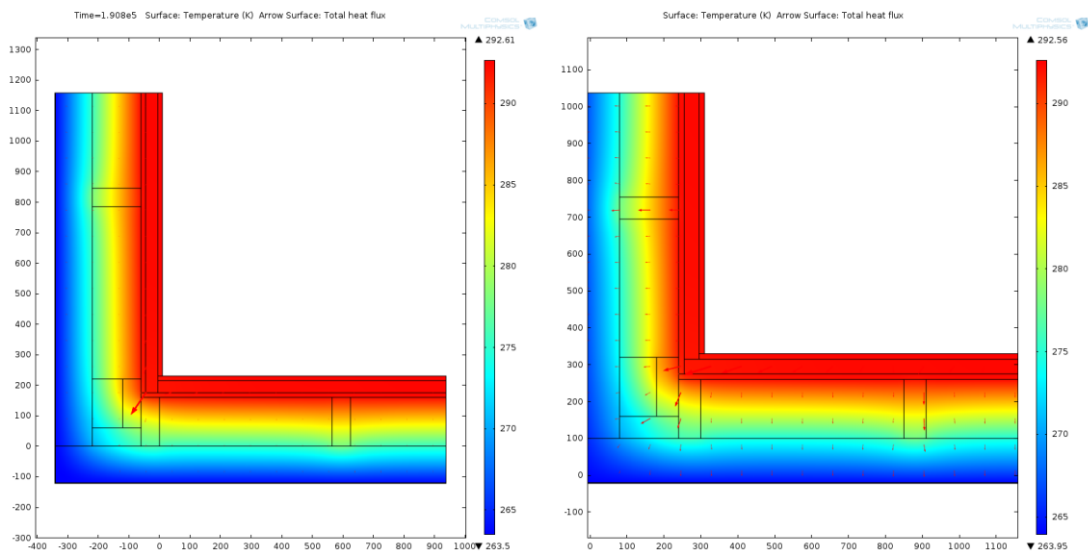
Obr. 16 - Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 6 hod. (autor)



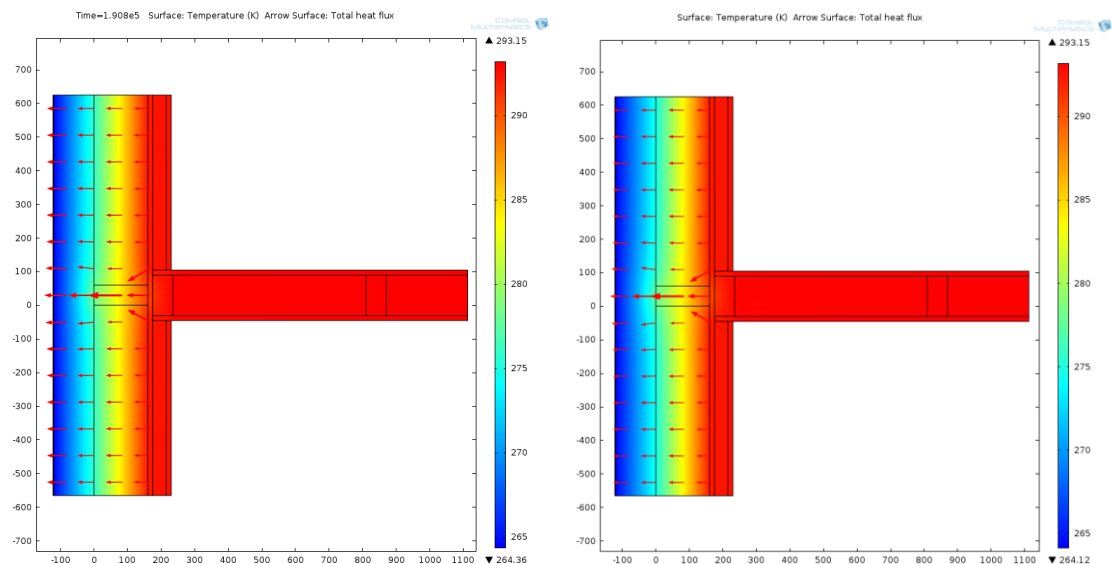
Obr. 17 - Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 6 hod. (autor)

Pro 6. hodinu ranní připadá exteriérová teplota vzduchu 263,94 K (-9,21°C) a od 24 hodiny do 6 hodiny působila exteriérová teplota vzduchu v hodnotách -12,47°C, -12,15°C, -11,68°C, -10,96°C, -10,38°C, tedy teplota stoupala. Z obr. 16, 17 je patrné

prolínání křivek stacionárního a nestacionárního děje, což popisuje dorovnání rozdílů teplot v konstrukci, které bylo zřejmé z měření ve 24 hod. Dalo by se říct, že konstrukce nebyla v předešlých časových okamžicích dostatečně ochlazená natolik, aby v konstrukci vznikl v 6 hod rozdíl mezi stacionárním a nestacionárním dějem. Z uvedených Obr. 16, 17 lze usoudit, že chladnější teplotu si nestacionární děj oproti stacionárnímu ději přenesl pouze v tenké vrstvě konstrukce na rozhraní omítky a kontaktní izolace. U grafu popisující průběh teplot v detailu napojení přičky na obvodovou konstrukci teplota nestacionárního děje mírně stoupla nad teplotou stacionárního děje ve vzdálenosti 50 – 280 mm. Tato anomálie mohla být vyvolána tím, že si materiál akumuloval teplo z časového intervalu od 18. hodiny do 20. hodiny, kdy nabyla exteriérová teplota vyšších hodnot než v okamžiku 6. hodiny ránní a vlivem teplotní setrvačnosti teplota v konstrukci vykazuje nepatrně vyšších hodnot u nestacionárního děje.



Obr. 18 - Rozložení teploty v nelineárních modelech rohových detailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail v 6 hod (autor))

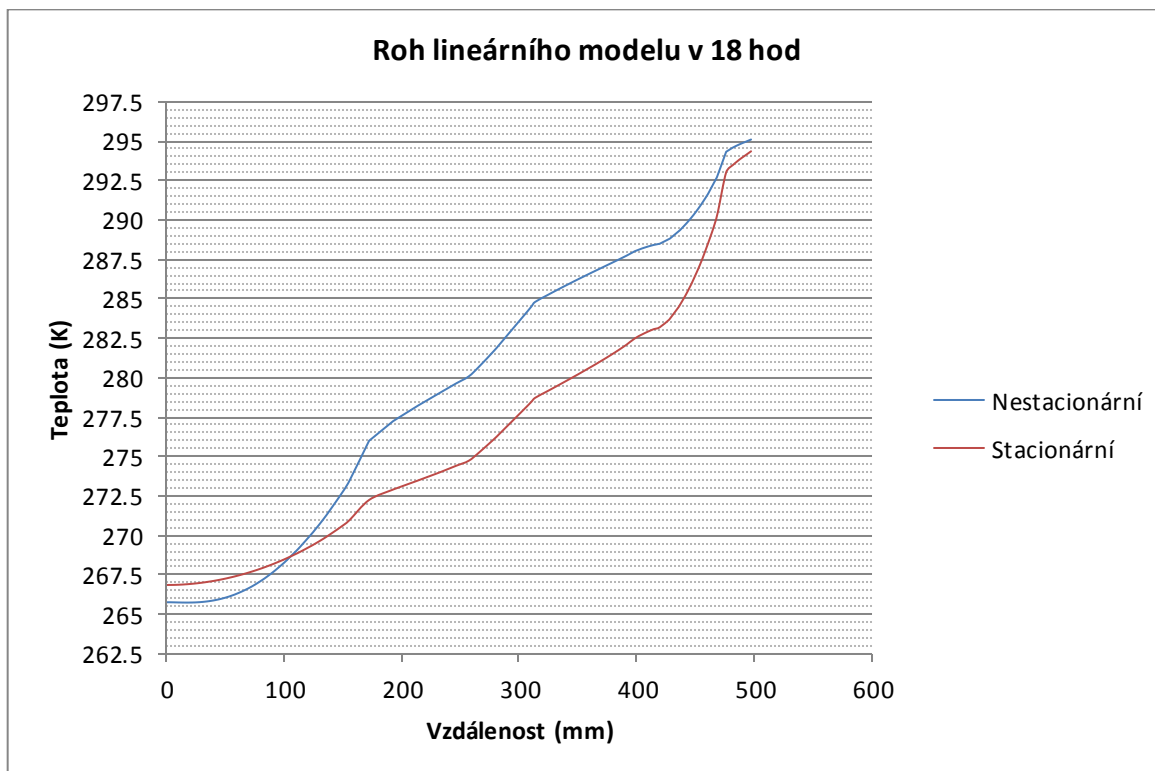


Obr. 19 - Rozložení teploty v nelineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) v 6 hod (autor)

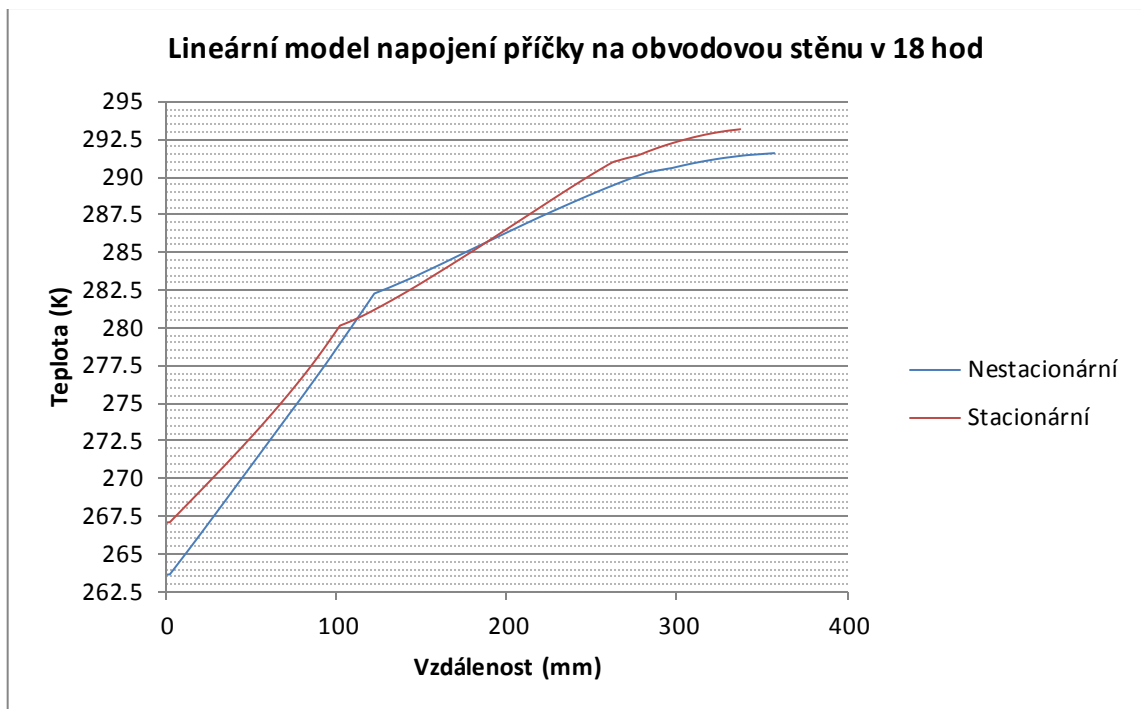
Podle Obr. 18, 19 lze konstatovat plynulý přechod teplot bez viditelných rozdílů mezi stacionárním a nestacionárním dějem.

5.2 Výsledky numerických simulací lineárních modelů

V další části práce vyhodnocuji teplotní pole v lineárních modelech (není zohledněna závislost materiálových vlastností na teplotě) mezi nestacionárním a stacionárním dějem u detailů obvodové konstrukce.

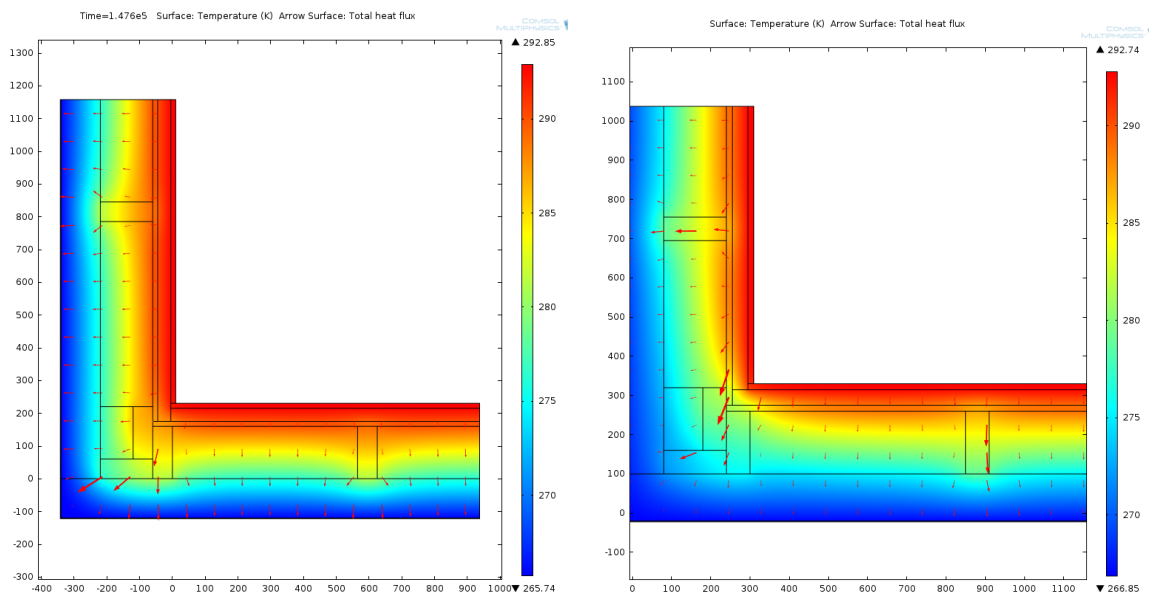


Obr. 20 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 18 hod. (autor)

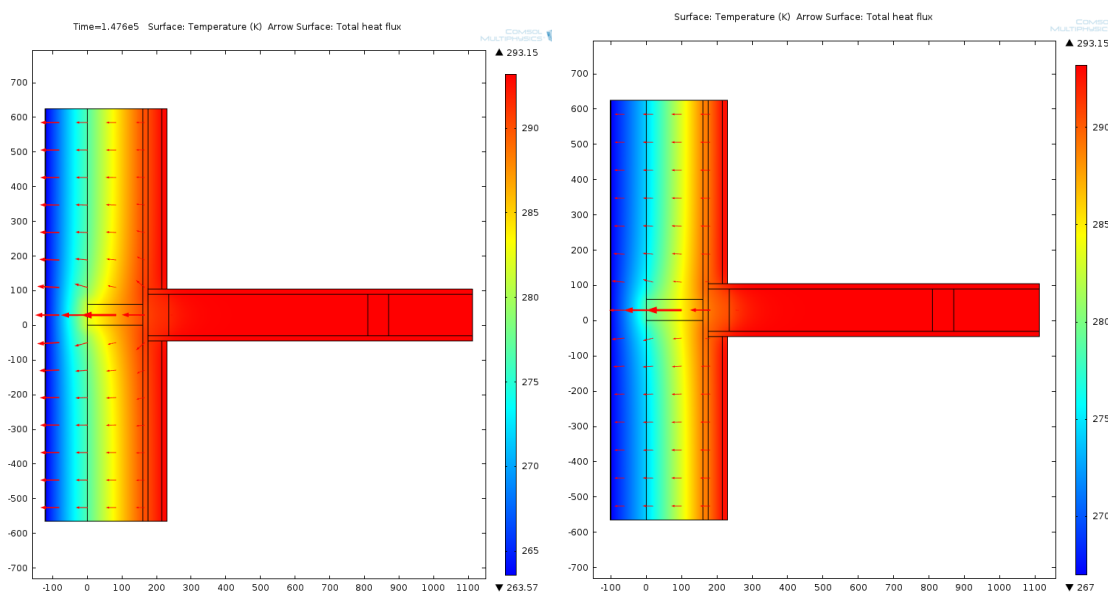


Obr. 21 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 18 hod. (autor)

V 18 hodině byla uvedena exteriérová teplota v hodnotě 266,85 K (-6,30 °C) a v časových intervalech před 18. hodinou byly v porovnání teploty nižší. V oblasti kontaktní izolace v obou detailech vykazuje Obr. 20, 21 nestacionárnímu ději nižší teplotu než stacionárnímu ději. Tato skutečnost je opět způsobena teplotní setrvačností v konstrukci. Poněkud velkou změnu teploty popisuje křivka nestacionárního děje v rohovém napojení. Strmé stoupání rozdílů teplot v oblasti KVH sloupku až po povrch interiéru je zřejmě způsobeno lineárním modelem, tedy žádnou závislostí vstupních veličin na teplotě se spolupůsobením nestacionárního děje. Tento výrazný rozdíl teplot někdy až 5 K je viditelný pouze u rohového napojení. U napojení příčky na obvodovou konstrukci je tento rozdíl teplot viditelný pouze v rozdílu 2 K a to v úzkém rozsahu KVH sloupku. Jinak se křivka nestacionárního děje drží pod křivkou stacionárního děje, a to poukazuje na skutečnost teplotní setrvačnosti.



Obr. 22 - Rozložení teploty v lineárních modelech rohových detailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail v 18 hod (autor)

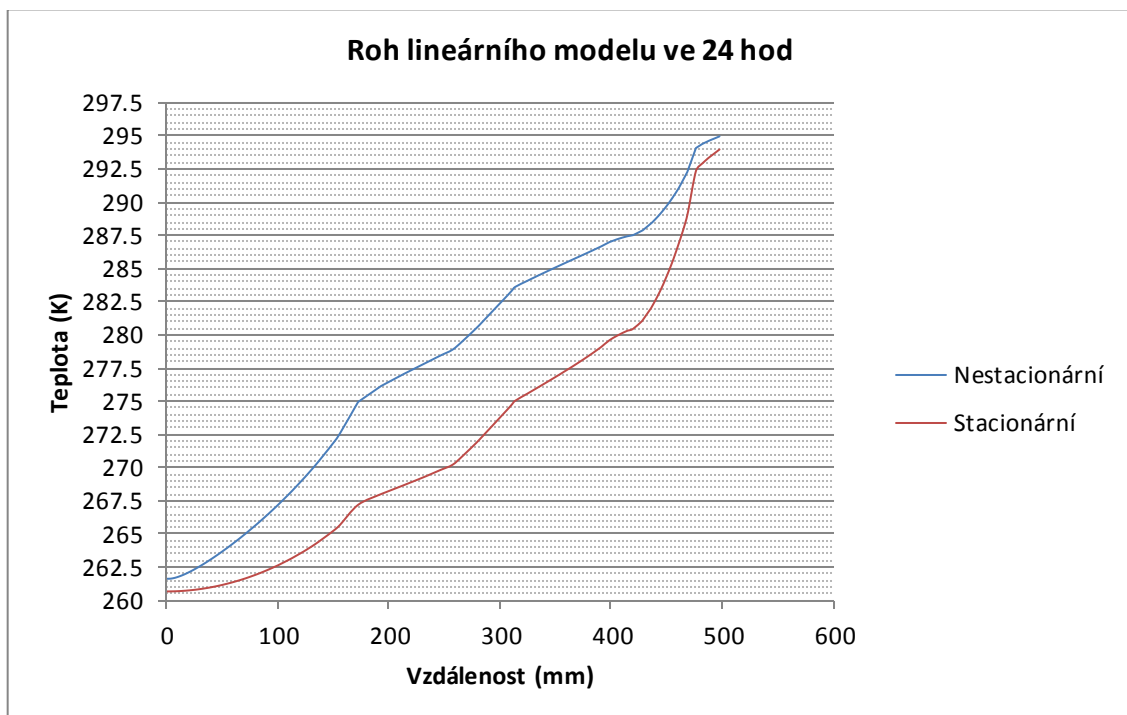


Obr. 23 - Rozložení teploty v lineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) v 18 hod (autor)

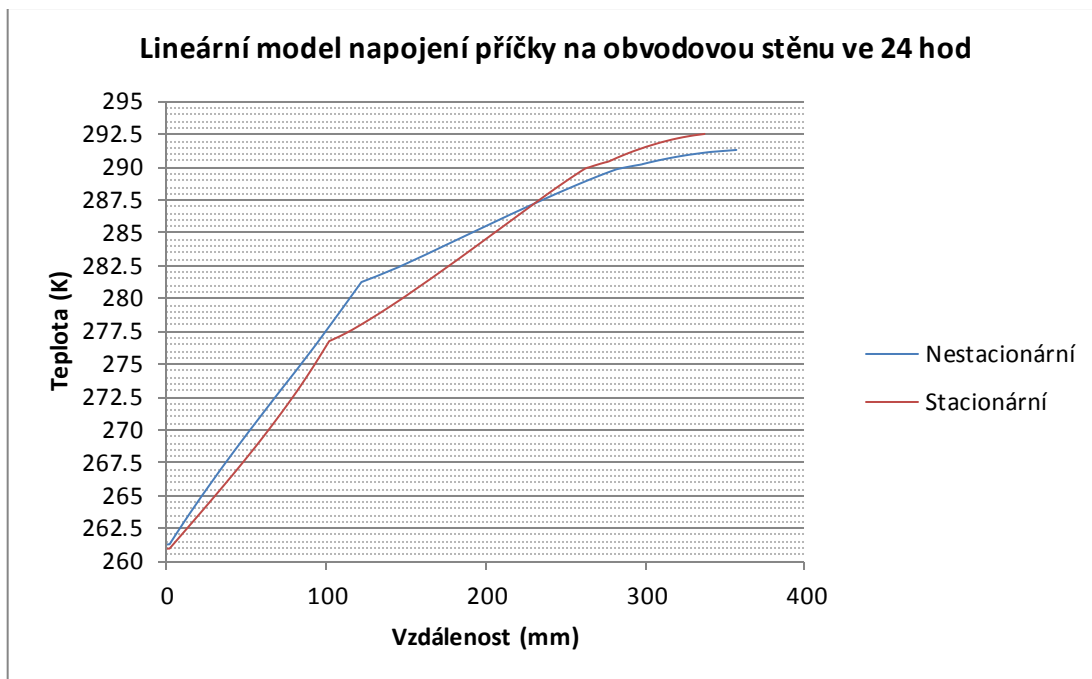
Hodnocením rozložení teploty v detailech dle Obr. 22, 23 lze usoudit, že průběh rozložení teploty lineárních modelů je opačný nelineárním modelům. Kdy nelineární modely v tento časový okamžik vykazují nestacionárnímu ději nižší teploty než stacionárnímu ději. V obr. 22 v levém rohu je viditelný markantní rozdíl teplot v rozsahu KVH sloupků mezi stacionárním a nestacionárním dějem.

Jak uvádí (Veverka, 2006) deformace teplotního pole koutu nastává v důsledku nestejných ploch, kdy vnější strana konstrukce rohu zaujímá větší plochu než vnitřní strana. Na vnější straně konstrukce dochází k intenzivnějšímu ochlazování, a tím i k poklesu vnitřní povrchové teploty v místě koutu.

V kombinaci s charakterem lineárního modelu se tato teplotní deformace projevuje v Obr. 22 mezi stacionárním a nestacionárním dějem.

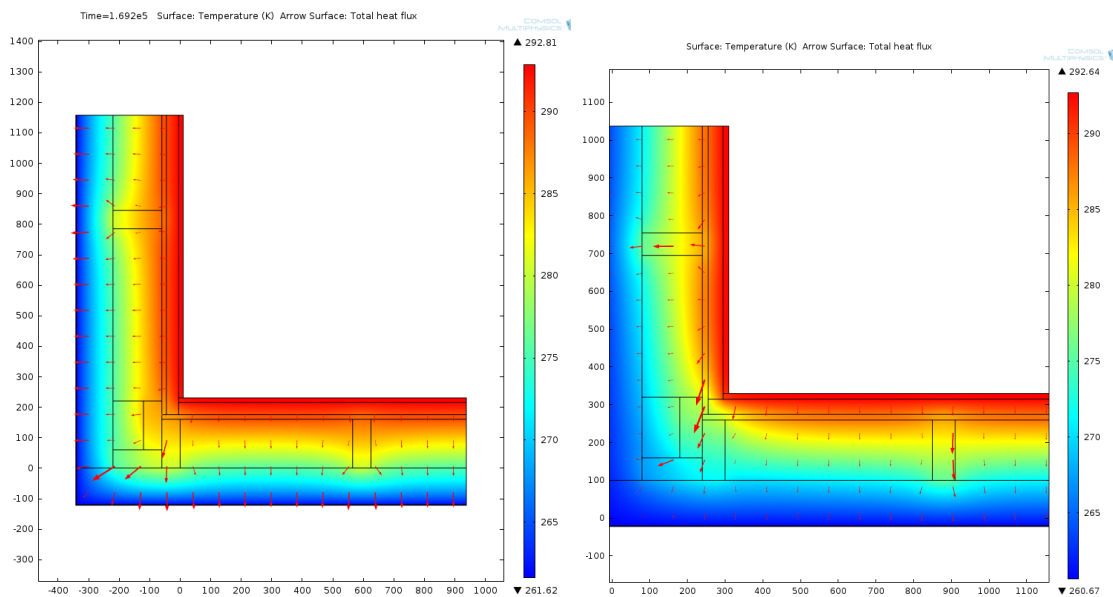


Obr. 24 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu ve 24 hod. (autor)

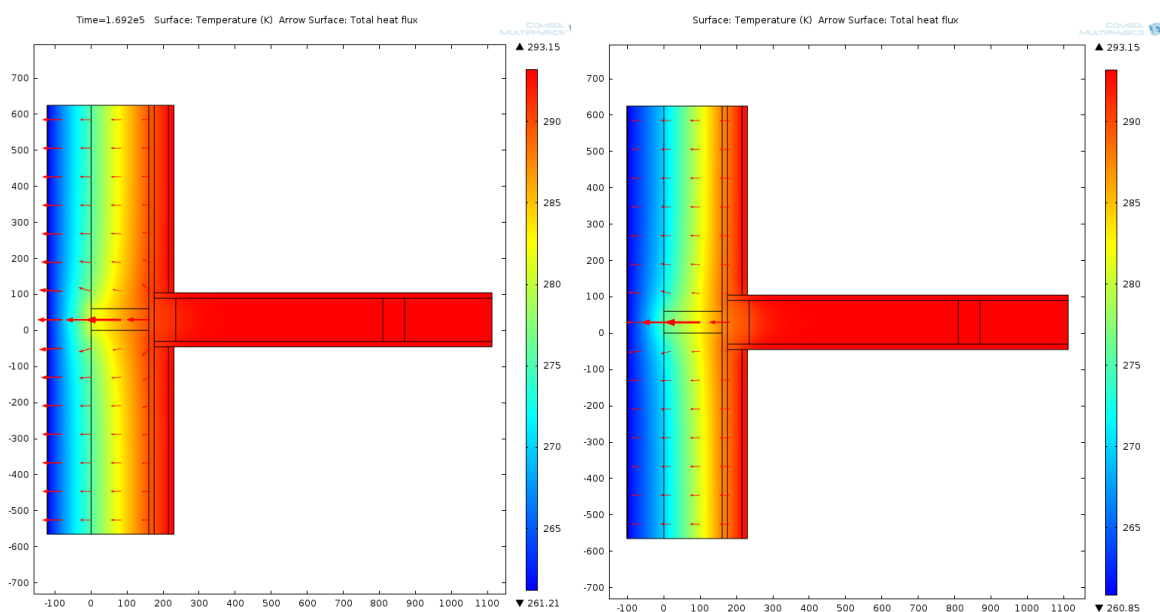


Obr. 25 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu ve 24 hod. (autor)

Pro časový okamžik 24 hod byla hodnota exteriérové teploty vzduchu 260,66 K (-12,49°C), tato hodnota v rozmezí 18. a 24. hod klesala. Z Obr. 24 lze usoudit, že v celém průřezu detailu rohového napojení je teplota v nestacionárním ději rapidně vyšší než ve stacionárním ději. Tuto skutečnost lze opět přisoudit teplotní setrvačnosti se spolupůsobením nezávislosti vstupních materiálových vlastností na teplotě. Konkrétně z důvodu konstantních hodnot měrného tepla, součinitele tepelné vodivosti a dalších spolu souvisejících materiálových hodnot se teplotní rozdíl u lineárních modelů ještě více zvětšil, než tomu bylo v Obr. 12, 13 nelineárních modelů. V grafu napojení příčky podle Obr. 25 se teplotní hodnoty mírně liší a to je způsobeno stejnými faktory jako v detailu rohového napojení. Jedinou anomální odchylku zde tvoří vyšší teplota v oblasti minerální vaty, kdy stacionární děj nabývá vyšších hodnot.

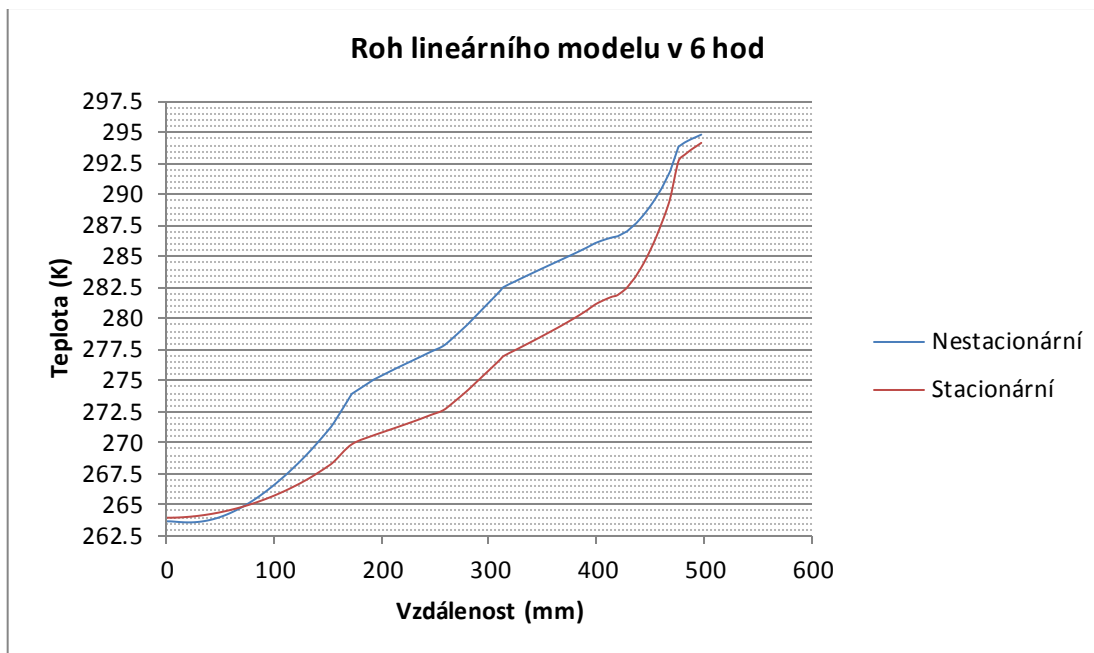


Obr. 26 - Rozložení teploty v lineárních modelech rohových detailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail ve 24 hod (autor))

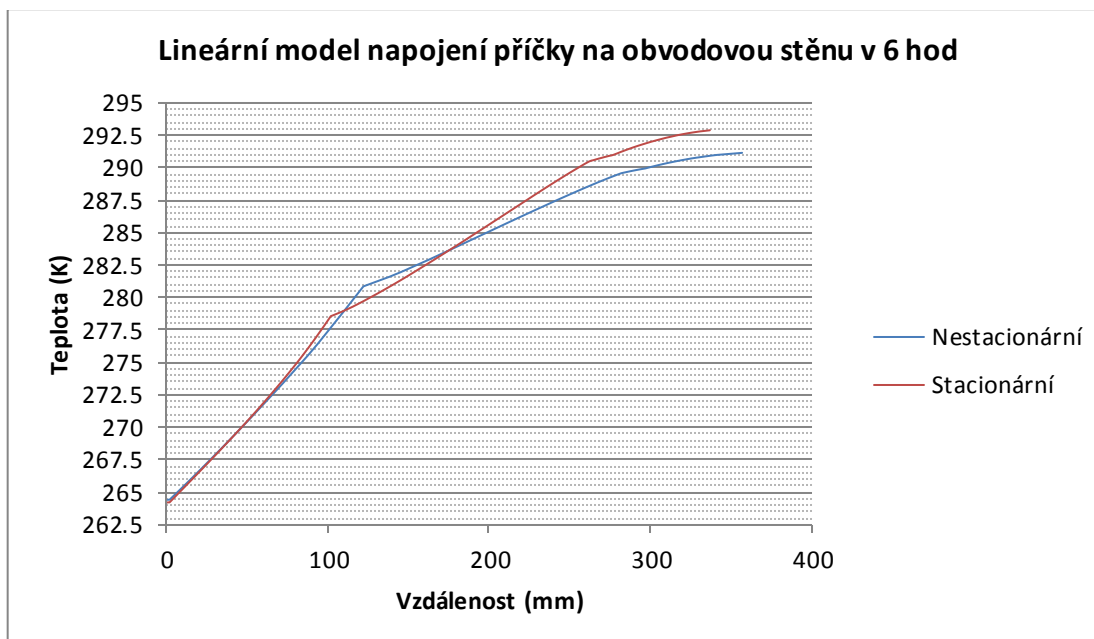


Obr. 12 - Rozložení teploty v lineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) ve 24 hod (autor)

Z uvedených Obr. 26 27 vyplývá rapidní rozdíl mezi nestacionárním dějem a stacionárním dějem, kdy vlivem teplotní setrvačnosti v kombinaci s konstantními materiálovými hodnotami model nestacionárního děje nabývá vyšších teplot a to především v KVH sloupu.



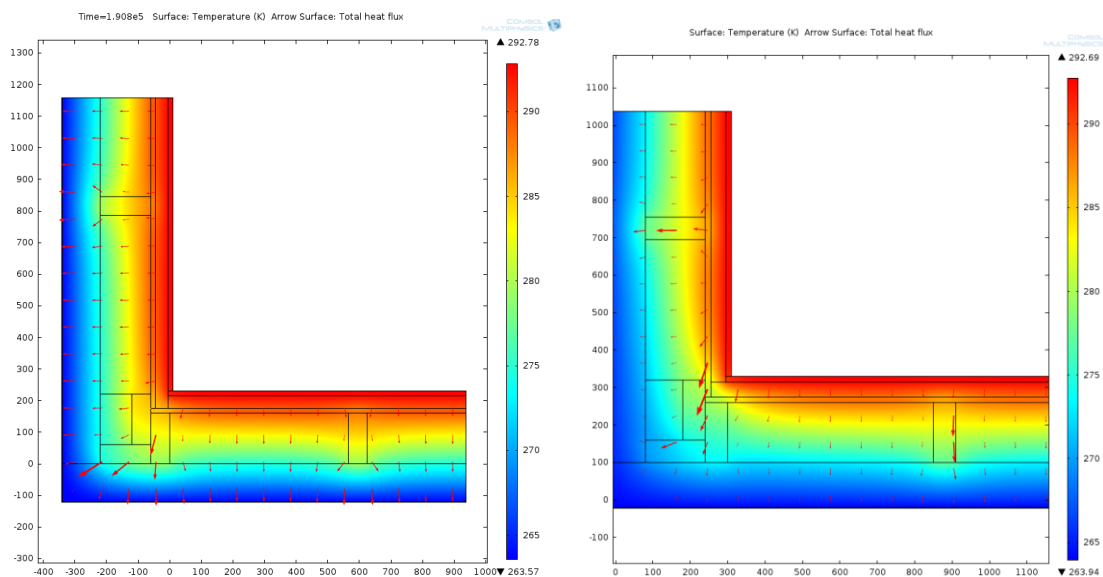
Obr. 13 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 6 hod. (autor)



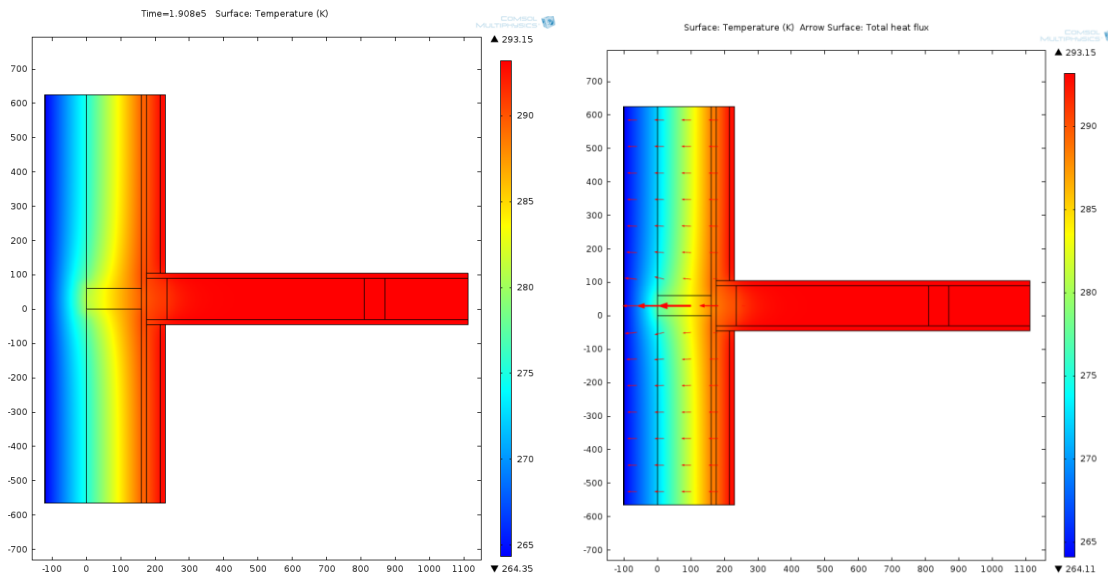
Obr. 14 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 6 hod. (autor)

Teplota exteriérového vzduchu je v okamžiku 6. hodiny ranní 263,94 K (-9,21°C), do tohoto časového okamžiku od 24 hod teplota stoupala. Podle Obr. 27 grafu rohového napojení vykazuje na rozhraní kontaktní izolace teplotu nestacionárního děje nepatrně nižší oproti stacionárnímu ději, což vypovídá o teplotní setrvačnosti materiálu.

V rozhraní KVH sloupků v rohovém spojení konstrukce křivky vykazují značné vzájemné odchylky. V kombinaci nestacionárního děje s nezávislostí materiálových vlastností na teplotě se teplota v konstrukci drží až o 5 K výš než je teplota stacionárního děje. To je způsobené opět nezávislostí vstupních materiálových veličin na teplotě, jako měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti a větším časovým zpožděním akumulovaného tepla. V obr. 28 grafu napojení příčky je zřetelné prolínání křivek nestacionárního a stacionárního děje v oblasti kontaktní izolace. Avšak v okraji KVH sloupku ve vzdálenosti cca 120 mm teplota nestacionárního děje vykazuje vyšší teplotu. Dále se zvyšující se vzdáleností v konstrukci se teplota nestacionárního děje dostala pod úroveň teploty stacionárního děje. Tento průběh křivek přisuzuji opět konstantní závislosti materiálových vlastností zejména měrné tepelné kapacity materiálů, kdy tato veličina není ovlivněna teplotou a v určitých časových okamžicích vykazuje konstantní hodnotu. Oproti grafu rohového napojení se křivky vyvíjí odlišně. To přisuzuji vlivu většího teplotního ovlivnění rohového napojení, kde exteriérová teplota působí ve větší ploše na tento detail.



Obr. 15 - Rozložení teploty v lineárních modelech rohových detailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail v 6 hod (autor))



Obr. 16 - Rozložení teploty v lineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) v 6 hod (autor)

Podle Obr. 29 je opět zřetelný průběh teplot v rohovém detailu, přičemž je evidentní ovlivnění lineárních modelů vstupními materiálovými hodnotami, které jsou konstantní a nemění se s teplotou. Tento rozdíl je pak více markantní u lineárních modelů než u nelineárních modelů. Podle Obr. 30 rozložení teploty v detailu napojení příčky na obvodovou konstrukci se teplotní pole od sebe tolik neliší. Tento fakt přisuzují rovnoměrnějšímu působení exteriérové teploty na povrch stěny než je tomu v rohovém detailu.

6 Diskuze

V případě hodnocení výstupů z numerických simulací konkrétně analyzování nestacionárního a stacionárního děje u nelineárních modelů se teplotní pole chovalo podle očekávání. Teplotní pole v neustálených podmínkách popsalo závislost na teplotách z předešlých časových intervalů a projevovala se teplotní setrvačnost podle druhého Fourierova zákona. Největší odchylky teplot byly zaznamenány převážně v kontaktní izolaci, tedy blíže exteriéru, kde na konstrukci působila v bezprostřední blízkosti teplota nestacionárního děje, zatímco na okraji interiéru byla teplota konstantní. Křivky teplotních dějů se pozvolna sjednocovaly k blížícímu se interiéru bez velkých abnormálních výkyvů. K těmto výsledkům napomáhá i fakt, že konstrukce je z vnější strany zateplena, povrchové teploty jsou pak obecně nižší a vlivem tepelné akumulace dochází k omezení nežádoucích teplotních výkyvů na vnitřním povrchu celé konstrukce.

Rozdíly teplotního pole v numerických modelech mezi nestacionárním a stacionárním dějem můžeme přisuzovat taky vhodnou skladbou materiálu. Tedy podle (Hofman, 2014): Dobrá teplotní setrvačnost materiálu je dosažena, pokud má materiál nízkou hodnotu teplotní vodivosti. Materiál musí mít vyvážené všechny jeho vlastnosti, jako co nejvyšší objemová hmotnost, měrnou tepelnou kapacitu a zároveň co nejnižší tepelnou vodivost. Velmi dobře tedy vychází mnou zvolená dřevovláknitá izolace.

Z hlediska stability tepelného stavu vnitřního prostředí vysoká hodnota teplotního útlumu zajišťuje nejmenší kolísání teploty na vnitřním povrchu konstrukce. Konstrukce se zanedbatelnou tepelnou jímavostí vychladne okamžitě na úroveň teploty vnějšího vzduchu. Pro navýšení tepelně akumulčních vlastností lehkých obvodových konstrukcí se doporučuje využít akumulční prvky (mazaniny v podlahách, vyzdívané vnitřní příčky z klasických zdících materiálů s velkou objemovou hmotností, betonový strop apod.) (Řehánek, 2002). Avšak sádrovláknité desky Fermacell umístěné z vnitřní strany poskytují dostatečnou tepelnou akumulaci k tomu, aby tyto stěny vykazovaly dobrou setrvačnost vnitřní prostorové a povrchové teploty.

U analýzy teplotního pole nestacionárních a stacionárních dějů v lineárních modelech se teploty vyvíjely poněkud s velkými odchylkami. Tyto odchylky jsem zaznamenal převážně v rozhraní KVH sloupku, přičemž nejvíce patrný rozdíl mezi ději

byl v rohovém napojení obvodové stěny. Tuto skutečnost přiřazuji hlavně hodnotám materiálových vlastností. Součinitel tepelné vodivosti není vyjádřen závislostí na teplotě, taktéž měrná tepelná kapacita. V kombinaci nestacionárního děje s charakterem lineárních modelů se teplotní pole vyvíjí většími odchylkami a s větším časovým zpožděním než je tomu ve stacionárním ději.

V rohovém detailu i v detailu napojení přičky na obvodovou stěnu došlo podle očekávání k navýšení tepelného toku v KVH sloupcích, což je zřejmé z výsledků numerického modelu teplotního pole. Podle (Skotnicová, 2011) navýšení tepelného toku v místě tepelné vazby (tepelného mostu) je ovlivněno změnou vlastností materiálů a změnou geometrie konstrukce. Dále také uvedla, že v místě tepelného mostu nebo tepelné vazby dochází v důsledku zvýšeného tepelného toku vždy k poklesu vnitřní povrchové teploty, která bude v tomto místě vždy nižší než na navazující ploše konstrukcí.

(Šubrt, 2011) uvádí, že kvantifikaci tepelných mostů je již nutné provádět výpočty ve dvou, popřípadě ve troj rozměrném výpočtovém modelu. Nejpřesnější výpočty by vznikaly tak, že by se celý objekt namodeloval v trojrozměrném systému a následně by se kvantifikovaly tepelné toky. Dále také uvedl, že modelovat celý objekt je nereálné z důvodu náročnosti na výpočet a tak se objekt modeluje jako soustava rovných ploch.

Pro zpřesnění výpočtů, a pro zjištění, jak se stavba skutečně teplotně chová, je nutné věnovat se vedení tepla v neustáleném teplotním stavu. (Šubrt, 2011)

Na základě těchto tvrzení považuji numerické výpočty za přesnější než analytické a numerický výpočet nestacionárního děje v nelineárních modelech, tedy materiálové vlastnosti jsou závislé na teplotě za vůbec nejpřesnější metodu výpočtu teplotního pole.

7 Závěr

V diplomové práci jsem navrhl obvodový plášť dřevostavby s využitím materiálů vhodných pro difúzně otevřenou konstrukci. Zaměřil jsem se na dva detaily obvodového pláště. Pomocí software Comsol Multiphysics jsem vytvořil numerickou simulaci teplotního pole ve stacionárních i nestacionárních podmínkách. V software jsem uvažoval závislost materiálových vlastností na teplotě pro dřevo SM a minerální vatu. Okrajové podmínky jsem aplikoval s pomocí ČSN EN 12831 pro interiér. Exteriérové okrajové podmínky jsem převzal z dat meteorologické stanice Chrudim. Pro nestacionární podmínky byla data z meteorologické stanice aplikována v hodinových intervalech po dobu 5 dnů zimního období. V práci jsem vysvětlil metodu konečných prvků a princip vytváření 2 D modelů v software Comsol Multiphysics.

Výsledky teplotního pole jsou zobrazeny po úsečce definované pomocí dvou bodů zadané souřadnicemi, tedy spojnice vnějšího rohu a koutu, a úsečkou vedoucí přes KVH sloupek v napojení přičky na obvodovou stěnu. Výsledky hodnocení teplotního pole a teplotní setrvačnosti jsem analyzoval zvlášť pro lineární modely a zvlášť pro nelineární modely. Ve výsledkové části jsem převážně zkoumal rozdíly mezi stacionárním a nestacionárním dějem pomocí numerických modelů a grafů vyjadřujících průběh teploty v konstrukci. Příčiny a důvody projevujících se stavebně fyzikálních jevů v konstrukci jsem se snažil porovnat s literaturou.

Jelikož se ve stavební praxi většinou používá analytických výpočtů pro řešení tepelných dějů, po případě numerických výpočtů v ustálených podmínkách, tak tato práce je přínosem pro znázornění podrobnějšího chování tepelných dějů v obvodovém plášti. Vzhledem k tomu, že se výsledky analýzy tepelného pole mezi ustálenými a neustálenými teplotními podmínkami lišily, došel jsem k závěru, že popis této problematiky byl přínosný pro pochopení chování skutečného děje v obvodové stěně dřevostavby a uvědomění si významnosti numerických výpočtů v praxi. Podle mého uvážení si myslím, že numerické simulace jsou vhodné spíše pro detailnější řešení například pro zjištění tepelného toku nebo teplotních izoterem v konstrukci.

Výsledky této práce mohou sloužit jako podklad pro další zkoumání stavebních konstrukcí, k posouzení vlhkostního pole, pro které je nezbytná znalost teplotního děje v konstrukci. Navázání této práce vidím v řešení tepelně vlhkostních jevů

v nestacionárních podmínkách, kdy by se relativní vzdušná vlhkost měnila v čase a napodobila tak skutečné podmínky.

8 Summary

In this thesis, I designed the peripheral wall of wooden house using materials which are appropriate to the diffuse-open construction. I focused on two details of peripheral wall. The numerical simulation of the temperature field in stationary and non-stationary conditions was created with the aid of the software Comsol. I used dependence of material properties on the temperature for wood SM and mineral wool. Boundary conditions were applied with the aid of ČSN EN 12831 for the interior. Exterior boundary conditions were taken from data of weather station Chrudim. In case of non-stationary conditions, data were applied in hourly intervals for 5 days of winter period. In this thesis, I explained the finite element method and the principle for creating 2D models in the software Comsol Multiphysics.

The results of the temperature field are displayed on the line segment defined by two points through KVH column. The evaluation results of the temperature field and thermal inertia were analyzed separately for a linear models and non-linear models. In the final section, I primarily studied the differences between stationary and non-stationary process using numerical models and graphs representing temperature distribution in the structure. The causes of the building physical phenomena in the construction were compared with literature sources.

The results of the analysis of the thermal field between stabilized and non-stabilized temperature conditions were different. Therefore I came to the conclusion that a description of the issue was beneficial for understanding the behavior of a real process in the peripheral wall of the wooden building and the significance of the numerical calculations in practice. The practical use of numerical simulations of the thermal is more suitable for detailed solutions of problems related to building thermal technology.

9 Seznam použité literatury

9.1 Knižní zdroje

FICKER, T. 2004. Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, ISBN 80-214-2670-5.

JELÍNEK, L. 2008. Tesařské konstrukce. 2., aktualiz. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, ISBN 978-80-87093-74-0.

KOLB, J. 2008. Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 1. vyd. Praha: Grada, ISBN 978-80-247-2275-7

ŘEHÁNEK, J. 2002. Tepelná akumulace budov. 1. vyd. Praha: ČKAIT, ISBN 80-86364-59-3.

GABRIEL, I. a LADENER. 2013. Od staré stavby k nízkoenergetickému a pasivnímu domu: sanace budov, nové energetické normy, plánování a stavební praxe. 1. české vyd. Ostrava: HEL, ISBN 978-80-86167-30-5.

Künzel, M. 1995. "Simultaneous heat and moisture transport in building components." One- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart ISBN 3-8167-4103-7.

AWM van Schijndel, 2003. Modeling and solving building physics problems with FemLab, Faculty of Building and Architecture, Eindhoven University of Technology, Netherlands

TOTTEN, P.E., S.M. O'Brien, and M. Pazera, 2008. "The Effects of Thermal Bridging at Interface Conditions," Building Enclosure Science and Technology 1, Minneapolis, MN,

WASCHMANN, K., 1995. Reprint der Originalausgabe von 1930: Holzhausbau: Technik und Gestaltung, Birkhauser, Basel, Boston, Berlin

VAVERKA, J. 2006. Stavební tepelná technika a energetika budov. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 648 s. ISBN 80-214-2910-0.

HOFMAN, P. 2014. Analýza lehkých obvodových plášťů budov z hlediska tepelné stability v letním období [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební.

KULHÁNEK, F. 2006. Stavební fyzika II: stavební tepelná technika. Vyd. 3., přeprac. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ISBN 80-01-03408-9.

TRCALA, M. 2009. Model vázaného pohybu vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení. Diplomová práce. Brno: MZLU v Brně, 84

HORÁČEK, P. 2008. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2., přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, ISBN 978-80-7375-169-2.

SKOTNICOVÁ, I.a LABUDEK. 2011. Stavební tepelná technika I: studijní texty pro cvičení. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, ISBN 978-80-7204-767-3.

9.2 Internetové zdroje

Součinitel prostupu tepla. TZB-info [online]. [cit.2016-05-3]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/315-soucinitel-prostupu-tepla>

Součinitel teplotní vodivosti. Izolace-info [online]. [cit.2016-05-3]. Dostupné z: <http://www.isolace-info.cz/technicke-informace/fyzikalni-veliciny/?nid=9174-soucinitel-teplotni-vodivosti-fyzikalni-veliciny-u-tepelne-ochrany-budov.html#.VwZTyPmLTIU>

Součinitel prostupu tepla. Engineeringtoolbox [online]. [cit.2016-07-3]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/heat-loss-transmission-d_748.html

Materiálové vlastnosti Fermacell [online]. [cit.2016-12-3]. Dostupné z: <http://www.fermacell.cz/fermacell-vapor.php>

Materiálové vlastnosti Steico flex [online]. [cit.2016-12-3]. Dostupné z: http://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/Czech/Products/STEIC_Oflex_cz_i.pdf

Materiálové vlastnosti Steico special [online]. [cit.2016-12-3]. Dostupné z:
http://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/Czech/Products/STEICOspecial_cz_i.pdf

Materiálové vlastnosti Isover orsik [online]. [cit.2016-12-3]. Dostupné z:
<http://www.iso-ver.cz/data/files/tl-iso-ver-orsik-79-cz.pdf>

9.3 Normy

ČSN EN 12831 Tepelné soustavy v budovách - Výpočet tepelného výkonu

ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov

ČSN EN ISO 10 456 Stavební materiály a výrobky - Tepelně vlhkostní vlastnosti -
Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových
tepelných hodnot

10 Seznam příloh

10.1 Výkresová část

Číslo výkresu	Název	Měřítko	Formát
1	Půdorys 1.NP	1:50	A3
2	Detail A	1:10	A4
3	Detail B	1:10	A4

11 Seznam obrázků a tabulek

<i>Obr. 1 – Hranice teplotních oblastí v zimním období dle ČSN 73 0540.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2 – Vývojový diagram výpočtového postupu v software (Künzel, 1995).....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3 - Rohový detail obvodového pláště dřevostavby (autor)</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4 - Detail napojení příčky na obvodový plášť dřevostavby (autor)</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5 - Graf průběhu teplot vzduchu z meteorologické stanice Chrudim (2010.12.15 - 2010.12.19) (autor).....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 6 - Úsečka definující místo zkoumaného průběhu teplotního pole u detailů obvodové konstrukce (autor)</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7 - Diskretizace sítě (autor)</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 8 - Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 18 hod. (autor).....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 9 – Srovnání teplotního pole nelineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 18 hod. (autor).....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 10 - Rozložení teploty v nelineárních modelech rohových detailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail v 18 hod (autor).....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 11 - Rozložení teploty v nelineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) v 18 hod (autor).....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 27 - Rozložení teploty v lineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) ve 24 hod (autor) .</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 27 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v rohovém detailu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 6 hod. (autor).....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 28 - Srovnání teplotního pole lineárního modelu v detailu napojení příčky na obvodovou stěnu u stacionárního a nestacionárního výpočtu v 6 hod. (autor)</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 29 - Rozložení teploty v lineárních modelech rohových detailů u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail v 6 hod (autor).....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 30 - Rozložení teploty v lineárních modelech detailů napojení příčky na obvodovou stěnu u nestacionárního výpočtu (levý detail), stacionárního výpočtu (pravý detail) v 6 hod (autor)</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 1- Materiálové vlastnosti (Horáček, 2008), (Fermacell), (Steico), (Isover).....</i>	<i>34</i>