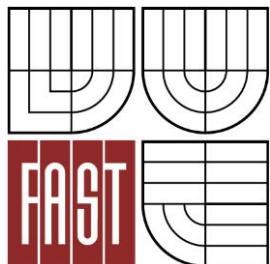




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

ANALÝZA LEHKÝCH OBVODOVÝCH PLÁŠŤŮ BUDOV
Z HLEDISKA TEPELNÉ STABILITY V LETNÍM OBDOBÍ
LIGHTWEIGHT BUILDING ENVELOPE ANALYSIS IN TERMS OF THERMAL
STABILITY IN SUMMER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR HOFMAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ŽÁK, Ph.D.

BRNO 2014

Abstrakt

Diplomová práce rozebírá různé metody porovnání konstrukcí z hlediska tepelné stability v letním období. Důležitou částí je hodnocení správnosti výsledků a výpočetních modelů těchto metod. V závěru popisuje, jaký vliv mají obvodové konstrukce na tepelnou stabilitu vnitřního prostředí v letním období, které parametry jsou klíčové pro návrh, a jak optimalizovat skladbu lehké obvodové stěny.

Klíčová slova

lehké konstrukce, tepelná stabilita, tepelná setrvačnost, fázový posun, teplotní útlum, faktor útlumu, numerické modelování

Abstract

The master's thesis analyzes different methods of comparing structures in terms of thermal stability in summer. An important part is the evaluation of the results accuracy and computational models of these methods. In conclusion it describes the influence of building envelope on the thermal stability of the internal environment in the summer, which are important design parameters and how to optimize the design of wall.

Keywords

lightweight construction, thermal stability, thermal inertia, time shift, thermal (heat) damping, decrement factor, numerical modeling

Bibliografická citace VŠKP

HOFMAN, Petr. Analýza lehkých obvodových plášťů budov z hlediska tepelné stability v letním období. Brno, 2014. 94 s., 114 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. Antonín Žák, Ph.D..

Prohlášení o původnosti VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 1. 2014

.....
podpis autora

Bc. Petr Hofman

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 17. 1. 2014

.....
podpis autora
Bc. Petr Hofman

Poděkování

Na prvním místě bych chtěl poděkovat svému školiteli panu Ing. Antonínu Žákovi za trpělivost, se kterou na mou práci dohlížel, podporu, kterou mě provázel a pomoc, s níž jsem práci dokončil. Také bych chtěl poděkovat panu docentovi Ondřeji Šikulovi za jeho konzultaci a poskytnutí programu CalA pro výpočty a panu Janu Staškovi za konzultaci k programu Design Builder. Nechtěl bych ani zapomenou na další kolegy a učitele, kteří přispěli pomocí, radou nebo příkladem k vytvoření mé práce.

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Cíle diplomové práce	3
3.	Používané metody výzkumu	4
3.1	Literární rešerše	4
3.2	Analýza fyzikálních dějů	4
3.3	Analýza konstrukcí vycházející ze základních fyzikálních vztahů	4
3.4	Podrobné dynamické simulace	4
3.5	Experimentální měření v in-situ	5
3.6	Syntéza dosažených výsledků	5
3.7	Analýza chyb použitých metod a získaných výsledků	5
4.	Základní fyzikální teorie k řešené problematice	7
4.1	Způsoby přenosu tepla ve stavebních konstrukcích	7
4.1.1	Vedení tepla ve stavebních konstrukcích	7
4.1.2	Šíření tepla prouděním	11
4.1.3	Šíření tepla zářením	11
4.2	Tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů	12
4.3	Tepelně technické vlastnosti konstrukcí	14
4.4	Formulace okrajových podmínek	16
4.4.1	Podnebí České republiky	16
4.4.2	Klimatické podmínky ve stavební tepelné technice	17
4.4.3	Návrhové parametry venkovního vzduchu	17
4.4.4	Návrhové parametry vnitřního vzduchu	20
4.5	Použitý software	20
4.5.1	CalA	21
4.5.2	Design Builder	23
4.5.3	Teplo 2010	25

4.5.4	Vlastní výpočtové nástroje	26
5.	Teoretické hodnocení tepelných charakteristik konstrukcí a staveb	27
5.1	Metody založené na tepelných charakteristikách materiálů	27
5.1.1	Součinitel teplotní vodivosti materiálů	27
5.1.2	Měrná akumulovaná energie	29
5.2	Analytické metody stanovení dynamických tepelných charakteristik konstrukcí	32
5.2.1	Relaxační doba	32
5.2.2	Potenciál vnitřních vrstev konstrukce akumulovat teplo	36
5.2.3	Fázový posun, faktor útlumu a teplotní útlum konstrukce	40
5.3	Numerické modelování tepelných charakteristik konstrukcí	50
5.3.1	Doba chladnutí	50
5.3.2	Fázový posun a teplotní útlum konstrukce	53
5.4	Numerické modelování teplotního chování zabudovaných konstrukcí	59
5.5	Numerické modelování teplotního chování reálné stavby	62
5.5.1	Způsob zadání	63
5.5.2	Výsledky simulace	65
5.5.3	Simulace dalších variant	66
5.5.4	Hodnocení konstrukcí	69
5.6	Závěrečné hodnocení konstrukcí	71
6.	Experimentální měření	74
6.1	Cíl měření	74
6.2	Výběr objektu pro experimentální měření	74
6.2.1	Kritéria pro výběr objektu	74
6.2.2	Popis vybraného objektu	75
6.3	Měřicí zařízení	75
6.4	Výsledky experimentálního měření	76
7.	Validace teoretických modelů experimentem	77

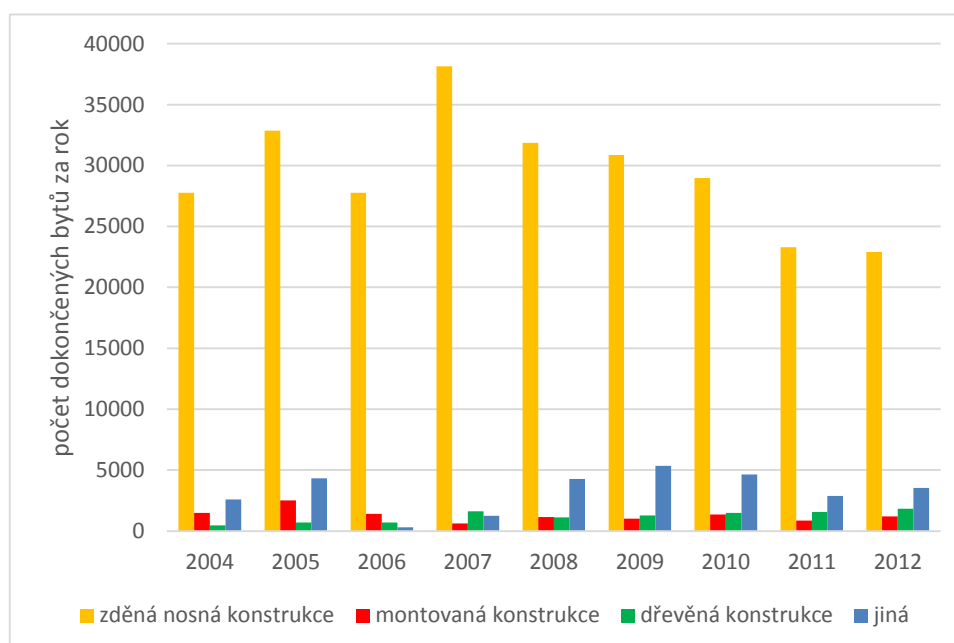
8.	Závěry pro technickou praxi.....	78
8.1	Metody pro hodnocení tepelné stability konstrukcí a budov.....	78
8.2	Hodnocení konstrukcí z hlediska tepelné stability	80
8.3	Hodnocení koncepce budov z hlediska tepelné stability	81
8.4	Návrh řešení experimentální budovy.....	81
8.4.1	Parametry ovlivňující vnitřní teplotu	83
9.	Další možnosti výzkumu	88
10.	Zhodnocení vytýčených cílů.....	89
11.	Literatura.....	91
11.1	Seznam použitých zdrojů.....	91
11.2	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	93
11.3	Seznam indexů.....	94
11.4	Seznam dalších symbolů.....	94
	Přílohy.....	95
A	Seznam použitých materiálů.....	95
B	Seznam konstrukcí.....	96
C	Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období a intenzita globálního slunečního záření v denním průběhu	100
D	Popis používaných měřících zařízení	101
E	Fotografie měřené budovy	104
F	Výkresy budovy experimentálního měření	
G	Skladby konstrukcí měřené budovy.....	109
H	Výsledky měření budovy ve Znojmě.....	111
I	Výkresy experimentální budovy	
J	Potvrzení o zapůjčení klimatických dat od Českého hydrometeorologického ústavu	

1. Úvod

Energetická koncepce budovy spočívá v optimálním návrhu tepelně technických vlastností konstrukcí obálky budovy. Nejdůležitějším parametrem, který přímo udává míru ztrát prostupem, je součinitel prostupu tepla U všech konstrukcí obálky. Požadavky na tento parametr jsou uvedeny v normě [1] a jsou uzákoněny. V naší zemi je však často opomíjeno posuzování konstrukcí z hlediska tepelné stability, přestože jsou požadavky také definovány v normě [1]. Vedle toho je jasné, že správným návrhem konstrukcí obálky budovy z hlediska tepelné setrvačnosti můžeme dosáhnout energetických úspor a komfortnějšího teplotně stabilního vnitřního prostředí.

Současný trend navrhování a realizování obvodových konstrukcí vede k stále většímu zateplování. Používání jednovrstvých konstrukcí už často není nejvýhodnější řešení, proto se v čím dál větší míře provádí vícevrstvé „sendvičové“ konstrukce. Zděné konstrukce se zateplením mají velkou tloušťku a pracnost, což v tomto směru nahrává stavbám s lehkým obvodovým pláštěm.

Lehké montované stavby, a především pak dřevostavby, mají zatím malý podíl v bytové výstavbě. Dle analýzy bytové výstavby v roce 2012 provedené Českým statistickým úřadem



Graf 1 - Dokončené byty dle nosné konstrukce z webu [2]

byl podíl dřevostaveb 6,1 % ze všech nově dokončených bytů a 10 % ze všech nově dokončených rodinných domů dle webu [2].

Přesto se jejich podíl začíná postupně zvyšovat. Dřevostavby mají v budoucnosti velký potenciál především v tom, že jde o přírodní materiál, který je výrazně přátelštější k životnímu prostředí.

Vedle řady výhod mají zase oproti zděným stavbám nevýhody, mezi které patří menší tepelná setrvačnost konstrukcí.

Tepelná stabilita v letním období je hlavním tématem této diplomové práce.

2. Cíle diplomové práce

Hlavním cílem této práce je zjistit, jaký vliv mají obvodové konstrukce na tepelnou stabilitu vnitřního prostředí v letním období, které parametry jsou klíčové a jak optimalizovat skladbu lehké obvodové stěny. Konkrétní cíle bych chtěl definovat takto:

1. teoretické popsání problémů;
2. výběr správné metodiky pro hodnocení konstrukcí;
3. vyhodnocení konstrukcí;
4. aplikace poznatků ve stavebních konstrukcích;
5. optimalizace konstrukce pro stavbu experimentální budovy.

3. Používané metody výzkumu

Pro dosažení výše uvedených cílů práce byly využívány běžné metody výzkumu:

1. literární rešerše;
2. analýza fyzikálních dějů;
3. analýza konstrukcí vycházející ze základních fyzikálních vztahů;
4. podrobné dynamické simulace;
5. experimentální měření v in-situ;
6. syntéza dosažených výsledků;
7. analýza chyb použitých metod a získaných výsledků.

3.1 Literární rešerše

Na začátku práce byla provedena literární rešerše dostupné literatury a informací, která pomohla k bližšímu porozumění zkoumané problematice. Tato práce navazuje na dostupné poznatky a rozšiřuje o vlastní poznatky.

3.2 Analýza fyzikálních dějů

Pro popsání zkoumané problematice byla provedena analýza fyzikálních dějů. Ty, které jsou důležité pro pochopení řešené problematice, jsou uvedeny v kapitole 4. Základní fyzikální teorie k řešené problematice.

3.3 Analýza konstrukcí vycházející ze základních fyzikálních vztahů

Pro porozumění souvislostí bylo nutné začít od zjednodušených fyzikálních modelů. Bylo nutné idealizovat okrajové podmínky a eliminovat vlivy slunečního záření a okolního prostředí, aby bylo možné zkoumat pouze požadované parametry.

3.4 Podrobné dynamické simulace

K získání přesnějších výsledků a zjištění reálnějšího vlivu jednotlivých skladeb konstrukcí na teplotu vnitřního prostředí, bylo nutné provést komplexní dynamické simulace jednak s virtuálními okrajovými podmínkami, tak s uvažováním reálných okrajových podmínek a provozu objektu získaných experimentálním měřením.

3.5 Experimentální měření v in-situ

Aby bylo možné porovnávat výsledky a ověřit správnost dynamického simulování, bylo provedeno experimentální měření v in-situ. Pro měření byly použity měřicí přístroje Atelieru DEK a klimatická data globálního a rozptýleného slunečního záření byla zapůjčena od Českého hydrometeorologického ústavu z meteorologické stanice Kuchařovice.

3.6 Syntéza dosažených výsledků

Syntéza dosažených výsledků spojuje dohromady výsledky teoretických výpočtů a experimentálního výzkumu. Poskytuje přehled a formuluje poznatky pro praxi.

3.7 Analýza chyb použitých metod a získaných výsledků

Zdroje chyb energetických výpočtů můžeme zařadit dle literatury [3] do dvou kategorií: chyby vnitřní a chyby vnější.

Mezi významné vnitřní chyby patří:

1. Zjednodušení matematického popisu přenosových mechanismů;
2. Špatné nebo nepřesné numerické řešení;
3. Chyba zdrojového kódu programu.

Mezi významné vnější chyby patří:

1. Rozdíl mezi skutečnými klimatickými podmínkami a podmínkami použitými ve výpočtu;
2. Rozdíl mezi předpokládaným a skutečným užíváním budovy;
3. Regulační zásahy řídicích systémů a obsluhy;
4. Chyby způsobené uživatelem výpočetního programu;
5. Rozdíl mezi skutečnými a předpokládanými fyzikálními parametry.

Pro zjištění chyb výpočtu je možné použít některou ze čtyř metod pro kontrolu správnosti výsledků.

Kontrola zdrojového kódu

V této diplomové práci byla provedena kontrola zdrojového kódu u výpočtů prováděných v programu Excel. Tato metoda byla tedy použita pro kontrolu výpočtů relaxační doby a dynamických charakteristik podle metody normy ČSN EN ISO 13786.

Analytická verifikace

V této diplomové práci byla využita metoda analytické verifikace pro ověření správnosti výpočtů dynamických tepelných charakteristik simulací v programech CalA a Design Builder pomocí analytického výpočtu podle metodiky normy ČSN EN ISO 13786.

Empirická verifikace

Jednou z částí této diplomové práce bylo experimentální měření, které umožnilo provést empirickou verifikaci výsledků reálného měření s výsledky simulace v programu Design Builder.

Porovnání výpočetních nástrojů

Správnost výsledků komplexního výpočetního programu Design Builder byla nejprve ověřena na jednoduchých modelech, které bylo možné vypočítat v jiném software. Porovnávány byly parametry teplotního útlumu a fázového posunu konstrukcí, spočítané v software Design Builder, CalA a také s programem Teplo 2010, který počítá dle metodiky normy ČSN EN ISO 13786.

4. Základní fyzikální teorie k řešené problematice

Základní fyzikální teorie v této kapitole jsou převzaty z literatury [4], [3] a [5].

4.1 Způsoby přenosu tepla ve stavebních konstrukcích

Tepelné zisky a tepelné ztráty v budovách jsou způsobeny přenosem tepla. Jsou tři známé způsoby přenosu tepla:

1. Vedení tepla (kondukce);
2. Proudění (konvekce);
3. Záření (radiace).

4.1.1 Vedení tepla ve stavebních konstrukcích

Vedení je přenos energie mezi látkami o různých teplotách. Částice pevných látek neustále a neuspořádaně kmitají kolem své polohy rychlostí v závislosti na své teplotě. Při svém kmitání dochází k častým srážkám se sousedními částicemi, se kterými si předávají část své kinetické energie. Tímto způsobem si částice předávají energii a vzniká vedení tepla. Směr vedení tepla je určen druhou větou termodynamiky, která říká, že směr tepelného toku je vždy z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Koncepce tepelné vodivosti byla objevena na začátku devatenáctého století s pracemi J. B. Biota (1804) a Josepha Fouriera (1822). To umožnilo kvantitativní určení tepelného toku materiálu.

První Fourierův zákon

Matematický popis jednorozměrného stacionárního vedení tepla byl definován Jeanem Baptistem Josephem Fourierem, který v roce 1807 v Grenoblu poprvé formuloval zákon vedení tepla, později po něm pojmenovaný.

$$q = -\lambda \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 Δt teplotní rozdíl desek [K]
 Δx vzdálenost [m]

Zákon definuje lineární vztah hustoty tepelného toku q a gradientu teploty¹ t ve směru x . Konstantou úměrnosti tohoto vztahu je součinitel tepelné vodivosti λ . Fourierův zákon je založen čistě na empirickém pozorování a není odvozen z jiných fyzikálních principů. V technické praxi je často používán při výpočtech tepelné bilance a patří tedy k základním vztahům používaných v tepelné technice.

Druhý Fourierův zákon

V roce 1822 představil Fourier v Paříži rovnici kontinuity nestacionárního tepelného toku:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

kde	t	je	teplota [K]
	τ		doba [s]
	λ		součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	ρ		objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
	c		měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	x		vzdálenost [m]

vyjadřující tepelnou bilanci elementárního objemu, předpokládající, že nárůst tepelného toku do elementu, který z něj není odveden, vede k nárůstu akumulovaného tepla a tedy i teploty elementu. Výše popsané vztahy je možné aplikovat pro řešení jednorozměrného nestacionárního vedení tepla v pevných látkách a stagnantních tekutinách. Původní vztah byl značně idealizovaný, proto v průběhu uplynulých dvou staletí byl přístup doplněn o zbývající dva geometrické rozměry, vnitřní zdroj tepla, transformován do jiných souřadných systémů, řešen pro teplotně závislé tepelné konstanty. Můžeme ho tedy vyjádřit i v doplněném tvaru:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) + S \quad (3)$$

kde	t	je	teplota [K]
	τ		čas [s]
	$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$		součinitel tepelné vodivosti v různých směrech [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	ρ		objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

¹ Teplotní gradient vyjadřuje velikost a směr změny teploty.

c	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
S	vnitřní zdroj tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]

Doplněná rovnice už blíže popisuje realitu, ale přesto nezohledňuje všechny možné problémy a ukazuje tak komplexnosti problémů spojených s nestacionárním vedením tepla.

Tepelný tok

Tepelný tok Φ je definován jako množství tepla přenesené látkou za jednotku času, je tedy definován vztahem:

$$\Phi = \frac{Q}{\tau} = q \cdot A = \lambda \cdot A \frac{\Delta t}{\Delta x}; \quad \text{W} \quad (4)$$

kde	Q	je	teplo [J]
	q		hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
	τ		doba [s]
	λ		součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	A		plocha [m^2]
	Δt		rozdíl teplot [K]
	Δx		vzdálenost [m]

Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla U udává celkovou výměnu tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími vzájemně oddělenými stavební konstrukcí o tepelném odporu R s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, které jsou součástí konstrukce. Je definován vztahem:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_e + R + R_i}; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5)$$

kde	R_T	je	odpor konstrukce při prostupu tepla (z prostředí do prostředí) [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
	R_e		odpor konstrukce při přestupu tepla na straně exteriéru [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
	R		odpor konstrukce při prostupu tepla konstrukcí [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
	R_i		odpor konstrukce při přestupu tepla na straně interiéru [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]

Měrná tepelná ztráta

Ve stavební praxi se při energetických výpočtech častěji pracuje s hodnotou měrné tepelné ztráty prostupem H_T , která se vypočítá podle vztahu:

$$H_T = U \cdot A \cdot b; \quad \text{W} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6)$$

kde U je součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
 A plocha [m^2]
 b činitel teplotní redukce [-]

Pokud chceme vypočítat tepelnou ztrátu budovy pro návrh zdroje vytápění, stačí měrnou tepelnou ztrátu vynásobit rozdílem venkovní a vnitřní návrhové teploty.

Newtonův zákon ochlazování

Experimentem bylo dokázáno, že na rozhraní mezi pevnou látkou a okolním fluidním prostředím² není teplotní profil $t(x)$ lineární. Je tedy zřejmé, že se na přenosu tepla z pevné látky do fluidního prostředí podílí i mechanismy proudění a záření. Isaac Newton tedy zavedl lineární aproximaci, díky které se výpočty teplotního profilu na rozhraní značně zjednodušily. Hustota tepelného toku na rozhraní může být vyjádřena vztahem:

$$q = \lambda_f \frac{\Delta t}{d} = h \cdot \Delta t; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (7)$$

kde q je hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
 λ_f součinitel tepelné vodivosti se započtením vlivu konvekce [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 Δt rozdíl mezi teplotou fluida (vzduchu) a teplotou povrchu [K]
 d tloušťka přechodové vrstvy [m]
 h součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

Výše uvedená rovnice je známá pod názvem „Newtonův ochlazovací zákon“. Provedená linearizace nepředstavuje klasický mechanismus vedení tepla, jelikož zahrnuje v součiniteli prostupu tepla i přenos tepla konvekcí. Pro zahrnutí i záření se určí součinitel prostupu tepla h_{tot} vztahem:

² Fluidní prostředí je kapalné nebo plynné prostředí.

$$h_{tot} = h + h_r; \quad \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (8)$$

kde h je součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
 h_r součinitel přestupu tepla vlivem radiace [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

Součinitel prostupu tepla U konstrukce vypočítáme s uvažováním přestupu tepla na vnějším a vnitřním povrchu ze vztahu:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum_{j=1}^n \left(\frac{d_j}{\lambda_j}\right) + \frac{1}{h_i}}; \quad \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (9)$$

kde h_e je součinitel přestupu tepla na straně exteriéru [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
 h_i součinitel přestupu tepla na straně interiéru [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
 d_j tloušťka j-té vrstvy [m]
 λ_j součinitel tepelné vodivosti j-té vrstvy [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]

4.1.2 Šíření tepla prouděním

Přenos tepla mezi pevnou látkou a fluidem je založen na pohybu částic a jejich mísení. Ve stavební praxi se nejčastěji setkáváme s případem konvekce tepla u vzduchových dutin a povrchů konstrukce. Komplikovanost výpočtu tkví v problematickém určení součinitele prostupu tepla h . Ten není konstantou a dramaticky se mění v závislosti na druhu proudění (laminární, turbulentní), na rychlosti proudění, mechanickém stavu povrchu (drsňý, hladký), teplotě fluida atd.

4.1.3 Šíření tepla zářením

Přenos tepla zářením je třetí způsob přenosu tepla. Přírodným zdrojem zářivé energie je jakákoliv část látky s teplotou vyšší než absolutní nula. Takové těleso emituje všechny vlnové délky záření, ale s rozdílnými intenzitami.

Energie, která dopadne na těleso, se rozdělí na tři složky. Záleží vždy na vlastnosti látky a jejího povrchu v jakém poměru se tyto složky rozdělí.

1. odražená složka energie (koeficient odrazivosti R)
2. pohlcená složka energie (koeficient pohltivosti A)

3. propuštěná složka energie (koeficient propustnosti D)

Pokud těleso odrazí veškerou dopadenou energii, má koeficient odrazivosti $R = 1$ a nazýváme jej absolutně bílým tělesem. Pokud těleso pohltí veškerou dopadenou energii má, koeficient pohltivosti $a = 1$ a nazýváme jej absolutně černým tělesem. Pokud veškerá energie volně projde tělesem má, koeficient propustnosti $D = 1$ a nazýváme jej diatermním tělesem. V přírodě prakticky nenajdeme žádné těleso dokonale černé ani bílé, obecné těleso nazýváme šedé.

Emisivita povrchu

Často je zaváděn poměr mezi intenzitami vyzařování černého a šedého tělesa. Tento poměr se označuje jako emisivita povrchu ε

$$\varepsilon = \frac{H}{H_b} = A < 1 \quad (10)$$

kde H je integrální zářivá energie
 H_b integrální zářivá energie černého tělesa

Hodnota emisivity absolutně černého tělesa je 1, absolutně černé těleso je tedy jednak ideálním pohlcovačem tepelného záření, tak i ideálním zdrojem záření. Šedé tělesa jsou méně účinné zářiče.

4.2 Tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů**Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost ρ je hmotnost materiálu v definovaném stavu, např. vlhkosti, stlačení, o objemu 1 m^3 , je dle normy [5] definována vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V}; \quad \text{kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad (11)$$

kde m je hmotnost materiálu v definovaném stavu vlhkosti, stlačení apod. [kg]
 V objem materiálu [m^3]

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita c je množství tepelné energie, kterou je třeba dodat při stálém tlaku, vzorku materiálu o definované vlhkosti a hmotnosti 1 kg, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K; dle normy [5] je definována vztahem:

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta t}; \quad \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12)$$

kde E je tepelná energie (množství přivedeného tepla) [J]
 m hmotnost materiálu [kg]
 Δt přírůstek teploty [K]

Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ je materiálovou konstantou. Číselně je roven teplu, které projde materiálem za jednotku času jednotku plochy při jednotkovém teplotním gradientu. Dle normy [5] Je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad}t}; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13)$$

kde E je tepelná energie (množství přivedeného tepla) [J]
 m hmotnost materiálu [kg]
 Δt přírůstek teploty [K]

Látky dělíme dle součinitele tepelné vodivosti na dobré vodiče a izolanty. Jeho hodnoty se mohou lišit i o několik řádů, jak ukazuje tabulka seznamu použitých materiálů v příloze této diplomové práce. Nejlepšími vodiči jsou kovy, naopak nejlepšími izolanty jsou plyny. Proto jsou dobrými izolačními materiály látky, které obsahují velké množství uzavřených dutinek vyplněných vzduchem nebo jinými plyny. Hodnota součinitel tepelné vodivosti závisí na vlhkosti a teplotě materiálu. Tepelná vodivost klesá se zvyšující se vlhkostí nebo teplotou.

Součinitel teplotní vodivosti

Součinitel teplotní vodivosti a je schopnost stejnorodého materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla, dle normy [5] je dán vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}; \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14)$$

kde	λ	je	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	c		měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	ρ		objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Součinitel tepelné vodivosti charakterizuje rychlost změny teploty v určitém místě způsobené změnou povrchové teploty. Čím je tedy hodnota menší, tím menší je rychlost změny teploty a materiál vykazuje větší stabilitu.

Množství tepla

Tepelnou energii lze uchovávat v kapalných, plynných i pevných látkách. Množství tepla Q přijatého látkou je dle literatury [6] přímo úměrné jeho hmotnosti m , měrné objemové kapacitě c a rozdílu počáteční a koncové teploty Δt , lze jej tedy definovat vztahem:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t; \quad [J] \quad (15)$$

kde	m	je	hmotnost [kg]
	c		měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	Δt		rozdíl počáteční a koncové teploty [K]

4.3 Tepelně technické vlastnosti konstrukcí

Doba chladnutí

Doba chladnutí je čas, za který dojde při skokovému snížení teploty prostředí k ustálení teploty v celé konstrukci. Nejčastěji se počítá na symetrické homogenní konstrukci, kdy vnitřní povrch konstrukce je uprostřed symetrické konstrukce a teplota vzduchu na obou stranách konstrukce je skokově ochlazená. Je možné ji vypočítat analytickou metodou vedení tepla v 1D dle vztahu z literatury [7]:

$$\frac{T_{s\tau} - T_0}{T_a - T_0} = \frac{\Theta_{s\tau}}{\Theta_a} = \sum \frac{2 \sin(\delta_i)}{\delta_i + \sin(\delta_i) \cdot \cos(\delta_i)} \cdot \cos\left(\delta_i \cdot \frac{x}{0,5s}\right) \cdot e^{-\delta_i^2 \cdot F_0} \quad (16)$$

kde	$T_{s\tau}$	je	teplota v obecné poloze s a čase τ [K]
	T_0		teplota na počátku chladnutí [K]
	T_a		teplota okolního prostředí [K]
	τ		posuzovaná doba chladnutí [s]

δ	kořeny transcendentní rovnice $\operatorname{tg}(\delta) = \frac{B_i}{\delta}$
F_o	Fourierovo číslo $F_o = \frac{\alpha \cdot \tau}{\left(\frac{s}{2}\right)^2}$
B_i	Biotovo číslo $B_i = \frac{\alpha \cdot \frac{s}{2}}{\lambda}$

Tepelná akumulace

Tepelná akumulace popisuje ukládání nebo uvolňování energie z konstrukcí, pokud je rozdílná teplota vzduchu a konstrukce.

Tepelná setrvačnost

Tepelná setrvačnost popisuje, jak rychle reaguje konstrukce na změnu teploty ve vnějším tak i ve vnitřním prostředí.

Teplotní stabilita

Teplotní stabilita popisuje stálost teploty vnitřního prostředí při časově proměnných okrajových podmínkách.

Fázový posun

Fázový posun neboli fázové posunutí teplotních kmitů Δt_f říká, s jakým zpožděním se projeví maximální teplota venkovního vzduchu na vnitřním povrchu konstrukce. Za okrajové podmínky se dle normy [8] uvažuje harmonicky proměnná teplota vzduchu v exteriéru dle funkce sinus a konstantní teplota vzduchu v interiéru. Výpočet je popsán v kapitole 5.2.3.

Faktor útlumu při prostupu tepla (decrement factor)

Faktor útlumu popisuje tlumení teplotní vlny, které vzniká při průchodu z exteriéru do interiéru. Okrajové podmínky jsou uvažovány stejné jako pro výpočet fázového posunu. Pro tenké lehké konstrukce bez tepelné setrvačnosti se faktor útlumu f blíží hodnotě 1 [9]. Výpočet je popsán v kapitole 5.2.3.

teplotní útlum (thermal heat damping)

v^* [-], schopnost konstrukce tlumit harmonické změny teploty venkovního vzduchu v letním období na vnitřním povrchu konstrukce, je definován vztahem v normě [5]:

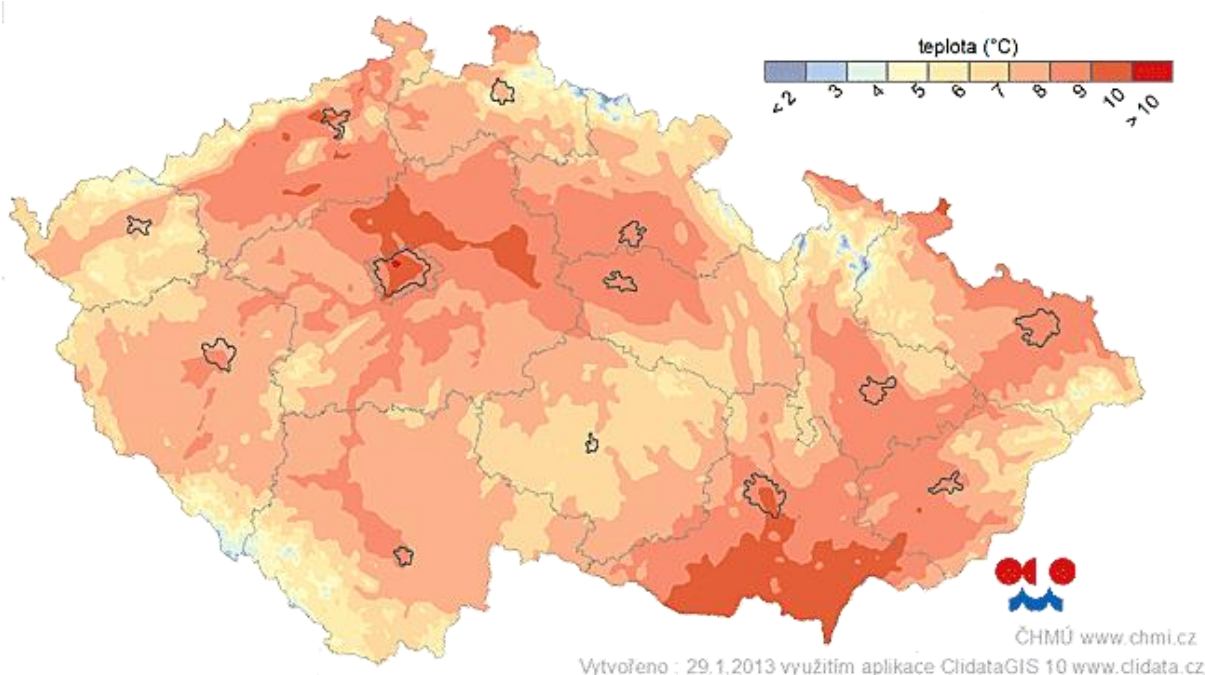
$$v^* = \frac{A_v^*}{A_{si}} \quad (17)$$

kde A_v^* je výsledná teplotní amplituda venkovního prostředí v letním období [K]
 A_{si} teplotní amplituda na vnitřním povrchu konstrukce [K]

4.4 Formulace okrajových podmínek

4.4.1 Podnebí České republiky

Podle internetového zdroje [10] je podnebí na celém území České republiky mírné, přechodné mezi oceánským a kontinentálním s typickým střídáním 4 ročních období (stejně jako v celé střední Evropě). Pro podnebí České republiky je charakteristické západní proudění s převahou západních větrů, časté střídání jednotlivých frontálních systémů (ročně přes naše



Obrázek 1 – Mapa průměrné roční teploty vzduchu mezi roky 1961 a 2000 [10]

území přejde v průměru kolem 140 front) a poměrně hojné srážky. Dochází k mísení přímořského a kontinentálního podnebí. Přímořský vliv se projevuje hlavně v Čechách, na Moravě a ve Slezsku přibývá kontinentálních podnebních vlivů. Velký vliv na podnebí má nadmořská výška a rozmanitý reliéf.

Průměrná roční teplota se v Česku pohybuje mezi 5,5 °C až 9 °C. Nejchladnějším měsícem roku je leden, kdy i v nížinách klesne průměrná měsíční teplota pod 0 °C. Nejteplejší měsíc roku je červenec v průměru o 20 °C teplejší než leden.

4.4.2 Klimatické podmínky ve stavební tepelné technice

Klimatické podmínky pro výpočty ve stavební tepelné technice uvažují pro návrh budov v České republice dvě období. V zimním období se ověřují konstrukce dle normy [1] z hlediska prostupu tepla, teplotního faktoru vnitřního povrchu, kondenzace vodní páry v konstrukci a další. V letním období se neposuzují jednotlivé konstrukce, ale hodnotí nejvyšší teplota vzduchu v kritické místnosti.

4.4.3 Návrhové parametry venkovního vzduchu

Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období

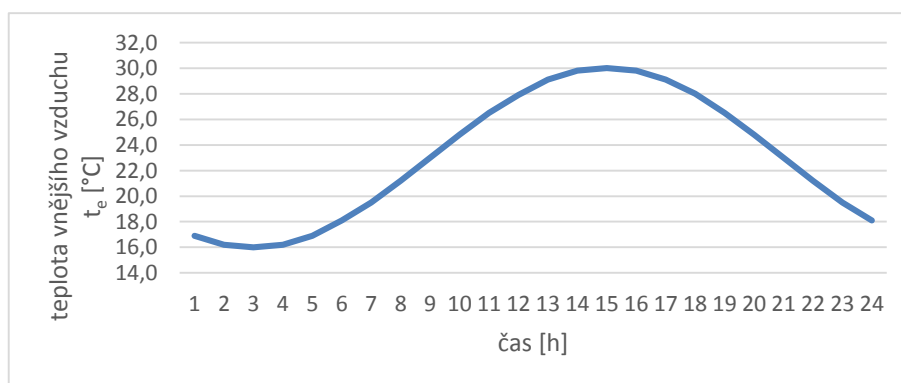
Návrhová teplota venkovního vzduchu t_{em}^* se stanoví podle místa budovy a je dle normy [11] rovna:

$t_{em}^* = 20,5^{\circ}\text{C}$ v letní teplotní oblasti A;

$t_{em}^* = 18,2^{\circ}\text{C}$ v letní teplotní oblasti B.

Teplotní oblast B se nachází na území Moravskoslezského kraje a je zeměpisně vymezena státními hranicemi mezi obcemi Horní Lideč a Třinec a dále spojnicemi mezi městy Třinec, Valašské Meziříčí a Horní Lideč. Teplotní oblast a je ostatní území České republiky.

Denní průběh návrhové teploty vnějšího vzduchu byl převzat z normy [11]. Hodnoty teploty vnějšího vzduchu v hodinovém kroku jsou v příloze v tabulce C.1.



Graf 2 průběh hodnoty návrhové teploty vnějšího vzduchu

Návrhová střední intenzita globálního slunečního záření v letním období

Návrhová střední intenzita globálního slunečního záření I a s tím související amplituda intenzity globálního slunečního záření A_I a doba jejího maxima v celodenním průběhu na svislé a vodorovné rovině jsou uvedeny v příloze v tabulce C.1.

Součinitel při přestupu tepla na vnějším povrchu konstrukce

Součinitel při přestupu tepla na vnějším povrchu konstrukce byl uvažován pro letní období $h_e = 13,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Hodnota byla převzata z normy [11].

Sluneční teplota

Teplota vzduchu není zdaleka jediný klimatický činitel, který působí teplotně na vnější povrch. Mezi nejdůležitější činitele tedy patří dle článku [12]:

1. denní kolísání teploty vnějšího vzduchu t_e [$^{\circ}\text{C}$];
2. denní průběh intenzity slunečního záření I [W/m^2];
3. proudění vzduchu;
4. relativní vlhkost vzduchu.

Jejich souhrnné působení je poměrně složité. Tepelný tok pohlcovaný vnějším povrchem konstrukce vlivem dopadajícího slunečního záření je:

$$q_s = \varepsilon \cdot I; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (18)$$

kde ε je pohltivost slunečního záření vnějšího povrchu [-]
 I intenzita globálního slunečního záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Pohlčená energie se šíří neprůsvitnou konstrukcí k jejímu vnitřnímu povrchu podle Fourierova zákona. Pohltivost slunečního záření závisí především na barvě a charakteru povrchu. Množství tepla, které je předáno vnějšímu povrchu, je výsledkem působení tepelných toků šířených krátkovlnným slunečním zářením, konvekcí, dlouhovlnným zářením povrchu a sáláním oblohy. Platí rovnice rovnováhy tepelných toků:

$$q_{es} = h_e(t_e - t_{ep}) + \varepsilon \cdot I + \Phi; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (19)$$

kde q_{es} je hustota tepelného toku předaná z nebo do vnějšího prostředí přiléhajícího ke konstrukci [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
 t_e teplota vnějšího vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

t_{ep}	teplota vnějšího povrchu konstrukce [°C]
Φ	tepelný tok vlivem sálání oblohy a povrchu konstrukce [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
h_e	součinitel při přestupu tepla na vnější straně [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

Vztah můžeme zjednodušit zavedením sluneční teploty vzduchu t_{es} . Definiuje se jako fiktivní teplota vzduchu při daném povrchu konstrukce (s uvažováním slunečního záření, sálání konstrukce a oblohy a konvekční výměny tepla), se kterou si bude povrch konstrukce vyměňovat stejné množství tepla:

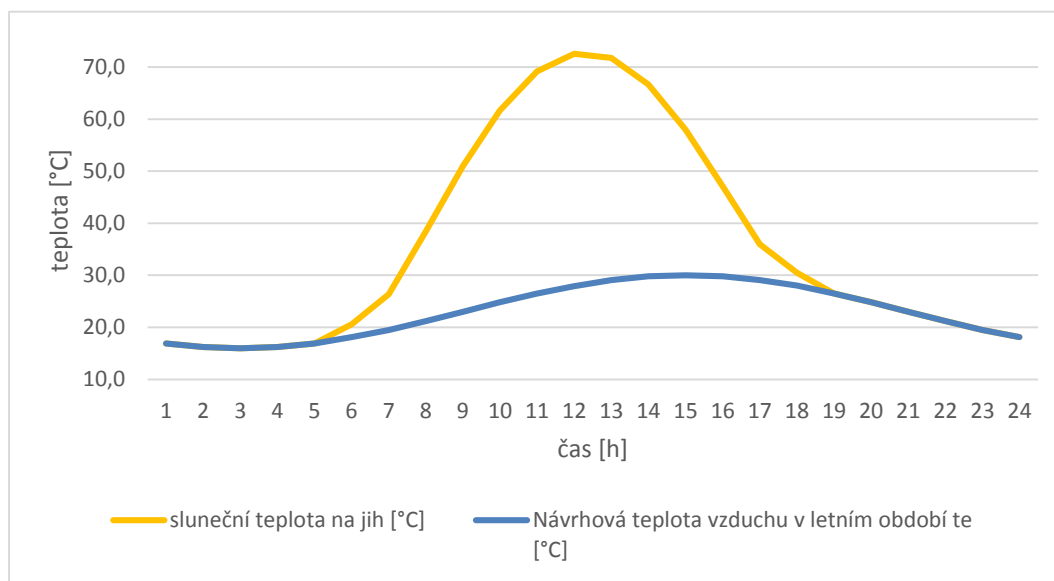
$$h_e(t_{es} - t_{ep}) = h_e(t_e - t_{ep}) + \varepsilon \cdot I + \Phi; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (20)$$

Vyjádřením t_{es} z rovnice získáme výraz:

$$t_{es} = t_e + \frac{\varepsilon \cdot I}{h_e} - \frac{\Phi}{h_e}; \quad ^\circ\text{C} \quad (21)$$

Sluneční teplota vzduchu tedy vyjadřuje integrální vliv teplot vnějšího vzduchu, slunečního záření, proudění a sálání na vnějším povrchu konstrukce. Výraz $\varepsilon \cdot I / h_e$ se nazývá ekvivalentní teplota. Vyskytuje se v něm intenzita globálního slunečního záření, takže závisí na orientaci k světovým stranám. Pro svislé povrchy se hodnota výrazu Φ / h_e zanedbává, nebere se do úvahy vliv dlouhovlnného záření atmosféry.

Pro simulace v této diplomové práci byl vypočítán průběh sluneční teploty pro jižní stranu.



Graf 3 - Průběh sluneční teploty pro jižní stěnu a návrhové teploty vzduchu v letním období (pro emisivitu fasády $\varepsilon = 0,9$)

Návrhová teplota vnějšího vzduchu t_e a intenzita globálního slunečního záření pro letní období I je v příloze v tabulce C.1.

4.4.4 Návrhové parametry vnitřního vzduchu

Nejvyšší teplota vzduchu v letním období

Kritická místnost musí vykazovat nejvyšší denní teplotu v místnosti v letním období $t_{ai,max}$

$$t_{ai,max} \leq t_{ai,max,N} \quad (22)$$

kde $t_{ai,max,N}$ je požadovaná hodnota nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období [°C]

Nejvyšší denní teplota vzduchu v místnosti v letním období se obvykle ověřuje výpočtovými postupy podle ČSN EN ISO 13791 a ČSN EN ISO 13792³ při použití okrajových podmínek podle normy [11]. Požadovaná hodnota nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období $t_{ai,max,N}$ je dle normy [1] pro nevýrobní budovy 27°C.

Součinitel při přestupu tepla na vnitřním povrchu konstrukce

Součinitel při přestupu tepla na vnitřním povrchu konstrukce byl uvažován pro letní období $h_i = 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Hodnota byla převzata z normy [11].

4.5 Použitý software

Pro výpočty tepelných charakteristik a pro dynamické simulace byly v této diplomové práci používány čtyři výpočetní programy:

1. CalA – výpočet diferenciálních rovnic metodou kontrolních objemů;
2. Design Builder – bilanční energetický výpočet;
3. Teplo 2010 – výpočet dle metodiky norem [8] a [13];
4. Vlastní výpočtové nástroje – naprogramované v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

³ Program Simulace 2011 z rodiny programu Svoboda software počítá podle metodiky normy ČSN EN ISO 13792 a je možné jej použít pro posouzení nejvyšší denní teploty v místnosti v letním období $t_{ai,max}$.

4.5.1 CalA

Software CalA (Calculation Area) verze 3 je založen na numerickém řešení diferenciální rovnice (23) popisující transport obecné veličiny W s koeficienty c metodou kontrolních objemů. Využití softwaru je typicky ve stavebnictví a to při výzkumu, nebo v technické praxi při řešení úloh a problémů 2D vedení tepla dle rovnice (24). Software lze také využít k simulaci dalších jevů jako je transport vlhkosti ve stavebních materiálech, řešení potenciálního, izoentropického proudění, nebo plně vyvinutého rychlostního pole při laminárním proudění vazké tekutiny v potrubí a podobně. Software je pro tyto účely ověřen dle ČSN EN ISO 10211. Je založen na řešení diferenciální rovnice popisující transport obecné veličiny W konstantou c dle literatury [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(c_x \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(c_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) + c_\tau \frac{\partial W}{\partial \tau} + S = 0 \quad (23)$$

kde W je obecná veličina
 c konstanta úměrnosti
 S konstanta vnitřního zisku
 τ čas [s]

Pro výpočty vedení tepla ve stavebních materiálech je tedy možné nahradit obecnou veličinu W teplotou t a konstanty c_x a c_y tepelnou vodivostí λ ve směrech x , y a konstantu c_τ součinem objemové hmotnosti ρ a měrné tepelné kapacity c , jak říká vztah z literatury [7]:

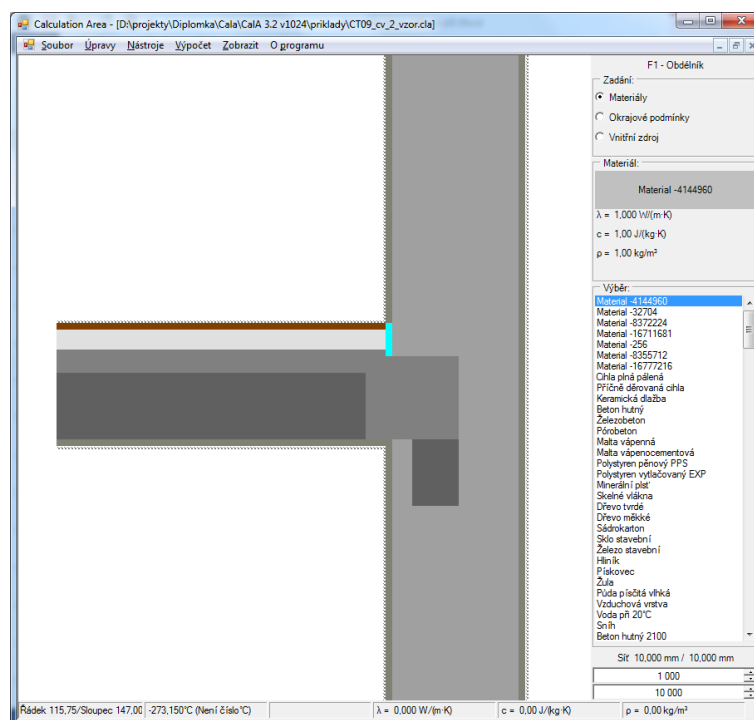
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + S = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (24)$$

kde t je teplota [K]
 λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 ρ objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 τ čas [s]

Práce v programu

Software obsahuje svůj vlastní preprocesor, procesor i postprocesor a lze jej tak využít bez použití dalších programů. Preprocesor zpracovává vstupní data tak, aby jej mohl program dál

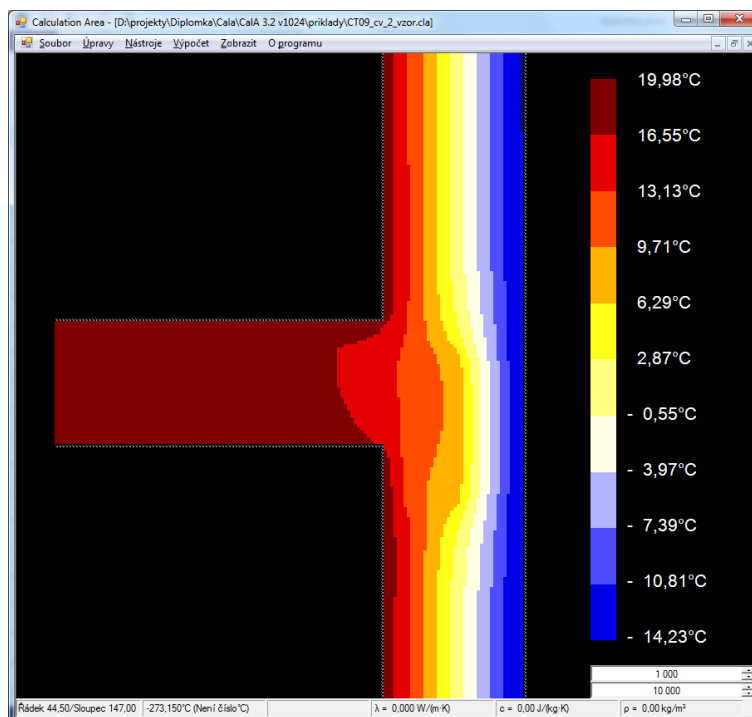
zpracovat [14]. Zadání vstupních dat probíhá ve vlastním grafickém prostředí programu, kde se zadají do zvolené výpočetní sítě stavební materiály a okrajové podmínky.



Obrázek 2 - Ukázka zadání materiálů a okrajových podmínek v grafickém prostředí programu CalA

Před provedením příkazu pro spuštění samotného výpočtu má uživatel na výběr stacionární výpočet pro nebo nestacionární výpočet pro časově závislé okrajové podmínky. Procesor sestává z několika algoritmů aplikujících finitní a iterační metody řešení soustav rovnic a dle informace z literatury [7] umožňuje také provést výpočet multigradní technikou. Nestacionární výpočet je řešen simulací časově neustálených dějů finitním řešičem metodou dosazovací, jak zmiňuje literatura [7].

Postprocesor nabízí dle literatury [7] celou řadu grafických a číselných výstupů včetně automatizovaného zpracování výsledků simulací časově neustálených dějů. Po provedení výpočtu se zobrazí 2D teplotní pole v nastavené barevné škále nebo můžeme vyexportovat číselné hodnoty pro další zpracování.



Obrázek 3 - Ukázka zobrazení výsledků výpočtu v programu CalA

4.5.2 Design Builder

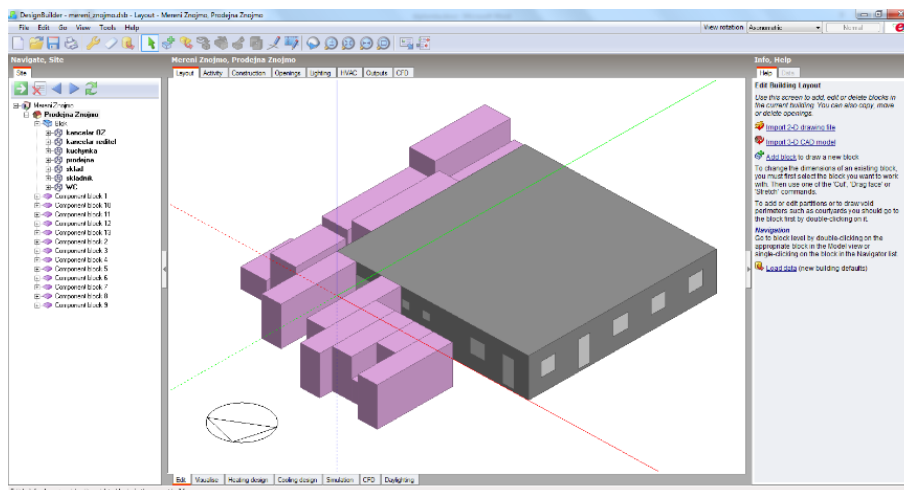
Design Builder je komplexní software pro dynamické simulování budov. Tvoří ho intuitivní grafické prostředí a výpočetní jádro EnergyPlus, které je založeno na bilančním výpočtu tepelných zisků a ztrát. Program se nejčastěji používá k dynamickému simulování budov, k hodnocení tepelné pohody, k výpočtu denního osvětlení, k certifikaci budov a k CFD analýze vnějších a vnitřních prostor budov, jak říká internetový zdroj [15].

EnergyPlus

EnergyPlus je samostatný program, ale kvůli pohodlnější práci, se používá spíše jako výpočetní jádro pro provádění energetických analýz a simulací budov. Je založen na popisu budovy z pohledu jejího fyzikálního chování, přidružených mechanických a jiných systémů, které upravují vnitřní prostředí. Počítá potřebu energie na vytápění a chlazení, která je nezbytná k udržení požadovaných hodnot a zadaných podmínek prostředí, spotřebu paliva a spotřebu primární energie. Současné použití těchto a dalších podrobností zaručuje, že simulace EnergyPlus věrně reprezentuje reálnou budovu, jak uvádí internetový zdroj [16].

Práce v programu

Zadání konstrukce a tvaru budovy je jednoduché a intuitivní, namodeluje se v 3D prostředí jako v běžně známých CAD programech. Vymodelovaná budova se rozdělí na jednotlivé zóny, kterým se přiřadí provoz a další parametry.



Obrázek 4 - Ukázka vytvoření geometrie budovy v programu Design Builder

Pro zadání vlastností program používá stromovou strukturu zadávání, což práci velmi urychluje. Použitím šablony na úrovni budovy nebo zóny program nastaví výchozí vlastnosti na nižších úrovních pro provoz nebo jednotlivé konstrukce a okna. Nastavení všech vlastností jednotlivých konstrukcí a zón lze samozřejmě měnit i individuálně na nižších úrovních.

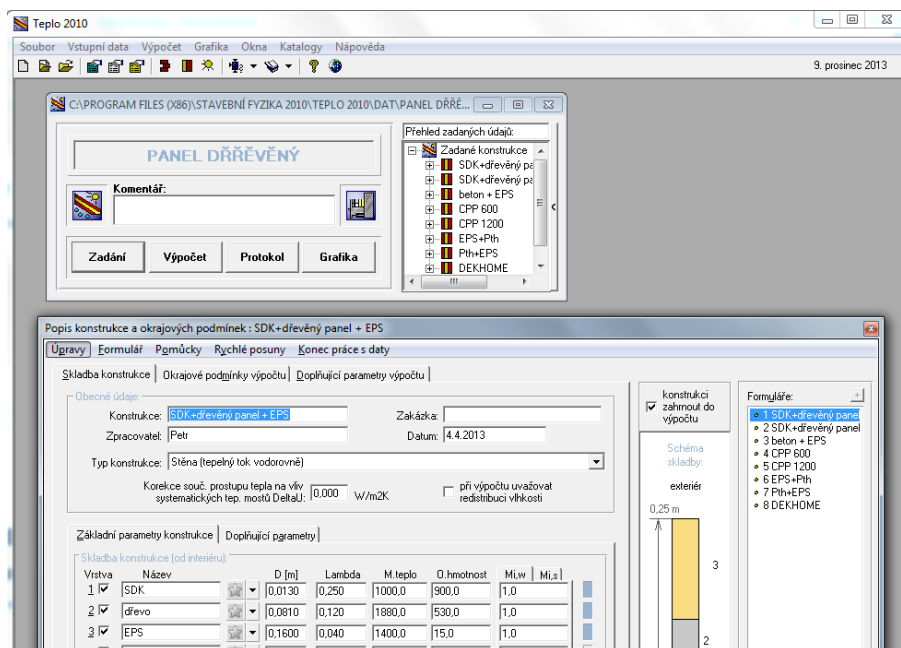
Výsledky jsou přehledně zobrazeny v grafech a tabulkách číselných hodnot, které je možné exportovat a dále zpracovávat.



Obrázek 5 - Ukázka zobrazení výsledků simulace programu Design Builder

4.5.3 Teplo 2010

Teplo 2010 je český program z rodiny programů Svoboda software pro stavební fyziku. Dle informace z internetového zdroje [17] je určen pro jednodimenzionální tepelně technické výpočty stavebních konstrukcí z hlediska prostupu tepla a bilance vodních par. Mimo základních parametrů, kterými jsou např. tepelný odpor konstrukce R , součinitel prostupu tepla U , povrchové teploty, oblasti kondenzace a množství zkondenzované vodní páry, počítá i dynamické tepelné charakteristiky konstrukcí dle normy [8], které budu posuzovat v této diplomové práci [18]



Obrázek 6 - Ukázka zadání vstupních dat do programu Teplo 2010

4.5.4 Vlastní výpočtové nástroje

Vlastní výpočtové nástroje byly vytvořeny v tabulkovém procesoru Microsoft Excel, který je součástí kancelářského balíku programů od firmy Microsoft. V programu byl naprogramován výpočet dynamických tepelných charakteristik, relaxační doby, součinitele teplotní vodivosti materiálů, tepelné akumulace materiálů a další. Také byl použit pro zpracování dat z experimentálního měření, pro import klimatických dat do programů a export výsledků z programu CalA a Design Builder.

	název	toušťka d [m]	součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m.K)]	hustota ρ [kg/m ³]	měrná tepelná kapacita c [J/(kg.K)]	tepelný odpor R [m ² .K/W]	součinitel teplotní vodivosti a [mm ² /s]	hloubka penetrace δ [m]	poměr tloušťky vrstvy a hloubky penetrace f [-]	
1										
2	Rsi					0,13				
3	vrstva 1	sádrokarton	0,013	0,25	900	1000	0,05	0,28	0,087	0,149
4	vrstva 2	dřevo	0,081	0,12	530	1880	0,68	0,12	0,058	1,407
5	vrstva 3	EPS	0,160	0,04	15	1400	4,00	1,90	0,229	0,699
6	vrstva 4									
7	vrstva 5									
8	vrstva 6									
9	vrstva 7									
10	vrstva 8									
11	vrstva 9									
12	vrstva 10									
13	Rse					0,04				
14	Perioda teploty	T =	86400	s						
40	Heat transfer matrix									
41	Z		-26,97+19,83i	4,22-12,15i		33,48	12,86			
42			8,48-2,29i	-2,21+2,55i		8,78	3,37			

Obrázek 7 - Ukázka vlastního výpočetního nástroje v prostředí programu Microsoft Excel

5. Teoretické hodnocení tepelných charakteristik konstrukcí a staveb

Dle dostupných zdrojů [9], [18] a [13] je zřejmé, že existuje spousta možných metod, podle kterých můžeme porovnávat materiály a skladby konstrukcí dle tepelné akumulace a setrvačnosti. Každá metoda má své výhody a nevýhody. V kapitole 5 je provedeno porovnání různých materiálů a konstrukcí podle známých, anebo pro účely této práce modifikovaných metod. Pro výpočet bude použita sada materiálů a konstrukcí, která je podrobněji popsána v příloze v tabulce A.1 a B.1 až B.5.

5.1 Metody založené na tepelných charakteristikách materiálů

Tyto metody vychází pouze z vlastností materiálů. Nezohledňuje se zde jejich běžná tloušťka nebo proveditelnost, ale hodnotí se pouze vlastnosti jednotlivých materiálů.

5.1.1 Součinitel teplotní vodivosti materiálů

Popis metody

Metoda je založena na porovnání materiálu podle součinitele teplotní vodivosti a . Ten se vypočítá dle vztahu (14) v kapitole 4.2. Charakterizuje rychlost změny teploty v určitém místě způsobené změnou povrchové teploty, a jak je řečeno v normě [5], čím je hodnota menší, tím menší je rychlost změny teploty a materiál vykazuje větší stabilitu.

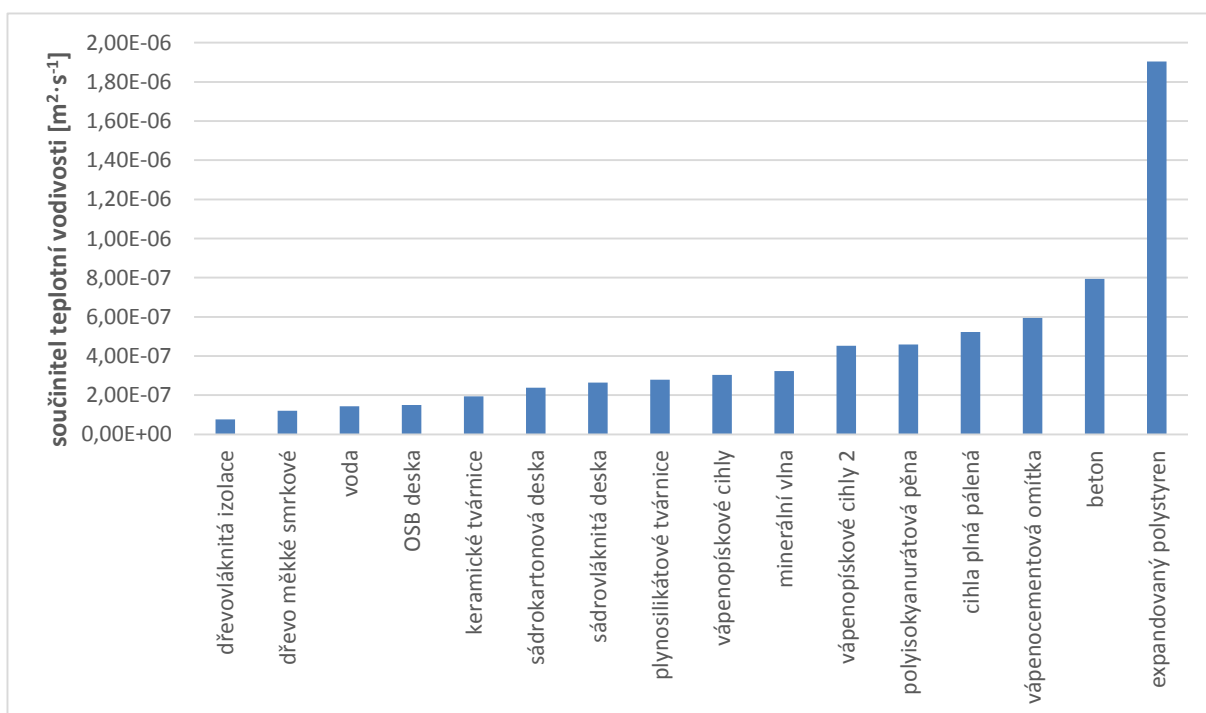
Výsledky

Tabulka 1 – Hodnocení materiálů dle součinitele teplotní vodivosti (od nejlepšího)

č.	název materiálu	tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	měrná tepelná kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	objemová hmotnost ρ [kg/m^3]	Součinitel teplotní vodivosti a [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] $\cdot 10^{-7}$
1	dřevovláknitá izolace	0,04	2100	250	0,76
2	dřevo měkké smrkové	0,12	1880	530	1,20
3	voda	0,60	4200	998	1,43
4	OSB deska	0,15	1580	630	1,51
5	keramické tvárnice	0,149	960	800	1,94
6	sádrokartonová deska	0,16	840	800	2,38

5. Teoretické hodnocení tepelných charakteristik konstrukcí a staveb

7	sádrovláknitá deska	0,35	1100	1200	2,65
8	plynosilikátové tvárnice	0,084	1000	300	2,80
9	vápenopískové cihly 1	0,37	1000	1220	3,03
10	minerální vlna	0,038	840	140	3,23
11	vápenopískové cihly 2	0,82	1000	1810	4,53
12	polyisokyanurátová pěna	0,022	1500	32	4,58
13	cihla plná pálená	0,80	900	1700	5,23
14	vápenocementová omítka	0,80	840	1600	5,95
15	beton	1,40	840	2100	7,94
16	expandovaný polystyren	0,04	1400	15	19,05



Graf 4 – Součinitele teplotní vodivosti a pro jednotlivé materiály

Hodnocení materiálů

Pokud chceme, aby měl materiál dobrou setrvačnost, musí mít nízkou hodnotu teplotní vodivosti. Toho můžeme dosáhnout pouze tehdy, pokud bude mít vyvážené všechny jeho vlastnosti. Je tedy žádoucí, aby měl co nejvyšší objemovou hmotnost a měrnou tepelnou kapacitu a zároveň co nejnižší tepelnou vodivost. Velmi dobře tedy vychází dřevovláknitá izolace, dřevo a keramické tvárnice, naopak vysoké hodnoty prokazuje cihla plná pálená, beton a expandovaný polystyren.

Materiály, které mají nízkou hodnotu teplotní vodivosti a jsou nejlepší pro jednovrstvé zdivo. Patří mezi ně materiály, které mají vyvážené vlastnosti. Neznamena však, že tyto materiály jsou nejvhodnější pro použití ve všech situacích.

U vícevrstvé konstrukce je žádoucí, aby vnitřní vrstva měla vysokou hodnotu součinitele teplotní vodivosti a vnější vrstva co nejmenší. Vysoká hodnota na vnitřním povrchu zajistí rychlé ukládání a uvolňování energie do vnitřního prostředí. Nízká hodnota na vnějším povrchu naopak přispěje k tepelné setrvačnosti, kdy zpomalí zisk a ztrátu energie z vnitřního prostředí.

Hodnocení metody

Hodnocení materiálů metodou dle součinitele teplotní vodivosti je velmi jednoduché a dává rychlou představu o skutečném chování různých materiálů při teplotních změnách. Touto metodou lze porovnávat pouze materiály, nikoli konstrukce, protože nelze zohlednit poloha jednotlivých vrstev konstrukce.

5.1.2 Měrná akumulovaná energie

Popis metody

Tepelná energie lze uchovávat v látkách, rovnice (15) v kapitole 4.2 říká, jaké množství tepla je látka schopna přijmout nebo odevzdat. Pokud chceme porovnávat potenciál akumulární schopnosti materiálů mezi sebou, ohřejeme různé materiály o $\Delta t = 1 \text{ K}$ o stejném objemu $V = 1 \text{ m}^3$. Potom je možné porovnávat pouze jejich měrnou akumulovanou energii, kterou vypočítáme jako:

$$E_m = c \cdot \rho; \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \quad (25)$$

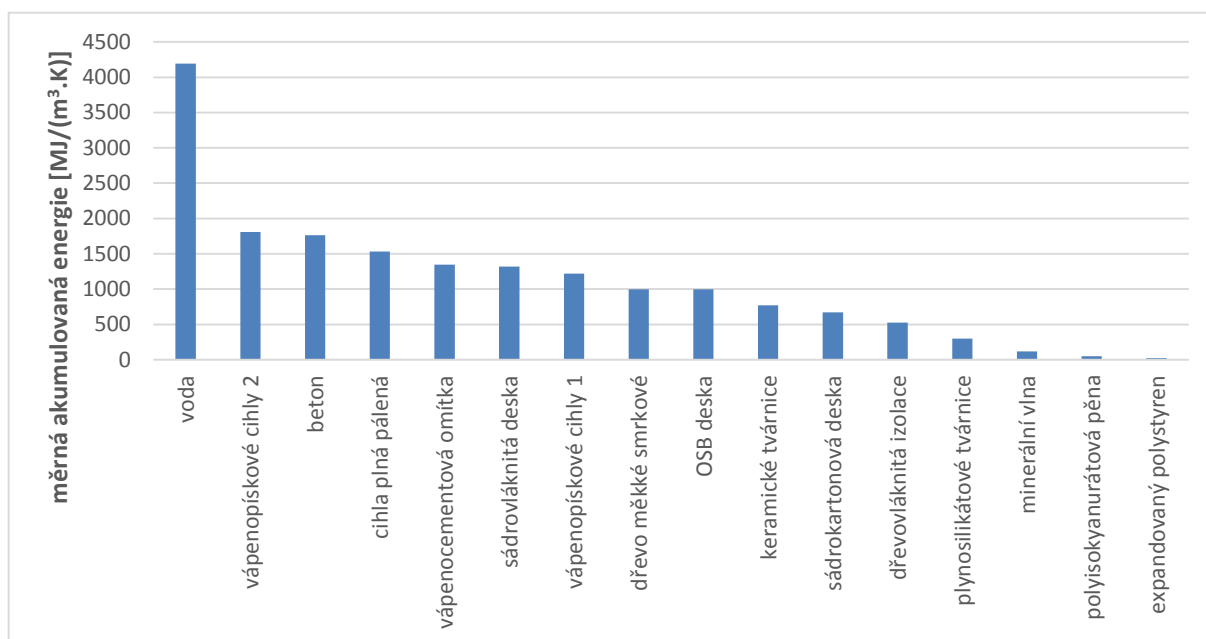
kde c je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 ρ objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Materiály s vyšší měrnou akumulovanou energií mají lepší tepelnou setrvačnost.

Výsledky

Tabulka 2 – Měrná akumulovaná energie různých materiálů

č.	název materiálu	měrná tepelná kapacita c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	objemová hmotnost ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	měrná akumulovaná energie E_m [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]
1	voda	4200	998	4192
2	vápenopískové cihly 2	1000	1810	1810
3	beton	840	2100	1764
4	cihla plná pálená	1700	900	1530
5	vápenocementová omítka	840	1600	1344
6	sádrovláknitá deska	1100	1200	1320
7	vápenopískové cihly 1	1000	1220	1220
8	dřevo měkké smrkové	1880	530	996
9	OSB deska	1580	630	995
10	keramické tvárnice	960	800	768
11	sádrokartonová deska	840	800	672
12	dřevovláknitá izolace	2100	250	525
13	plynosilikátové tvárnice	1000	300	300
14	minerální vlna	840	140	118
15	polyisokyanurátová pěna	1500	32	48
16	expandovaný polystyren	1400	15	21



Graf 5 - Měrná akumulovaná energie pro různé materiály

Hodnocení materiálů

Nejlepší materiál pro akumulování citelného tepla je voda. Není tedy určitě náhodou, že se voda používá jako médium do akumulčních nádrží a systému ústředního vytápění. Velmi nevhodné jsou izolační materiály a lehké stavební materiály, jako jsou sádrokartony a plynosilikátové tvárnice. Naopak velmi dobré materiály pro akumulování energie jsou těžké stavební materiály, jako jsou beton, cihla plná pálená a vápenopískové cihly 2. Hodnocením dle této metodiky bylo zjištěno, že stavební materiály mají u různých výrobců řádově různé parametry, které zásadně ovlivňují interpretaci výsledků. Např. vápenopískové cihly mají objemovou hmotnost od 1220 do 1810 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, měrná tepelná kapacita měkkého dřeva od 1500 do 2100 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ v závislosti na druhu a vlhkosti dřeva, norma [11] dokonce uvádí měrnou tepelnou kapacitu 2510 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Hodnocení metodiky

Metodika hodnotí pouze potenciál materiálu jaké množství tepla je schopen přijmout nebo odevzdat při změně teploty. Tato metoda vůbec nezohledňuje rychlost výměny tepla. Doba, za kterou výměna tepla proběhne, není u všech materiálů stejná.

5.2 Analytické metody stanovení dynamických tepelných charakteristik konstrukcí

Dynamické tepelné charakteristiky konstrukcí obálky budovy popisují tepelné chování jednotlivých konstrukcí, které jsou zatěžovány proměnnými okrajovými podmínkami např. proměnným tepelným tokem nebo proměnnými teplotami na obou okrajích konstrukce [8].

Patří mezi ně:

1. relaxační doba;
2. doba chladnutí symetrické homogenní konstrukce;
3. fázový posun;
4. faktor útlumu;
5. teplotní útlum.

5.2.1 Relaxační doba

Popis metody

Relaxační doba nevyjadřuje žádnou reálnou dobu, jako je např. „Doba chladnutí“ definovaná v kapitole 5.3.1. Relaxační doba konstrukce τ_0 je parametr, na základě kterého můžeme hodnotit vlastnosti konstrukce z pohledu tepelné setrvačnosti. Slouží pro rychlý odhad teplotní setrvačnosti konstrukce. Pro jednovrstvé konstrukce se dle článku [18] vypočítá přímo z parametrů použitého materiálu:

$$\tau_0 = \frac{C}{2 \cdot U} \quad (26)$$

kde C je tepelná kapacita vztažená na jednotku plochy konstrukce [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
 U součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

Dosadíme-li za tepelnou kapacitu C a součinitel prostupu tepla U známé materiálové parametry, dostaneme vztah:

$$\tau_0 = \frac{\rho \cdot c \cdot d^2}{2 \cdot \lambda} = \frac{d^2}{2 \cdot a} \quad (27)$$

kde d je tloušťka vrstvy [m]
 λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
ρ	objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
a	součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Do výpočtu vstupuje tloušťka konstrukce, takže relaxační doba není materiálovou charakteristikou, ale je to charakteristika konstrukce. Pro vícevrstvou konstrukci je postup stejný. Spočítá se teplo, které se uvolní stacionárním ochlazením jednotkové plochy konstrukce o malou hodnotu dt a toto teplo se postaví rovno počátečnímu tepelnému toku procházejícímu venkovním povrchem po dobu τ . Pro relaxační dobu $\tau_{0(n)}$ konstrukce o n vrstvách platí:

$$\tau_{0(n)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i^2 \rho_i c_i}{2\lambda_i} + d_i \rho_i c_i \cdot \sum_{j=i+1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} \right) \quad (28)$$

kde	d_i	je	tloušťka vrstvy i [m]
	λ_i		součinitel tepelné vodivosti vrstvy i [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	c_i		měrná tepelná kapacita vrstvy i [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	ρ_i		objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti vrstvy i [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Pro konstrukci se dvěma vrstvami $n = 2$ dostaneme vztah:

$$\tau_{0(2)} = \frac{d_1^2 \rho_1 c_1}{2\lambda_1} + \frac{d_2^2 \rho_2 c_2}{2\lambda_2} + \frac{d_1 d_2 \rho_1 c_1}{2\lambda_2} \quad (29)$$

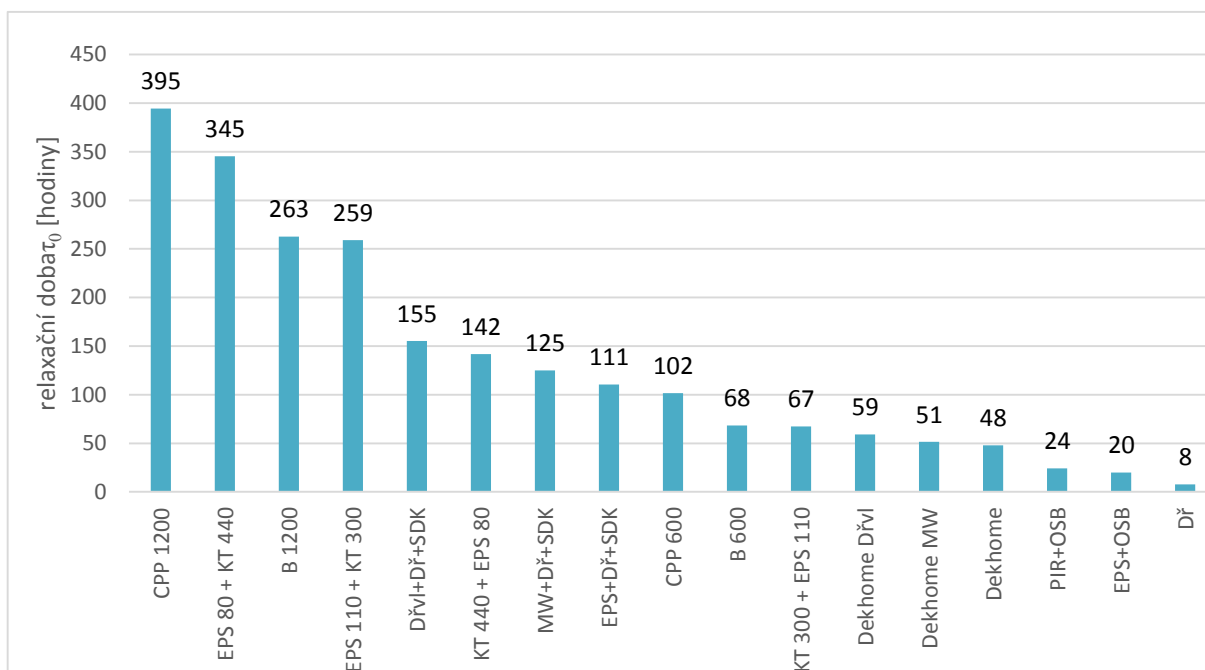
Z výše uvedeného vztahu plyne, že záleží na pořadí vrstev v konstrukci. Pokud je v exteriéru teplota nižší než v interiéru, bude směr tepelného toku z interiéru do exteriéru. Když tedy v tomto případě zateplíme těžkou betonovou stěnu polystyrenem ze strany interiéru, bude naakumulované teplo v konstrukci rychleji unikat než v případě, když zateplíme betonovou stěnu ze strany exteriéru.

Výsledky výpočtu

Tabulka 3 – Tabulka relaxační doby konstrukcí

Název konstrukce	Relaxační doba τ_0
Velmi těžké masivní konstrukce	
CPP 1200	394 hod 34 min
CPP 600	101 hod 42 min
B 1200	262 hod 38 min
B 600	68 hod 22 min
Středně těžké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS 110 + KT 300	259 hod 7 min
EPS 80 + KT 440	345 hod 18 min
Středně těžké konstrukce s vnitřním zateplením	
KT 300 + EPS 110	67 hod 26 min
KT 440 + EPS 80	141 hod 38 min
Lehké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS+Dř+SDK	110 hod 33 min
MW+Dř+SDK	124 hod 55 min
Dřvl+Dř+SDK	155 hod 21 min
Dekhome	47 hod 46 min
Dekhome MW	51 hod 25 min
Dekhome Dřvl	58 hod 58 min
Velmi lehké konstrukce	
EPS+OSB	19 hod 51 min
PIR+OSB	24 hod 7 min
Dř	7 hod 33 min

Uvedené konstrukce byly pro přehlednost seřazeny podle relaxační doby od nejdelší po nejkratší a zobrazeny v grafu.



Graf 6 - Relaxační doba konstrukcí

Obecně lze říci, že vysokých hodnot dosahují velmi těžké masivní konstrukce a naopak nízkých hodnot lehké konstrukce. Také není překvapením, že konstrukce s vnitřním zateplením mají kratší relaxační dobu než konstrukce s vnějším zateplením. Zajímavým výsledkem je však to, že lehké zateplené konstrukce z dřevěných panelů (Dřvl+Dř+SDK) mají delší relaxační dobu než těžké konstrukce z betonu a cihly plné pálené. Např. konstrukce z dřevěného panelu a dřevovláknité izolace (Dřvl+Dř+SDK) má relaxační dobu více jak dvakrát větší než konstrukce z betonu o tloušťce 600 mm. Tyto konstrukce se především liší v rozdílné hmotnosti a součiniteli prostupu tepla U . Je zřejmé, že právě součinitel prostupu tepla má významný vliv na výslednou tepelnou setrvačnost.

Hodnocení metody

Relaxační doba je již komplexnější tepelnou charakteristikou. Tato metoda dokáže zohlednit i tloušťku materiálů a vrstevnatost konstrukce. Je pouze porovnávací parametr, který nevyjadřuje žádnou konkrétní fyzikální vlastnost. Jelikož její definice vychází ze stacionárního chladnutí o malou hodnotu dt , odpovídá tedy její hodnota době chladnutí konstrukcí. Pokud seřadíme konstrukce dle „Doby chladnutí“ a „Relaxační doby“ v pořadí od největší to nejmenší, získáme vždy stejné pořadí. Podrobněji v kapitole 8.3.

5.2.2 Potenciál vnitřních vrstev konstrukce akumulovat teplo

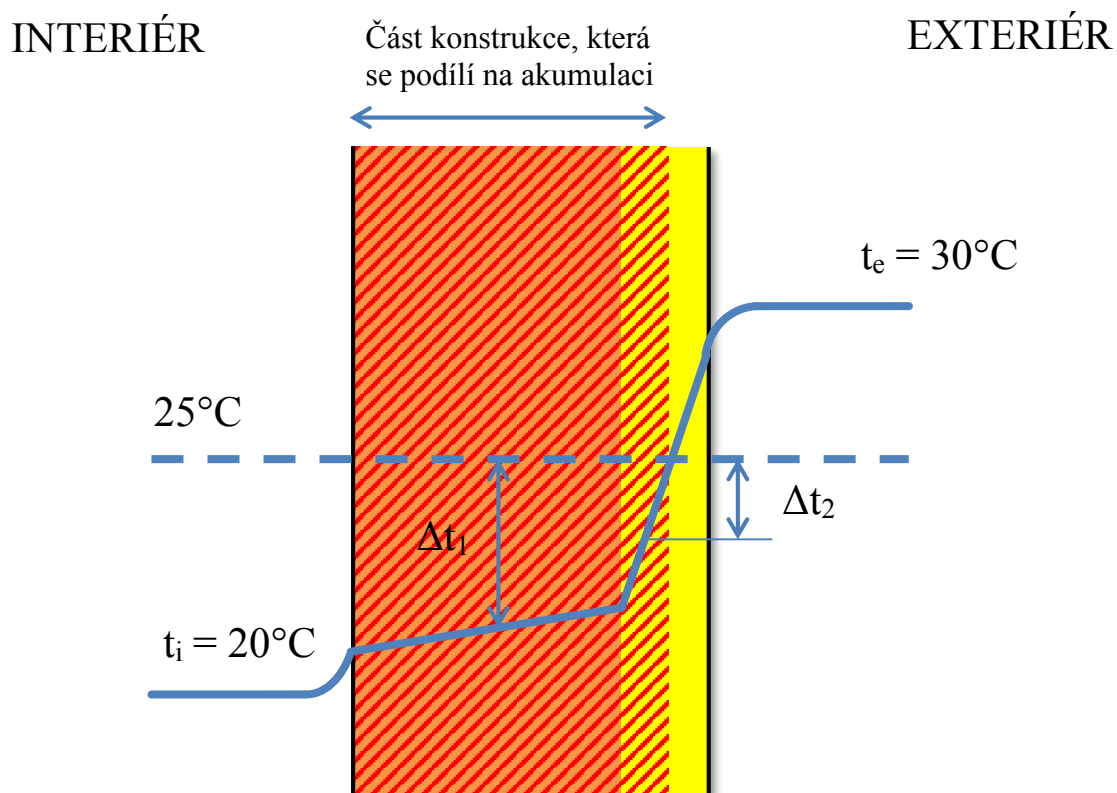
Popis modelu

V době, kdy je teplota vzduchu v interiéru vyšší, jako je teplota konstrukce, dochází k akumulaci tepla v konstrukci a tudíž ke zvýšení její teploty. V opačném případě mechanismus funguje stejným způsobem. Vyšší akumulace tepla v konstrukci snižuje kolísání teploty vnitřního vzduchu. Ke stabilizaci vnitřního prostředí může přispět pouze část konstrukce blízko vnitřního povrchu. U těžkých stěn zateplených z vnější strany se teplotní spád soustřeďuje do tepelné izolace. Těžká hmota s velkou tepelnou kapacitou je v celé své tloušťce ohřata na teplotu blízkou teplotě vzduchu v interiéru a maximálním způsobem přispívá ke stabilitě vnitřní teploty. Pro zjištění chladicí schopnosti konstrukce v letním období byl proveden výpočet pro zjištění potenciálu konstrukce pro akumulaci tepla. Ve výpočtu byla uvažována teplota vzduchu v interiéru $t_i = 20^\circ\text{C}$ a teplota vzduchu v exteriéru $t_e = 30^\circ\text{C}$ a byl vypočítán průběh teploty v konstrukci při ustáleném stavu. Potom byla skokově zvýšena teplota vnitřního vzduchu o 5°C a bylo vypočítáno množství tepla, které je schopna konstrukce akumulovat a odebrat vzduchu (ochladit vzduch) do doby, než dojde k vyrovnání teploty povrchových vrstev konstrukce s teplotou vnitřního vzduchu:

$$Q = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot d_i \cdot c_i \cdot \Delta t_i; \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \quad (30)$$

kde	ρ_i	je	objemová hmotnost vrstvy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
	d_i		tloušťka vrstvy [m]
	c_i		měrná tepelná kapacita vrstvy [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	Δt_i		rozdíl počáteční teploty uprostřed vrstvy a zvýšené teploty interiéru [K]

Výpočet byl proveden pouze pro vrstvy, které měly ve všech místech teplotu nižší než 25°C . Vrstvy s teplotou vyšší než 25°C v celé své tloušťce nebyly započítány, protože díky vyšší teplotě nepřispějí k ochlazení vnitřního vzduchu. Schéma principu výpočtu je na obrázku 7.

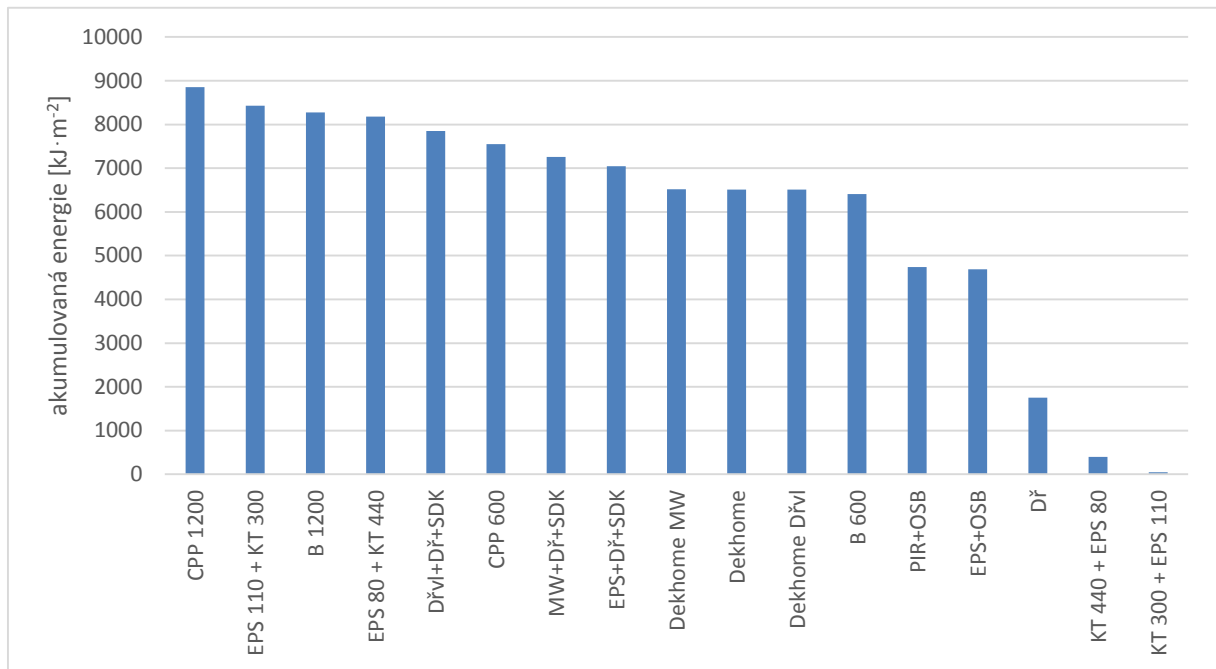


Obrázek 8 - Schéma výpočtu potenciálu konstrukce pro akumulaci tepla konstrukce s vnějším zateplením

Výsledky výpočtu

Tabulka 4 - Výsledky akumulovaného tepla konstrukcí

Název konstrukce	akumulované teplo E_m [kJ·m ⁻²]
Velmi těžké masivní konstrukce	
CPP 1200	8851,5
CPP 600	7548,8
B 1200	8276,4
B 600	6405,1
Středně těžké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS 110 + KT 300	8425,3
EPS 80 + KT 440	8179,6
Středně těžké konstrukce s vnitřním zateplením	
KT 300 + EPS 110	49,8
KT 440 + EPS 80	395,6
Lehké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS+Dř+SDK	7041,2
MW+Dř+SDK	7255,0
Dřvl+Dř+SDK	7850,6
Dekhome	6513,0
Dekhome MW	6520,1
Dekhome Dřvl	6513,0
Velmi lehké konstrukce	
EPS+OSB	4688,7
PIR+OSB	4735,9
Dř	1750,8



Graf 7 - Porovnání akumulovaného tepla konstrukcí

Hodnocení výsledků

- Potenciál konstrukce pro akumulaci tepla závisí nejvíce na pozici tepelné izolace. Výsledky potvrzují, že při vnějším zateplení zajistí sádkartonová deska s dřevěným panelem dostatečnou tepelnou akumulaci v porovnání s omítnutou keramickou tvárnicí.
- Konstrukce s vnitřním zateplením vychází nejhůře, protože tepelné izolace mají velmi malou akumulaci schopnost.
- U vnitřního zateplení způsobí velký teplotní gradient ve vrstvě blízké interiéru to, že je možné pro akumulování energie započítat pouze malou část skladby konstrukce.
- Velmi těžké konstrukce nevyhází výrazně lépe než středně těžké a lehké konstrukce.

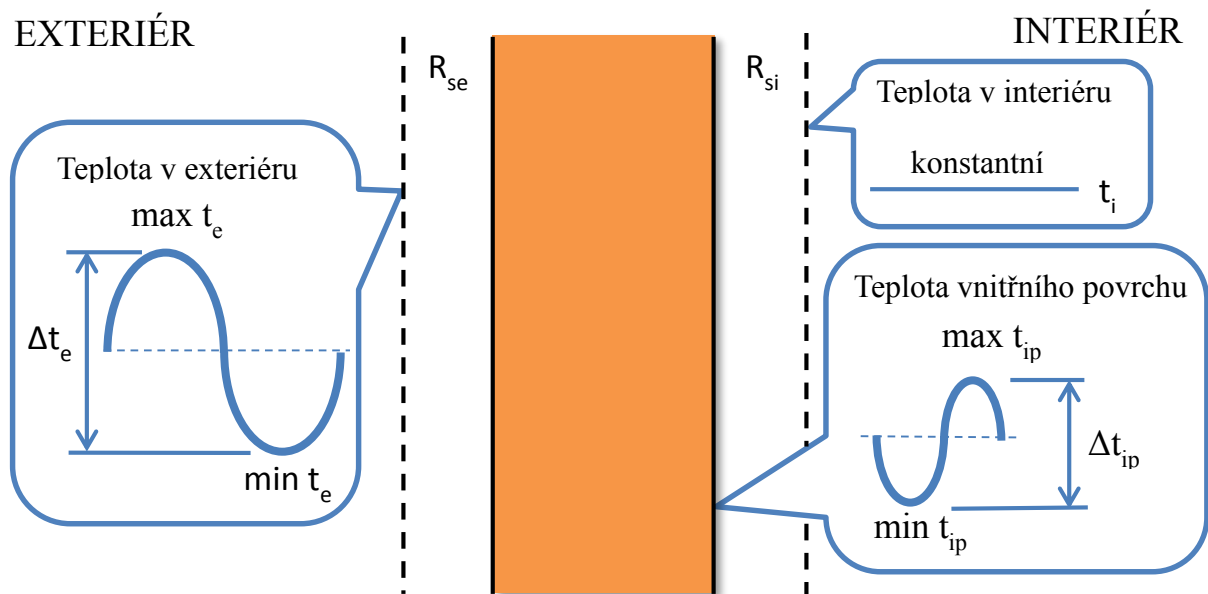
Hodnocení modelu

- Přes svoji jednoduchost dokáže metoda porovnat konstrukce a jejich schopnost akumulovat teplo v interiérových vrstvách a tudíž predikovat její setrvačné vlastnosti.
- Model je vhodný pro případy, kdy se vyskytují v interiéru vnitřní zdroje (PC, světla), nebo zisky (solární zisky).
- Pro prostory bez tepelných zisků není metoda vhodná.

5.2.3 Fázový posun, faktor útlumu a teplotní útlum konstrukce

Popis modelu

Pro výpočet fázového posunu, faktoru útlumu a teplotního útlumu jsou uvažovány okrajové podmínky, kdy teplota vnějšího vzduchu harmonicky kmitá dle funkce sinus s rozdílem maximální a minimální teploty Δt_e a teplota vnitřního vzduchu je udržována konstantní t_i . Teplota vnitřního povrchu se vyvíjí jako odezva na vnější teplotu vzduchu a také harmonicky kmitá, ale s menším rozdílem teploty Δt_{ip} a časovým posunutím.



Obrázek 9 – Schéma okrajových podmínek pro výpočet fázového posunu

Faktor útlumu a fázový posun metodou admitance

Tato metoda je využívána i při hodnocení konstrukcí dle ČSN EN ISO 13786. Jelikož předpokládá časovou změnu okrajových podmínek jako harmonický kmit, odezva na harmonický kmit okrajových podmínek je také harmonický kmit. Vztahy mezi veličinami na povrchu m a n konstrukce jsou vyjadřovány v maticovém tvaru [8]:

$$\begin{bmatrix} \hat{t}_n \\ \hat{q}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{t}_m \\ \hat{q}_m \end{bmatrix} \quad (31)$$

kde \hat{t} je fázor harmonické změny teploty
 \hat{q} fázor harmonické změny hustoty tepelného toku
 Z_{mn} komplexní prvky přenosové matice

Jednotlivé prvky matice Z_{mn} se vypočítají podle vztahu 14 v normě [8].

Velkou výhodou maticového výpočtu je jednoduchost při výpočtu vícevrstvých konstrukcí, které vypočítáme jednoduše maticovým součinem.

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = Z_{s2} \cdot Z_N \cdot Z_{N-1} \cdot \dots \cdot Z_2 \cdot Z_1 \cdot Z_{s1} \quad (32)$$

kde Z_s je matice okrajových podmínek
 Z_N matice vrstvy konstrukce

Další postup výpočtu definuje výpočet dvou komplexních hodnot, dynamický tepelný prostup (dynamic thermal transmittance) Y_{nm} a dynamická admitance tepla (dynamic thermal

$$\begin{aligned} Y_{11} &= -\frac{Z_{11}}{Z_{12}}; & \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \\ Y_{22} &= -\frac{Z_{22}}{Z_{12}}; & \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \\ Y_{12} &= -\frac{1}{Z_{12}}; & \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (33)$$

kde Y_{11} je dynamická admitance tepla na vnitřním povrchu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
 Y_{22} dynamická admitance tepla na vnějším povrchu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
 Y_{12} dynamický tepelný prostup [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
 admittance) Y_{nm} , které se vypočítají dle normy [8]:

Z nich je možné vypočítat důležité parametry pro porovnávání tepelné setrvačnosti konstrukce. Tohle popisuje rovnice poměru mezi komplexní amplitudou hustoty tepelného toku na povrchu konstrukce přiléhající k zóně m a komplexní amplitudou teploty v zóně n dle literatury [9]:

$$Y_{nm} = -\frac{\hat{q}_m}{\hat{t}_n}; \quad \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (34)$$

kde Y_{nm} je dynamický prostup tepla pokud $n \neq m$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

	dynamická admitance tepla, pokud $n = m$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
\hat{q}_m	komplexní amplituda hustoty tepelného toku na povrchu konstrukce přiléhající k zóně m [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
\hat{t}_n	komplexní amplituda teploty v zóně n

Kladná orientace tepelného toku je brána, když směřuje od povrchu dovnitř konstrukce. Dále uvažujeme, že zóna n je venkovní prostředí a zóna m je vnitřní prostředí. Díky tomu, že Y_{nm} a Y_{mn} jsou komplexní čísla, každé z nich popisuje amplitudu a fázový posun. Z toho důvodu mohou být z dynamického tepelného prostupu Y_{nm} odvozeny dva parametry, jmenovitě to jsou faktor útlumu (decrement factor) f a odpovídající fázový posun (time lag) Δt_f .

$$f = \frac{|Y_{nm}|}{U} \quad (35)$$

kde Y_{nm} je dynamický tepelný prostup [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
 U součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

$$\Delta t_f = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{nm}); \quad [\text{h}] \quad (36)$$

kde Y_{nm} je dynamický tepelný prostup [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
 T doba periodického opakování (jeden den = 86 400 s) [s]

Faktor útlumu popisuje tlumení teplotní vlny, které vzniká při průchodu z exteriéru do interiéru, a fázový posun říká, jaké je odpovídající zpoždění. Pro tenké lehké konstrukce bez tepelné setrvačnosti se faktor útlumu f blíží dle literatury [9] nekonečně velkému číslu a fázový posun Δt_f nule.

Podobná situace je i na vnitřním povrchu, kdy můžeme z dynamické admitance tepla Y_{nm} opět odvodit dva parametry, amplitudu admitance tepla Y a odpovídající fázový posun (time lag) Δt_Y vztahy:

$$Y = |Y_{nm}|; \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (37)$$

$$\Delta t_Y = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{mn}); \quad [\text{h}] \quad (38)$$

kde Y_m je dynamická admitance tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
 T doba periodického opakování (jeden den = 86 400 s) [s]

Tyto parametry nám říkají, jak konstrukce reaguje na změnu hustoty tepelného toku do vnitřního prostředí k změnám teploty vnitřního prostředí. Pro tenké lehké konstrukce bez tepelné setrvačnosti se dle literatury [9] blíží hodnota admitance tepla Y hodnotě součinitele prostupu tepla U a fázový posun Δt_Y nule. Tyto parametry velmi záleží na vlastnostech vnitřní vrstvy. Pokud je tedy na vnitřní straně stěny umístěna tepelná izolace, admitance tepla tím bude významně ovlivněna.

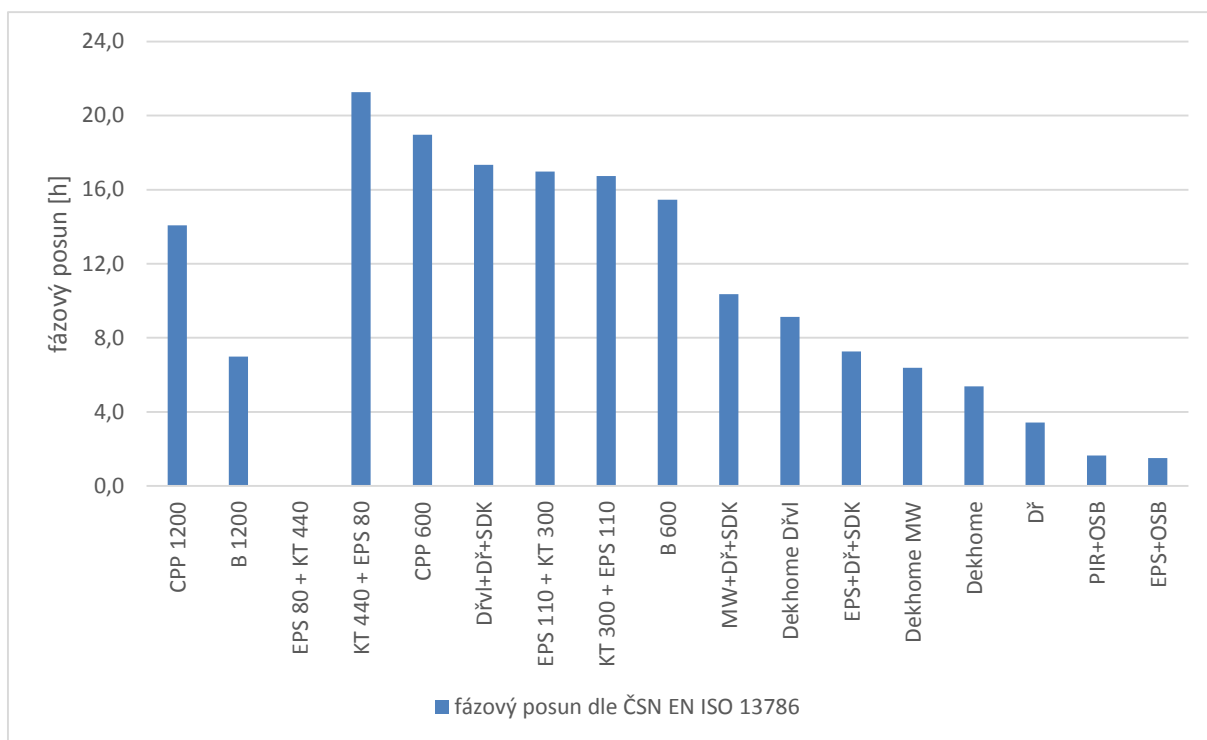
Dynamické tepelné charakteristiky konstrukcí z tabulky v příloze v tabulce B.1 byly vypočítány a hodnoceny v prostředí programu Excel použitím výše popsané metody admitance z normy ČSN EN ISO 13786.

Výsledky výpočtu fázového posunu při prostupu tepla

Tabulka 5 – Výsledky fázového posunu při prostupu tepla konstrukcí

Název konstrukce	fázový posun dle ČSN EN ISO 13786 $\Delta\tau_f$ [h]
velmi těžké masivní konstrukce	
CPP 1200	14,07⁴
CPP 600	18,96
B 1200	6,98⁴
B 600	15,46
těžké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS 110 + KT 300	16,98
EPS 80 + KT 440	0,02⁴
těžké konstrukce s vnitřním zateplením	
KT 300 + EPS 110	16,73
KT 440 + EPS 80	21,26
lehké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS+Dř+SDK	7,26
MW+Dř+SDK	10,35
Dřvl+Dř+SDK	17,33
Dekhomet	5,38
Dekhomet MW	6,38
Dekhomet Dřvl	9,14
velmi lehké konstrukce	
EPS+OSB	1,50
PIR+OSB	1,65
Dř	3,43

⁴ Velmi těžké masivní konstrukce mají ve skutečnosti fázový posun při prostupu tepla o 24 hodin vyšší, viz hodnocení metody.



Graf 8 - Fázový posun konstrukcí při prostupu tepla seřazený od nejvyšší po nejnižší

Konstrukce v grafu jsou seřazené dle skutečného fázového posunu vypočítaného numerickým modelováním v kapitole 5.3.2 od nejvyšší po nejnižší. U velmi těžkých konstrukcí tedy hrozí riziko špatné interpretace výsledků výpočtem podle metodiky normy ČSN EN ISO 13786, viz hodnocení metody.

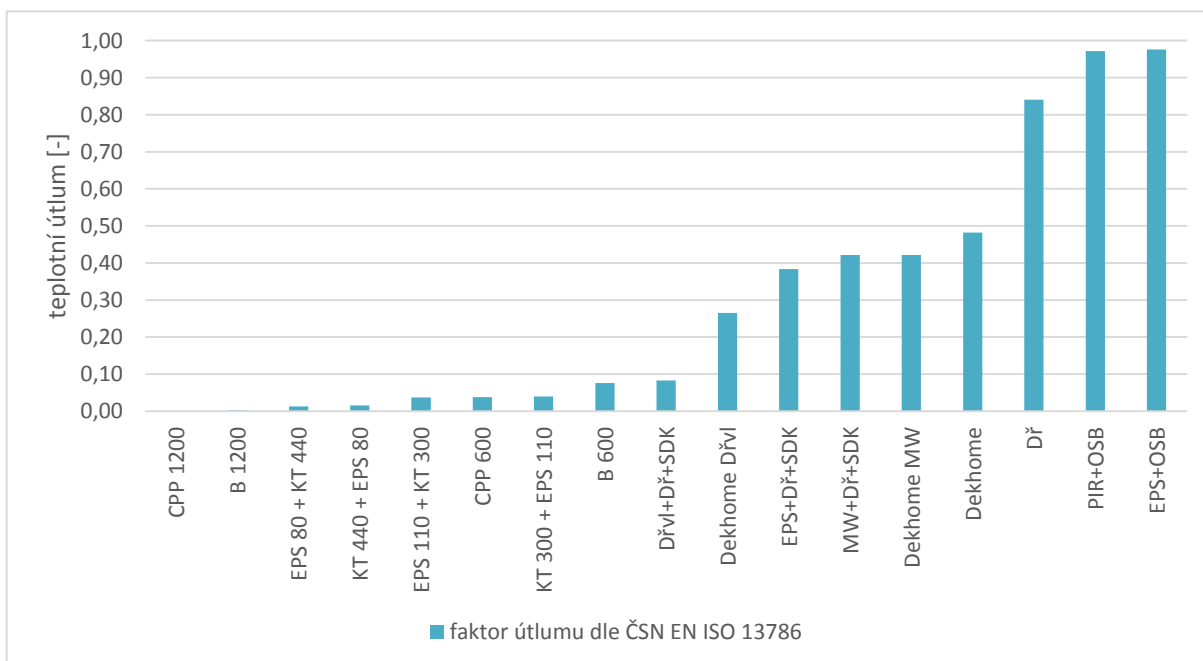
Výsledky výpočtu faktoru útlumu

Tabulka 6 – Výsledky faktoru útlumu konstrukcí

Název konstrukce	faktor útlumu dle ČSN EN ISO 13786 $f [-]$
velmi těžké masivní konstrukce	
CPP 1200	0,0005
CPP 600	0,0379
B 1200	0,0022
B 600	0,0758
těžké konstrukce s vnějším zateplením	

5. Teoretické hodnocení tepelných charakteristik konstrukcí a staveb

EPS 110 + KT 300	0,0370
EPS 80 + KT 440	0,0130
těžké konstrukce s vnitřním zateplením	
KT 300 + EPS 110	0,0400
KT 440 + EPS 80	0,0151
lehké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS+Dř+SDK	0,3838
MW+Dř+SDK	0,4217
Dřvl+Dř+SDK	0,0832
Dekhome	0,4824
Dekhome MW	0,4217
Dekhome Dřvl	0,2650
velmi lehké konstrukce	
EPS+OSB	0,9767
PIR+OSB	0,9721
Dř	0,8403

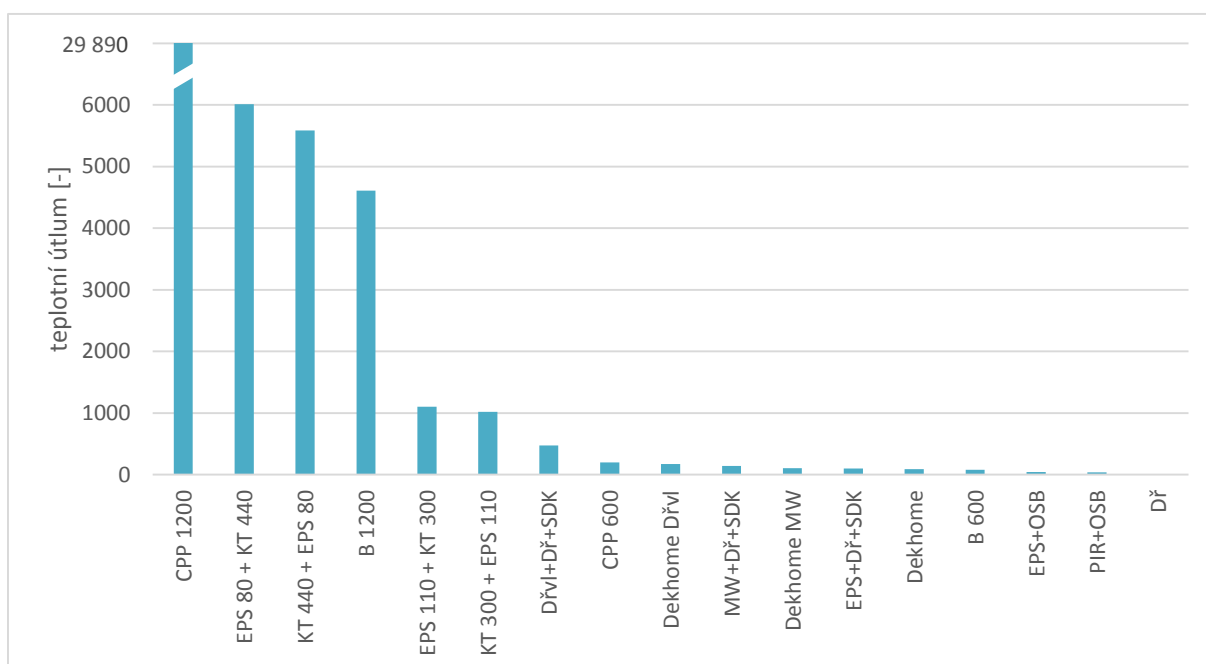


Graf 9 – Faktor útlumu konstrukcí

Výsledky teplotního útlumu

Tabulka 7 – Výsledky teplotního útlumu konstrukcí

Název konstrukce	teplotní útlum dle ČSN 733 0540-4 ν [-]
velmi těžké masivní konstrukce	
CPP 1200	29881,0
CPP 600	200,4
B 1200	4608,4
B 600	79,3
těžké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS 110 + KT 300	1102,9
EPS 80 + KT 440	6013,2
těžké konstrukce s vnitřním zateplením	
KT 300 + EPS 110	1019,3
KT 440 + EPS 80	5585,5
lehké konstrukce s vnějším zateplením	
EPS+Dř+SDK	102,7
MW+Dř+SDK	140,1
Dřvl+Dř+SDK	474,3
Dekhome	90,8
Dekhome MW	106,8
Dekhome Dřvl	172,2
velmi lehké konstrukce	
EPS+OSB	41,2
PIR+OSB	39,7
Dř	8,5



Graf 10 – Teplotní útlum konstrukcí dle ČSN 73 0540-4

Hodnocení výsledků fázového posunu

Hodnoty fázového posunu $\Delta\tau_f$ prokázaly, že velmi lehké konstrukce reagují na vnější teplotu vzduchu s velmi malým zpožděním do 3 hodin. Lehké konstrukce jsou poněkud horší než těžké konstrukce zateplené z vnější strany, avšak lehké konstrukce s dřevovláknitou izolací jim už dobře konkurují. Použití dřevovláknité izolace má tedy významný pozitivní vliv na fázový posun. Velmi těžké konstrukce mají díky své hmotě velký fázový posun, mnohdy větší než 24 hodin a navzdory horšímu součiniteli prostupu tepla U mají velmi dobrý fázový posun.

Hodnocení výsledků faktoru útlumu a teplotního útlumu

Hodnoty teplotního útlumu v pro velmi lehké konstrukce vychází velmi nízké v rozmezí 8 - 41, málo tedy tlumí rozkmit teplot na vnitřním povrchu a mají negativní vliv na tepelnou stabilitu. Lehké konstrukce obecně a nečekaně i betonová konstrukce B 600 mají také poměrně malý teplotní útlum, ten vychází v rozmezí 79 - 107. Teplotní útlum výrazně roste až k 172 u lehkých konstrukcí s dřevovláknitou izolací.

Porovnání konstrukcí podle faktoru útlumu f nedává stejné výsledky jako porovnání podle teplotního útlumu v . Faktor útlumu lépe hodnotí masivní velmi těžké konstrukce v porovnání

s lehkými konstrukcemi s vnějším zateplením. Teplotní útlum ν lépe hodnotí lehké konstrukce s vnějším zateplením.

Např. velmi těžká konstrukce z cihel plných pálených tloušťky 600 mm má faktor útlumu $f = 0,0379$ a teplotní útlum $\nu = 200,4$ zatímco lehká konstrukce s vnějším zateplením z dřevovláknité izolace má faktor útlumu $f = 0,0832$ a teplotní útlum $\nu = 474,3$. Pro přehlednost jsou tyto hodnoty zobrazeny v tabulce 8.

Tabulka 8 – Porovnání výsledků teplotního útlumu a faktoru útlumu

Název konstrukce	teplotní útlum dle ČSN 73 0540-4 ν [-]	faktor útlumu dle ČSN EN ISO 13786 f [-]
velmi těžké masivní konstrukce		
CPP 600	200,4	0,0379
lehké konstrukce s vnějším zateplením		
Dřvl+Dř+SDK	474,3	0,0832

Hodnocení metody

Metoda udržuje vnitřní teplotu na konstantní hodnotě, což není reálné. Vnitřní teplota se mění v reakci na vnější okrajové podmínky a způsob užívání vnitřního prostoru.

Metoda také neuvažuje vnitřní zisky, které však mohou být u velmi zateplených konstrukcí významné. Z toho důvodu také pozitivně hodnotí konstrukce s vnitřním zateplením.

Fázový posun vypočítaný podle metodiky normy [11] vychází pro konstrukci CPP 600 19,0 hodin a pro konstrukci CPP 1200 14,1 hodin. Z hlediska tepelné setrvačnosti bychom mohli stěnu CPP 600 prohlásit za výhodnější. Pokud ale porovnáme výsledky ze simulace v dynamických simulačních programech, které jsou uvedeny následující kapitole 5.3.2, zjistíme, že ve skutečnosti je u stěny CPP 1200 o 24 hodin větší než podle metodiky normy [11]. Metodika počítá fázový posun v rozmezí vždy od 0 do 24 hodin, přestože skutečný fázový posun u velmi těžkých konstrukcí může být i vyšší. Metodika nepočítá špatně, ale je nutné rozumět hodnotám 0 – 24 hodin.

Hodnocení dle hodnot teplotního útlumu nadhodnocuje lehké konstrukce zateplené dřevovláknitou izolací v porovnání s velmi těžkými masivními konstrukcemi.

5.3 Numerické modelování tepelných charakteristik konstrukci

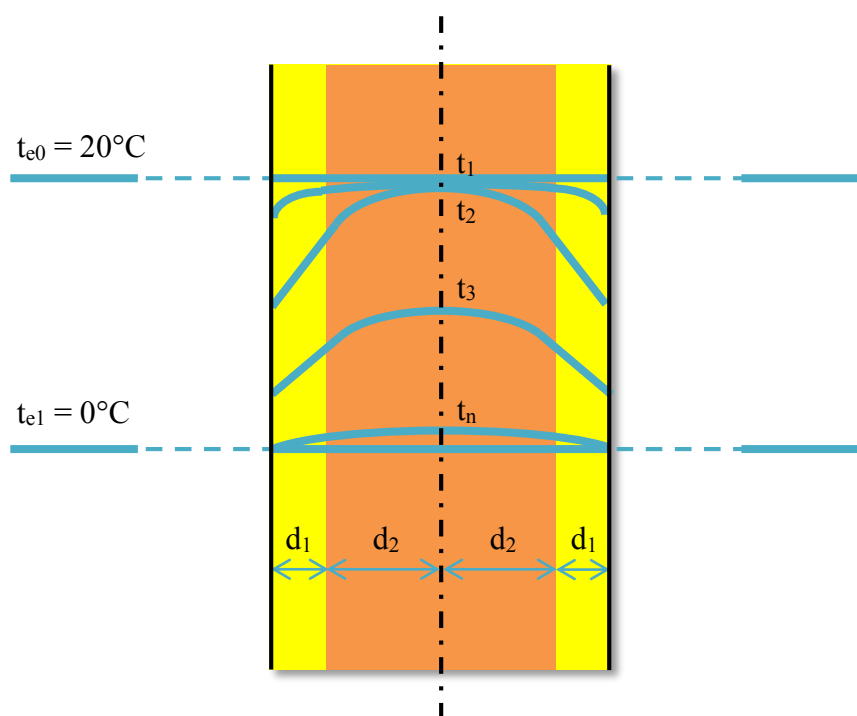
5.3.1 Doba chladnutí

Popis modelu

Doba do úplného vyhladnutí všech konstrukcí při skokové změně teploty je nekonečně dlouhá. Pokud chceme porovnávat dobu chladnutí jednotlivých konstrukcí, je nutné určit podmínku, kdy budeme tvrdit, že je dosaženo doby chladnutí. Výpočet se nejčastěji aplikuje na symetrické konstrukci podle vnitřního povrchu.

Pro výpočet byla použita počáteční ustálená teplota konstrukce a exteriéru, byla nastavena na 20°C . Následně byla v kroku 1 skokově změněna teplota okolního vzduchu na $t_{e1} = 0^{\circ}\text{C}$ a hledána doba v okamžiku, kdy byla splněna podmínka:

$$t_n - t_{e1} \leq 0,5^{\circ}\text{C}$$



Obrázek 10 – Schéma výpočtu doby chladnutí na symetrické konstrukci dle literatury [7]

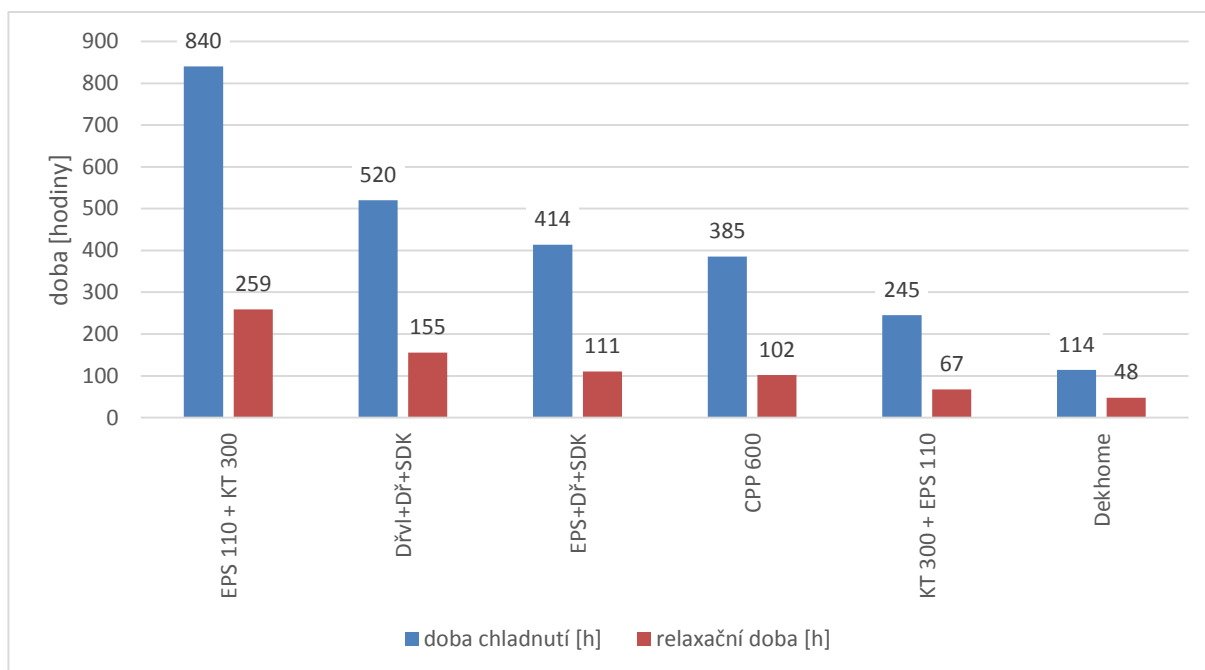
Doba chladnutí byla vypočítána v programu CalA, který byl mimo jiné analyticky verifikován autorem programu pro ověření neustáleného sdílení tepla přímo na příkladu symetrického chladnutí. Autor provedl srovnání s analytickou metodou vedení tepla v 1D symetrického chladnutí homogenní stěny uvedenou v kapitole 4.3. Rozdíl v teplotním průběhu po 6 hodinách chladnutí stěny řešeném analyticky a numericky programem CalA byl po celém průřezu menší než 0,01 K, čímž bylo prokázáno, že použitý software pro tyto účely vhodný.

Protože výpočet doby chladnutí v programu CalA je časově náročný, byl proveden výpočet pouze u reprezentantů jednotlivých kategorií konstrukcí. Pro porovnání je v tabulce 10 uvedena i relaxační doba a poměr „Doby chladnutí“ k „Relaxační době“.

Výsledky výpočtu

Tabulka 9 - Porovnání hodnot relaxační doby a doby chladnutí skladeb konstrukcí

Název konstrukce	Relaxační doba τ_0 [h]	Doba chladnutí [h]	Poměr Doby chladnutí k Relaxační době [-]
velmi těžké masivní konstrukce			
CPP 600	101 hod 42 min	385 hod	3,79
středně těžké konstrukce s vnějším zateplením			
EPS 110 + KT 300	259 hod 7 min	840 hod	3,24
středně těžké konstrukce s vnitřním zateplením			
KT 300 + EPS 110	67 hod 26 min	245 hod	3,63
lehké konstrukce s vnějším zateplením			
EPS+Dř+SDK	110 hod 33 min	414 hod	3,74
Dřvl+Dř+SDK	155 hod 21 min	520 hod	3,35
Dekhome	47 hod 46 min	114 hod	2,39



Graf 11 – Porovnání hodnot doby chladnutí a relaxační doby

Hodnocení výsledků

Doba chladnutí vychází největší pro konstrukce s vnějším zateplením. Proto i lehké zateplené konstrukce mají větší dobu chladnutí než velmi těžké masivní konstrukce. Lehké konstrukce a konstrukce s vnitřním zateplením vychází nejhůře.

Hodnocení modelu

Potvrdilo se, že doba chladnutí je poměrově ekvivalentní relaxační době. Pro porovnání konstrukcí není nutné provádět časově náročný výpočet doby chladnutí, ale je možné porovnat konstrukce dle relaxační doby. Doba chladnutí je několikrát větší než relaxační doba, je průměrně 3,4x větší než relaxační doba stejné konstrukce.

5.3.2 Fázový posun a teplotní útlum konstrukce

Výpočet pomocí programu CalA

V programu CalA byla provedena simulace konstrukcí se stejnými okrajovými podmínkami⁵, jako předpokládá ČSN EN ISO 13786. Teploty vnějšího vzduchu byly převzaty z ČSN 73 0540-3: Tabulka H.8 – Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období a intenzita globálního slunečního záření v denním průběhu. Hodnoty teploty vnějšího vzduchu jsou uvedeny v příloze tabulce C.1.

Teplota interiéru je konstantní 23°C. Záměrně byla zvolena teplota 23°C, což je průměrná teplota z teplot vnějšího vzduchu. Tato teplota vedla k rychlejšímu ustálení a to umožnilo počítat menší počet výpočetních kroků.

Výpočet byl proveden po 20 dnů v hodinovém korku, ale jelikož přesnost výsledků u velmi těžkých a těžkých konstrukcí byla malá v porovnání s analytickými metodami, byl použit kratší 15 min krok. Hodnoty vnější teploty pro kratší krok byly dopočítány vzorcem odvozeným z hodnot hodinového kroku:

$$t_i = 23 + 7 \cdot \sin\left(\frac{360}{n} \cdot i \cdot \pi\right); \quad ^\circ\text{C} \quad (39)$$

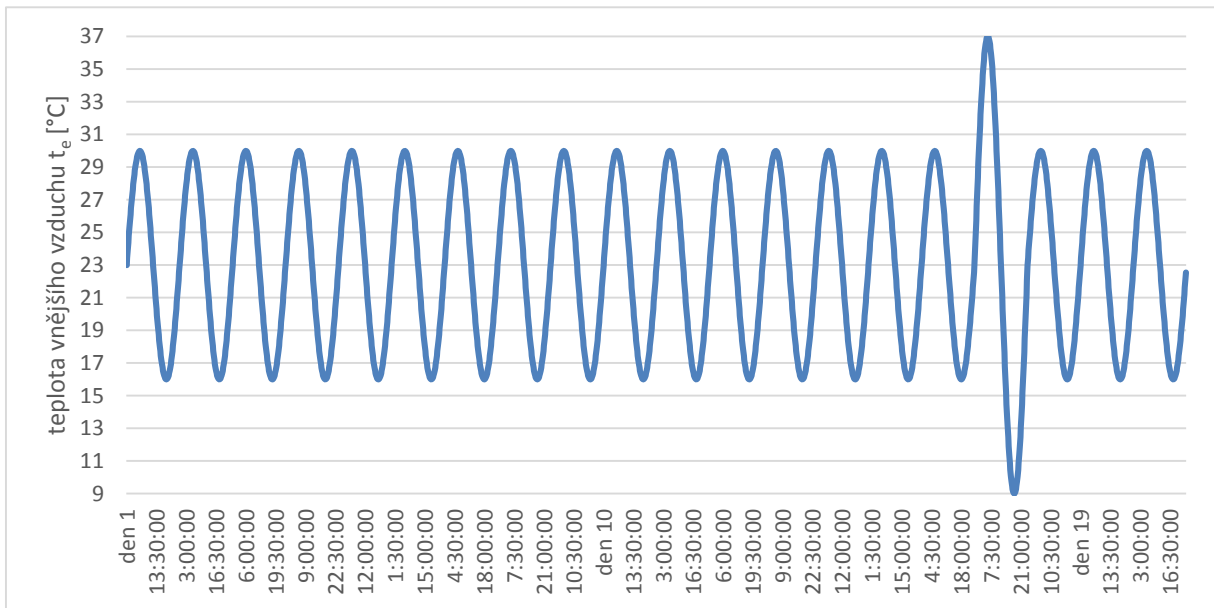
kde n je počet kroků za 24 hodin
 i $i = 1, 2, 3, \dots$

Pro rychlejší ustálení byla upravena počáteční hodnota teploty venkovního vzduchu na 23°C. Výpočtem na dvou konstrukcích bylo ověřeno, že tato modifikace okrajových podmínek nemá vliv na výsledky výpočtu, ale pouze urychluje ustálení a dovoluje tedy počítat menší počet výpočetních kroků.

Pro ověření, jestli jsou dynamické charakteristiky závislé na amplitudě teploty, byly provedeny simulace stejné sady konstrukcí s dvojnásobnou amplitudou venkovní teploty.

⁵ Teplota venkovního vzduchu je proměnná dle harmonického kmitání funkce sinus a teplota vnitřního vzduchu je konstantní.

V průběhu výpočtu vznikly nejasnosti, jestli je fázový posun u velmi těžkých a těžkých konstrukcí zateplených z exteriéru menší nebo větší než 24 hodin. Pro ověření fázového posunu byla upravena okrajová podmínka v 17 dnu tak, že amplituda teploty byla pouze pro tento den zdvojnásobena ze 7°C na 14°C. Díky tomu bylo možné definitivně určit fázový posun.



Graf 12 – Graf vnější teploty vzduchu pro výpočet teplotního útlumu a fázového posunu

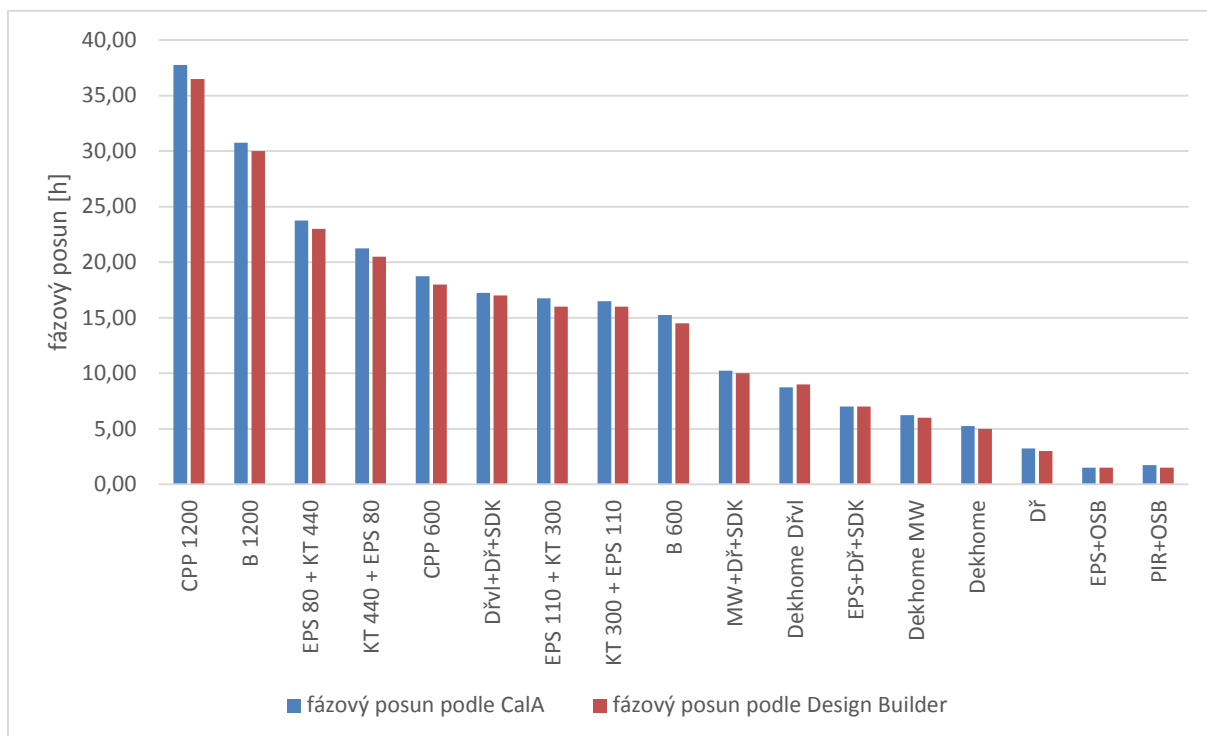
Výpočet pomocí programu Design Builder

Výpočet v programu Design Builder byl obdobný jako v programu CalA. Byla vymodelována místnost o vnitřních rozměrech 9x9x3 (ŠxDxV), ve které byla udržována konstantní teplota 23°C. Vnější okrajové podmínky byly totožné se simulací v programu CalA. Jelikož program počítá časově proměnné součinitele při přestupu tepla na povrchu konstrukce, byly fixně zadány hodnoty pro letní období stejně jako u simulace v programu CalA. Pro simulaci byly použity skladby z přílohy z tabulky B.1 Seznam konstrukcí.

Výsledky výpočtu pro fázový posun

Tabulka 10 – Fázový posun při prostupu tepla vypočítaný numerickým modelováním

Název konstrukce	fázový posun podle CaIA $\Delta\tau_f$ [h]	fázový posun podle Design Builder $\Delta\tau_f$ [h]
velmi těžké konstrukce		
CPP 1200	37,75	36,50
CPP 600	18,75	18,00
B 1200	30,75	30,00
B 600	15,25	14,50
těžké konstrukce s vnějším zateplením		
EPS 110 + KT 300	16,75	16,00
EPS 80 + KT 440	23,75	23,00
těžké konstrukce s vnitřním zateplením		
KT 300 + EPS 110	16,50	16,00
KT 440 + EPS 80	21,25	20,50
lehké konstrukce s vnějším zateplením		
EPS+Dř+SDK	7,00	7,00
MW+Dř+SDK	10,25	10,00
Dřvl+Dř+SDK	17,25	17,00
Dekhome	5,25	5,00
Dekhome MW	6,25	6,00
Dekhome Dřvl	8,75	9,00
velmi lehké konstrukce		
EPS+OSB	1,50	1,50
PIR+OSB	1,75	1,50
Dř	3,25	3,00



Graf 13 – Fázový posun porovnávaných konstrukcí vypočítaný různými metodami

Hodnocení výsledků fázového posunu numerickým modelováním

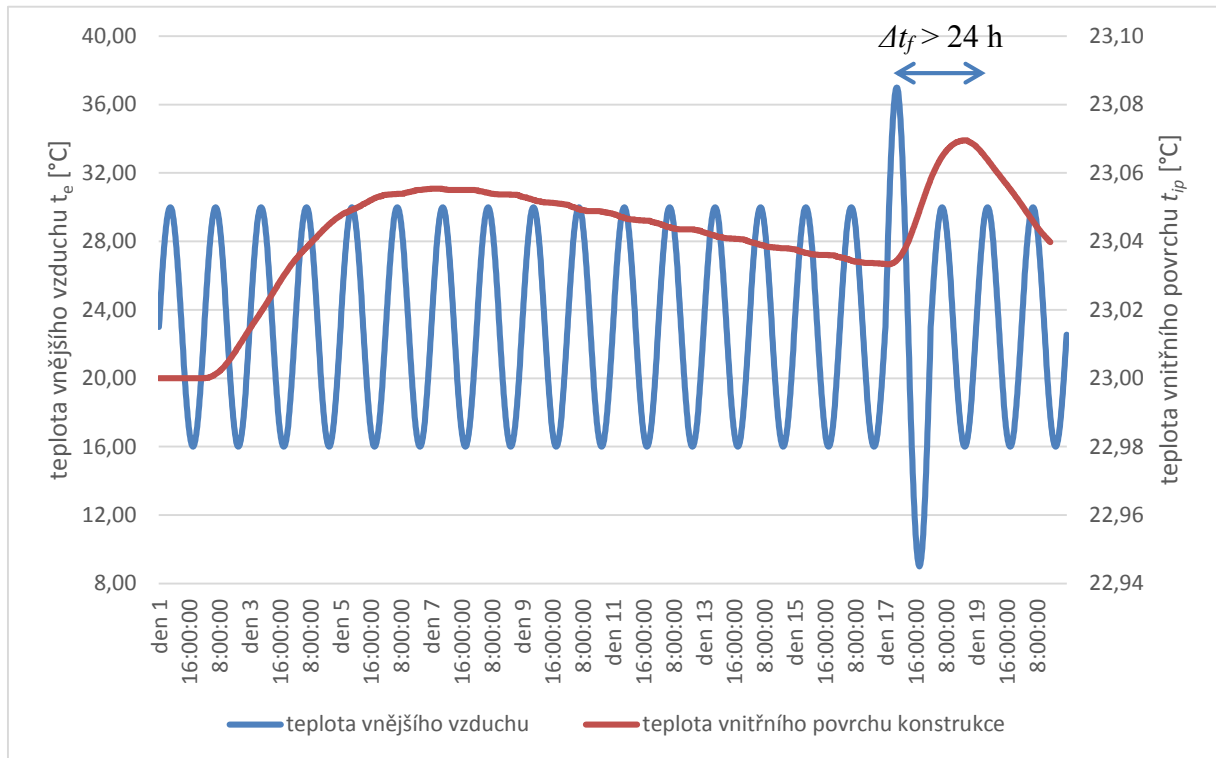
Porovnáním hodnot fázového posunu vypočítaných oběma programy byla zjištěna poměrně dobrá shoda.

- Výsledky simulace pomocí programu CalA odpovídají hodnotám vypočítaných dle metodiky normy ČSN EN ISO 13768. Výsledky simulace pomocí programu Design Builder vychází u masivních velmi těžkých konstrukcí přibližně o 1 hodinu méně. Tato nepřesnost je nejspíše způsobena hrubým hodinovým krokem výpočtu. Pro názorné porovnání hodnot fázového posunu různými metodami je doplněna tabulka níže.

Tabulka 11 – Porovnání hodnot fázového posunu různými metodami

Název konstrukce	fázový posun podle CalA $\Delta\tau_f$ [h]	fázový posun podle Design Builder $\Delta\tau_f$ [h]	fázový posun dle ČSN EN ISO 13786 $\Delta\tau_f$ [h]
CPP 600	18,75	18,00	18,96

- Vypočítáním hodnot fázového posunu metodou numerického modelování bylo zjištěno, že tato doba je u velmi těžkých masivních konstrukcí delší než 24 hodin. Bylo to ověřeno na odezvě zvýšené teploty v 17. dnu simulace, kdy byla sledována hodnota maxima teplotního kmitu na vnitřním povrchu konstrukce.



Graf 14 – Průběh teploty vnitřního povrchu při numerickém modelování v programu CalA pro konstrukci CPP 1200

Z grafu 14 vyplývá, že pro konstrukci CPP 1200 je odezva vnitřní povrchové teploty t_{ip} se zpožděním větším než 24 hodin. Je tedy dokázáno, že fázový posun u masivních velmi těžkých konstrukcí je větší než 24 hodin.

- Také je potvrzeno, že velikost amplitudy teploty vnějšího vzduchu nemá vliv na fázový posun.

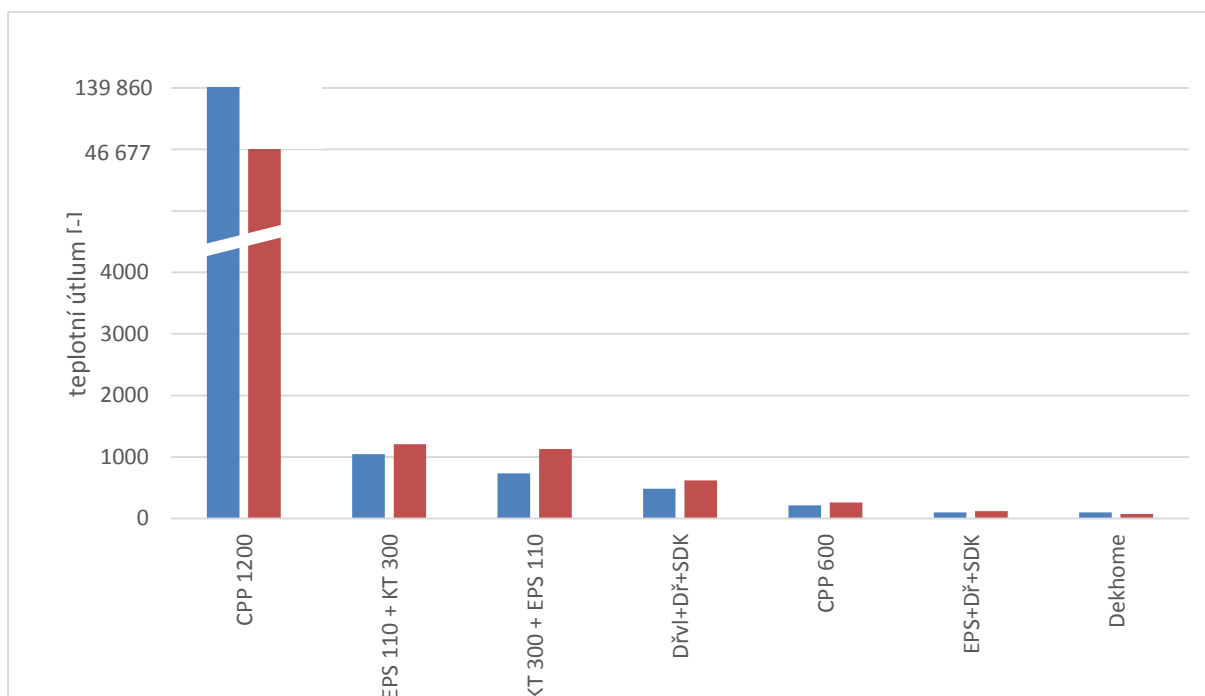
Hodnocení metody výpočtu fázového posunu numerickým modelováním

Výpočet fázového posunu numerickým modelováním s uvažováním s vnější teplotou dle grafu 12 bylo prokázáno, že reálná doba fázového posunu je u velmi těžkých masivních konstrukcí větší než 24 hodin.

Výsledky výpočtu teplotního útlumu

Tabulka 12 – Teplotní útlum konstrukcí vypočítaný numerickým modelováním

Název konstrukce	teplotní útlum podle CaA ν [-]	teplotní útlum podle Design Builder ν [-]
Velmi těžké masivní konstrukce		
CPP 1200	139 860,1	46 666,7
CPP 600	213,4	257,4
středně těžké konstrukce s vnějším zateplením		
EPS 110 + KT 300	1044,8	1206,9
středně těžké konstrukce s vnitřním zateplením		
KT 300 + EPS 110	733,0	1129,0
lehké konstrukce s vnějším zateplením		
EPS+Dř+SDK	98,9	116,7
Dřvl+Dř+SDK	481,1	619,5
Dekhome	96,6	70,7



Graf 15 – Teplotní útlum konstrukcí vypočítaný numerickým modelováním

Hodnocení výsledků teplotního útlumu numerickým modelováním

Bylo potvrzeno, že velikost amplitudy teploty vnějšího vzduchu nemá vliv teplotní útlum. Lze tedy tvrdit, že dynamické tepelné charakteristiky závisí na typu zatěžování, ale ne na amplitudě teploty. Teplotní útlum je tedy materiálová charakteristika vhodná pro porovnání konstrukcí.

Hodnocení metody výpočtu teplotního útlumu numerickým modelováním

- Při výpočtu vnitřních povrchových teplot dochází k velmi malým rozdílům. Program CalA exportuje výsledky s přesností na 4 desetinná místa, takže vzniká chyba při dělení velmi malých čísel, která způsobuje nepřesný výsledek teplotního útlumu při ručním dopočítání.
- Výsledky velmi těžkých masivních konstrukcí vypočítaných programem CalA jsou méně přesné také z důvodu neúplného ustálení teploty. Pro úplné ustálení by byl nutný několikrát větší počet kroků, než byl použit ve výpočtu, což by vedlo k dramatickému prodloužení doby simulace. V programu Design Builder tento problém nenastává, protože před spouštěním výpočtu se konstrukce nahřívá, dokud nedojde k ustálení vnitřních teplot.
- V této metodě je konstrukce zatěžována pouze teplotou, tato metoda neuvažuje vnitřní zisky, proto hodnotí pozitivně konstrukce s vnitřním zateplením.

5.4 Numerické modelování teplotního chování zabudovaných konstrukcí

Dynamické tepelné charakteristiky jsou velmi vhodné pro porovnání skladeb konstrukcí mezi sebou. Seřadí nám konstrukce dle tepelné setrvačnosti od nejvhodnějších po nejméně doporučené, ale neřeknou nám, jak velký přínos tyto konstrukce mají. Byla tedy provedena simulace v programu Design Builder, která zohlednila i sluneční záření.

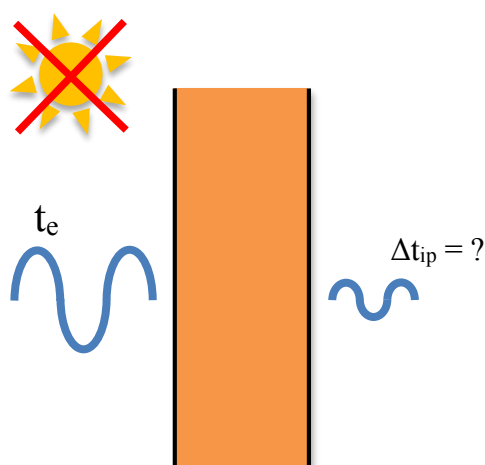
Popis Modelu

Byla sledována teplota na vnitřním povrchu v průběhu simulace a byl vyhledán maximální denní rozdíl teplot. Při výpočtu byly uvažovány dvě varianty okrajových podmínek.

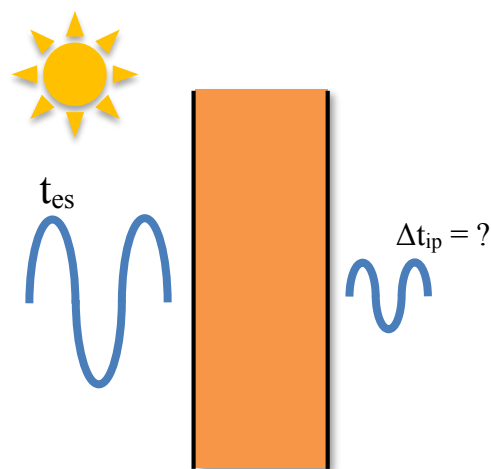
V první variantě byla vnější teplota jako harmonicky se měnící podle funkce sinus a teplota vnitřního vzduchu i vnitřního povrchu byla přirozenou reakcí na vnější teplotu. V druhé variantě byla vnější okrajová podmínka sluneční teplota, která zohledňuje i sluneční záření.

Sluneční teplota byla vypočítána pro jižní světovou stranu dle postupu popsáném v kapitole 4.3. Pro výpočet sluneční teploty byly použity hodnoty intenzity globálního slunečního záření pro jižní světovou stranu uvedené v příloze v tabulce C.1 a emisivita povrchu byla uvažována pro všechny konstrukce 0,9, což odpovídá tmavému drsnému povrchu.

VARIANTA 1 - návrhová
teplota pro léto



VARIANTA 2 – sluneční
teplota



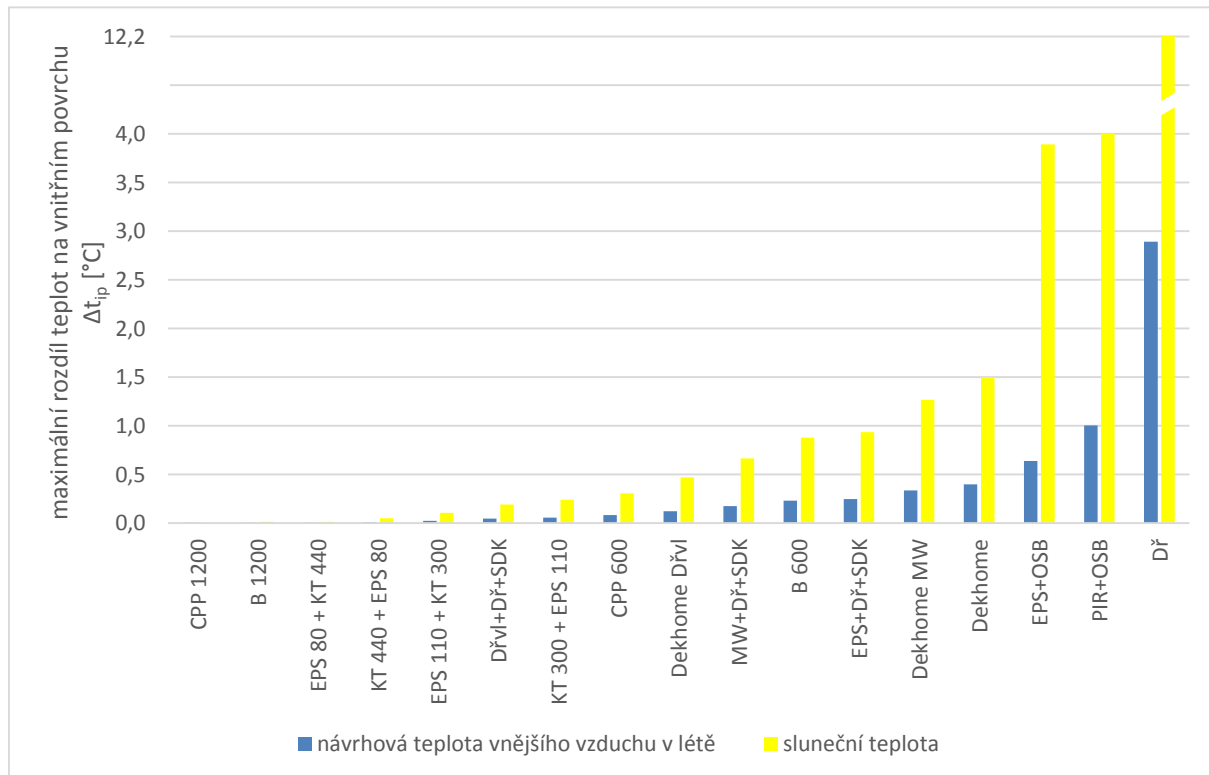
Obrázek 11 – Okrajové podmínky pro výpočet maximálního denního rozdílu teplot na vnitřním povrchu

Tabulka 13 – Maximální rozdíl teplot na vnitřním povrchu Δt_{ip} pro návrhovou vnější teplotu vzduchu v létě a pro sluneční teplotu

Název konstrukce	maximální rozdíl teplot na vnitřním povrchu Δt_{ip} [°C]	
	VARIANTA 1	VARIANTA 2
těžké masivní konstrukce		
CPP 1200	0,00	0,00
CPP 600	0,08	0,31
B 1200	0,00	0,01
B 600	0,23	0,88
středně těžké konstrukce s vnějším zateplením		
EPS 110 + KT 300	0,03	0,11

5. Teoretické hodnocení tepelných charakteristik konstrukcí a staveb

EPS 80 + KT 440	0,00	0,02
středně těžké konstrukce s vnitřním zateplením		
KT 300 + EPS 110	0,06	0,24
KT 440 + EPS 80	0,01	0,05
lehké konstrukce s vnějším zateplením		
EPS+Dř+SDK	0,25	0,94
MW+Dř+SDK	0,18	0,66
Dřvl+Dř+SDK	0,05	0,19
Dekhomet	0,40	1,50
Dekhomet MW	0,34	1,27
Dekhomet Dřvl	0,12	0,47
velmi lehké konstrukce		
EPS+OSB	0,64	3,89
PIR+OSB	1,01	4,01
Dř	2,89	12,20



Graf 16 – Maximální rozdíl teplot na vnitřním povrchu

Hodnocení výsledků

Z výsledků výpočtu dle této metodiky vyplývá, že obvodové konstrukce nemají zásadní vliv na teplotní stabilitu vnitřního prostředí, protože maximální teplotní rozdíly na vnitřním povrchu jsou u většiny konstrukcí velmi malé. Velmi těžké konstrukce a středně těžké konstrukce vykazují velmi malý, téměř neměřitelný, teplotní rozdíl na vnitřním povrchu. Lehké konstrukce s dřevovláknitou izolací mají také dobré výsledky, pouze velmi lehké konstrukce vykazují velký rozdíl teplot na vnitřním povrchu a prokazují tak dle očekávání malou tepelnou setrvačnost.

Za zmínku zde stojí porovnání masivních zděných a betonových konstrukcí s lehkými konstrukcemi zateplenými dřevovláknem. Konstrukce dřevěného panelu zateplená dřevovláknem má v tomto porovnání maximální rozdíl teplot vnitřního povrchu $\Delta t_{ip} = 0,19^{\circ}\text{C}$ a je tedy lepší než konstrukce z cihel plných pálených tloušťky 600 mm, která má $\Delta t_{ip} = 0,31^{\circ}\text{C}$ a betonová stěna tloušťky 600 mm, která má $\Delta t_{ip} = 0,88^{\circ}\text{C}$. Tyto konstrukce mají rozdílnou plošnou hmotnost a součinitel prostupu tepla U . Opět se potvrzuje, že tepelná vodivost má na tepelnou setrvačnost nezanedbatelný vliv a také dřevovláknitá izolace díky svým vyváženým materiálovým charakteristikám má velmi pozitivní vliv na tepelnou stabilitu konstrukcí.

Hodnocení modelu

Modelovaná varianta 1 zohledňuje pouze vliv venkovní teploty. Varianta 2 je již dokonalejší v tom, že zohledňuje vliv slunečního záření na obvodovou konstrukci. Teplotní chování reálné stavby však také závisí na dalších tepelných ziscích, jako jsou např. pasivní solární zisky okny, tepelné zisky od osob a zařízení, infiltrace vzduchu netěsností obálky a režim větrání, které však model nezohledňuje.

5.5 Numerické modelování teplotního chování reálné stavby

Pro bližší popsání chování reálné stavby byla provedena podrobná dynamická simulace v programu Design Builder. Byla simulována celá budova jako celek a výsledky byly zkoumány a porovnávány pro kancelář ředitele.

5.5.1 Způsob zadání

Veškeré časově proměnné hodnoty tepelných zisků a parametrů ovlivněných přítomností uživatelů byly v programu zadány časovým harmonogramem. Tento harmonogram respektoval pracovní dobu ve všední dny i víkendový provoz.

Konstrukce

Obvodové konstrukce a vnitřní dělicí konstrukce byly použity stejné jako v experimentálně měřené budově. Skladby konstrukcí jsou v příloze v tabulce B.1 a výkresy budovy v příloze F.

Okrajové podmínky

Vnější teplota vzduchu byla uvažována dle vlastního experimentálního měření. Průběh teploty je v příloze H.

Vnitřní teplota nebyla upravena okrajovou podmínkou, ale nechala se vyvíjet jako reakce na vnější okrajové podmínky a vnitřní tepelné zisky.

Pro hodinový průběh globálního a difúzního solárního záření byly použity data zapůjčená od ČHMÚ.

Součinitele při přestupu tepla byly vypočítány algoritmy z programu Design Builder. Pro vnitřní konvekci vzduchu byl použit algoritmus TARP a algoritmus DOE 2 pro vnější konvekci vzduchu.

Vnitřní tepelné zisky

Vnitřní zisky od osob pobývajících v kanceláři byly uvažovány tepelné zisky 123 W/osobu, což představuje lehkou práci v kanceláři, a hustotou 0,04 osob·m⁻². Časový podíl přítomnosti osob byl uvažován dle hodinového harmonogramu:

Tabulka 14 – Harmonogram časového podílu přítomnosti osob

čas	0:00 – 7:00	7:00 – 8:00	8:00 – 9:00	9:00 – 12:00	12:00 – 14:00	14:00 – 17:00	17:00 – 18:00	18:00 – 19:00	19:00 – 24:00	víkend
časový podíl přítomnosti osob	0	0,25	0,50	1,00	0,75	1,00	0,50	0,25	0	0

Vnitřní tepelné zisky z vybavení byly uvažovány $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ve všech místnostech. V kanceláři OZ byly uvažovány tepelné zisky $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ kvůli počítačovému serveru a z důvodu většího využití tiskárny. V kancelářích se počítače nevypínají přes noc a víkend, byl tedy použit harmonogram časového podílu provozu vybavení kanceláře:

Tabulka 15 – Časový podíl provozu vybavení kanceláře

čas	0:00 – 7:00	7:00 – 20:00	20:00 – 24:00	víkend
časový podíl provozu vybavení kanceláře	0,50	1,00	0,50	0,50

Tepelné zisky z osvětlení byly uvažovány jako $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na 100 lx. Pro osvětlení byl použit harmonogram časového podílu provozu osvětlení:

Tabulka 16 – Časový podíl provozu osvětlení

čas	0:00 – 7:00	7:00 – 20:00	20:00 – 24:00	víkend
časový podíl provozu osvětlení	0	1,00	0	0

Okna

Pro výpočet byly použity parametry okna s plastovým rámem a zasklením izolačním dvojsklem. Součinitel prostupu tepla výplně $U_w = 2,716 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, činitel propustnosti slunečního záření zasklením (Direct solar transmission) $g = 0,705$ a činitel prostupu světla (Light transmission) $\tau_v = 0,812$.

Stínění

Ve výpočtu bylo uvažováno se stíněním stavebním materiálem, který byl skladován v blízkosti budovy. Byl namodelován jako prostorový objekt (component block) odpovídající rozměrům skladovaného materiálu, který stíní přesně dle pohybu slunce na obloze.

Clonění

V oknech kanceláří byly uvažovány vnitřní žaluzie s vysoce reflektivními lamelami. Žaluzie byly umístěny ve vzdálenosti 15 mm od okna a šířky 25 mm a odrazivostí povrchu 0,8. Časový podíl spuštěných žaluzií byl použit dle harmonogramu:

Tabulka 17 – Časový podíl spuštěných žaluzií

čas	0:00 – 7:00	7:00 – 8:00	8:00 – 9:00	9:00 – 12:00	12:00 – 14:00	14:00 – 17:00	17:00 – 18:00	18:00 – 19:00	19:00 – 24:00	víkend
časový podíl spuštěných žaluzií	0	0,10	0,25	0,50	0,15	0,50	0,25	0,10	0	0,10

Větrání a infiltrace

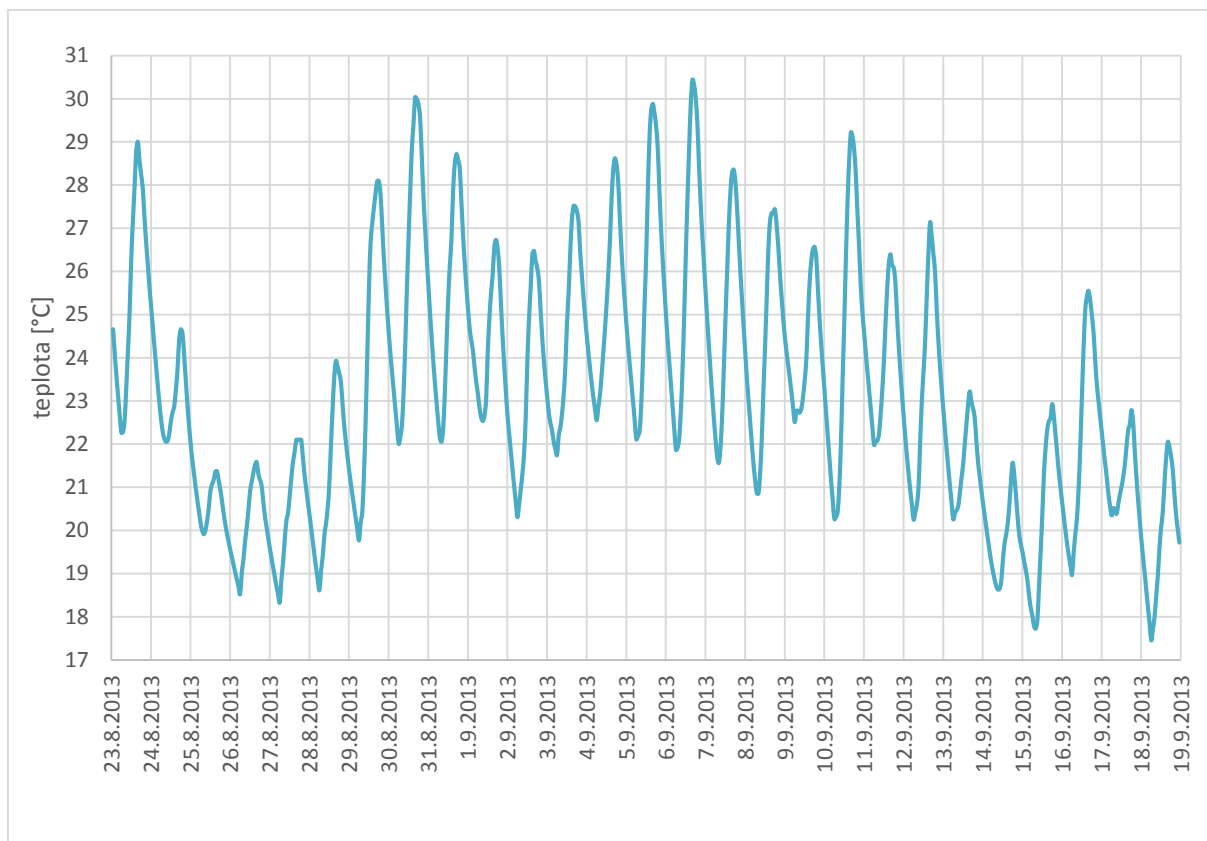
Infiltrace vzduchu netěsností obálky byla uvažována jako $0,1 \text{ h}^{-1}$. Větrání bylo uvažováno jako přirozené s intenzitou výměny vzduchu $0,4 \text{ h}^{-1}$, pro kancelář OZ byla použita intenzita výměny $0,9 \text{ h}^{-1}$ z důvodu většího počtu pracovníků a tedy i požadavku na čerstvý vzduch. Pro přirozené větrání byl použit časový harmonogram:

Tabulka 18 – Časový podíl přirozeného větrání

čas	0:00 – 7:00	7:00 – 8:00	8:00 – 9:00	9:00 – 12:00	12:00 – 14:00	14:00 – 17:00	17:00 – 18:00	18:00 – 19:00	19:00 – 24:00	víkend
časový podíl větrání	0	0,25	0,50	1,00	0,75	1,00	0,50	0,25	0	0

5.5.2 Výsledky simulace

Výsledkem simulace je průběh teplot vnitřního vzduchu v jednotlivých místnostech. Pro porovnání byla určena kancelář ředitele. Výsledný průběh teploty je v grafu 17.



Graf 17 – Průběh teploty vzduchu v kanceláři ředitele pro variantu I

5.5.3 Simulace dalších variant

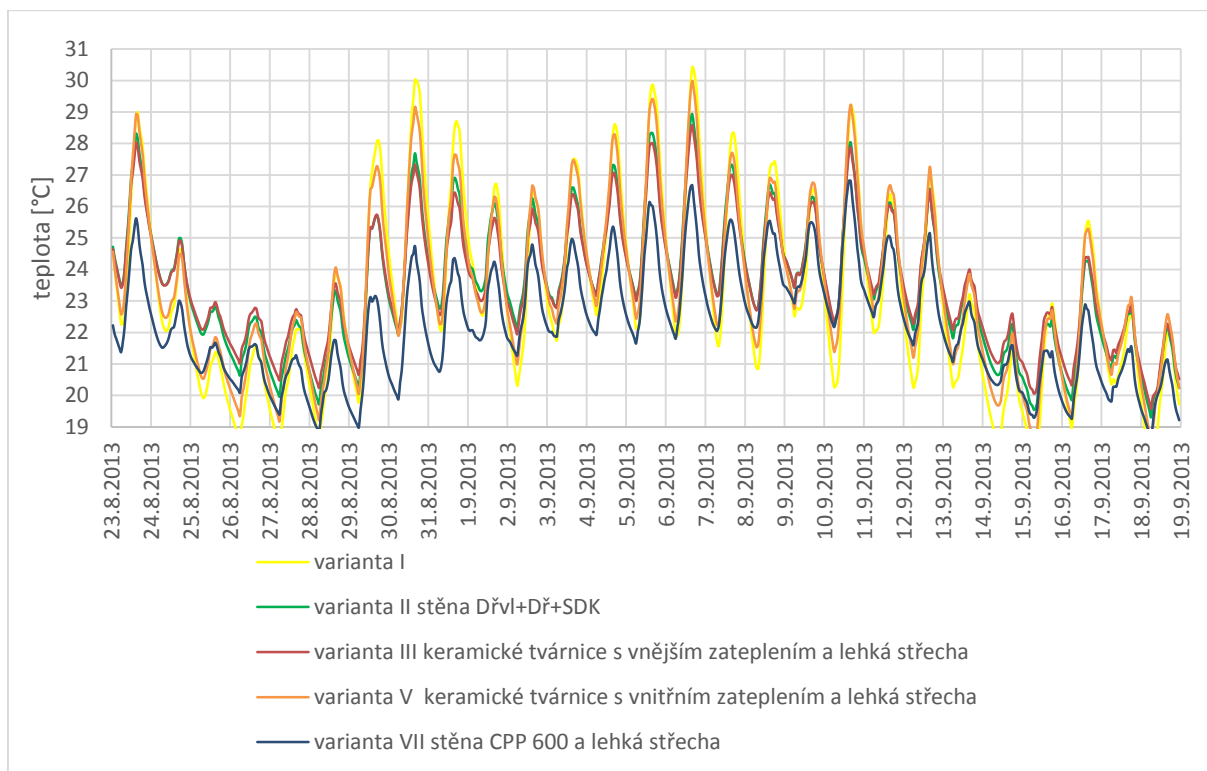
Byly vytvořeny další varianty a ty byly porovnány s původní variantou I. Skladby konstrukcí budovy ve Znojmě jsou v příloze v tabulce G.1 a G.2, porovnávané konstrukce obvodových stěn pro další varianty jsou v tabulkách B.1, B.2 a B.4.

Tabulka 19 – Další varianty numerického modelování teplotního chování

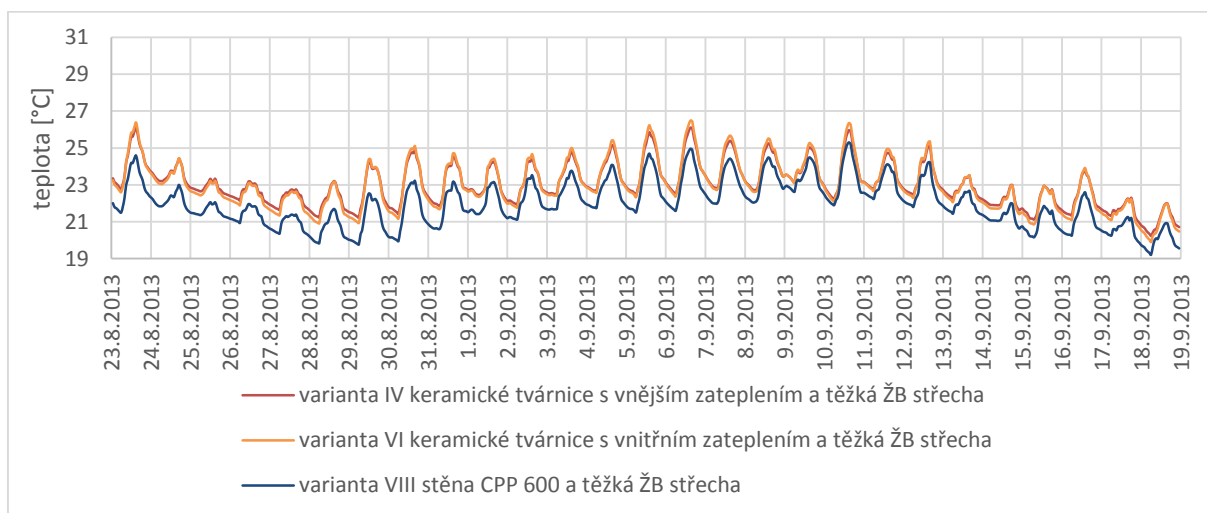
varianta	obvodová stěna	příčky	střecha
Varianta I	stěna Znojmo	příčky Znojmo	lehká střecha Znojmo
Varianta II	Dřvl+Dř+SDK	příčky Znojmo	lehká střecha Znojmo
Varianta III	EPS 110 + KT 300	příčky Znojmo	lehká střecha Znojmo
Varianta IV	EPS 110 + KT 300	příčky z KT	těžká ŽB střecha
Varianta V	KT 300 + EPS 110	příčky Znojmo	lehká střecha Znojmo
Varianta VI	KT 300 + EPS 110	příčky z KT	těžká ŽB střecha
Varianta VII	CPP 600	příčky Znojmo	lehká střecha Znojmo
Varianta VIII	CPP 600	příčky z KT	těžká ŽB střecha

Skutečný stav s uvažováním tepelných zisků

Byl uvažován stejný geometrický model budovy se stejným provozem a okrajovými podmínkami, byly pouze změněny konstrukce. V budově byly uvažovány stejné tepelné zisky a provoz jako v budově, ve které bylo provedeno experimentální měření.



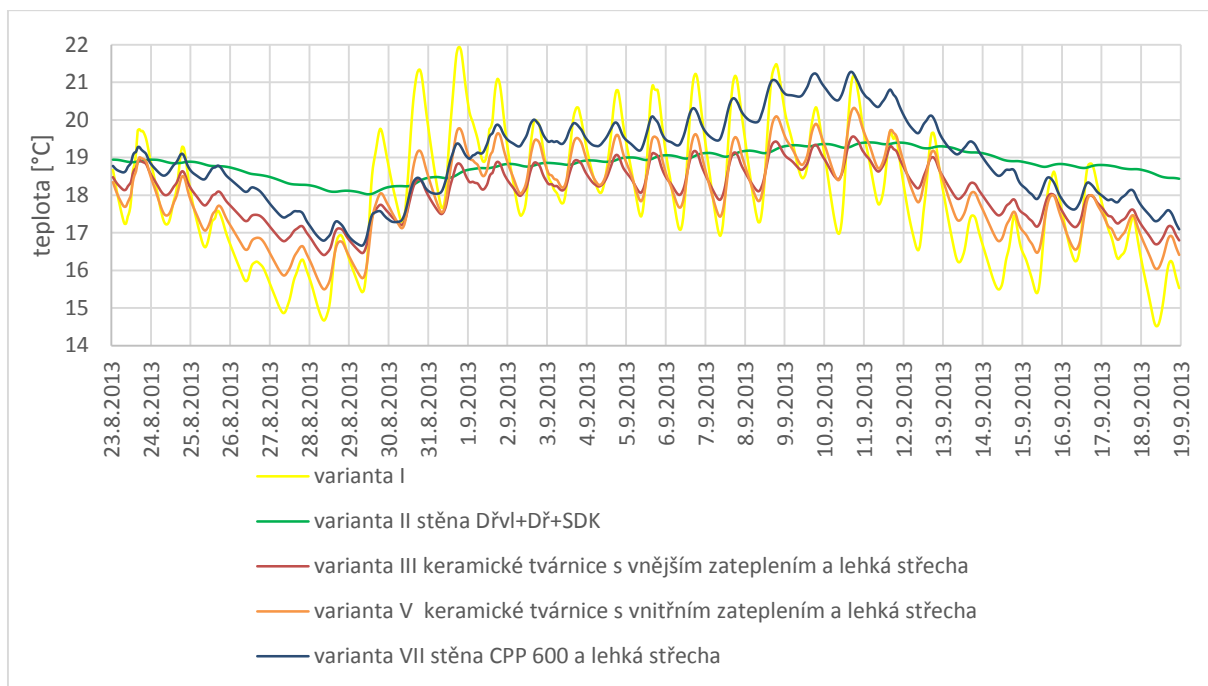
Graf 18 – Průběh teploty vnitřního vzduchu při uvažování tepelných zisků dle reálného užívání pro varianty s lehkou střechou



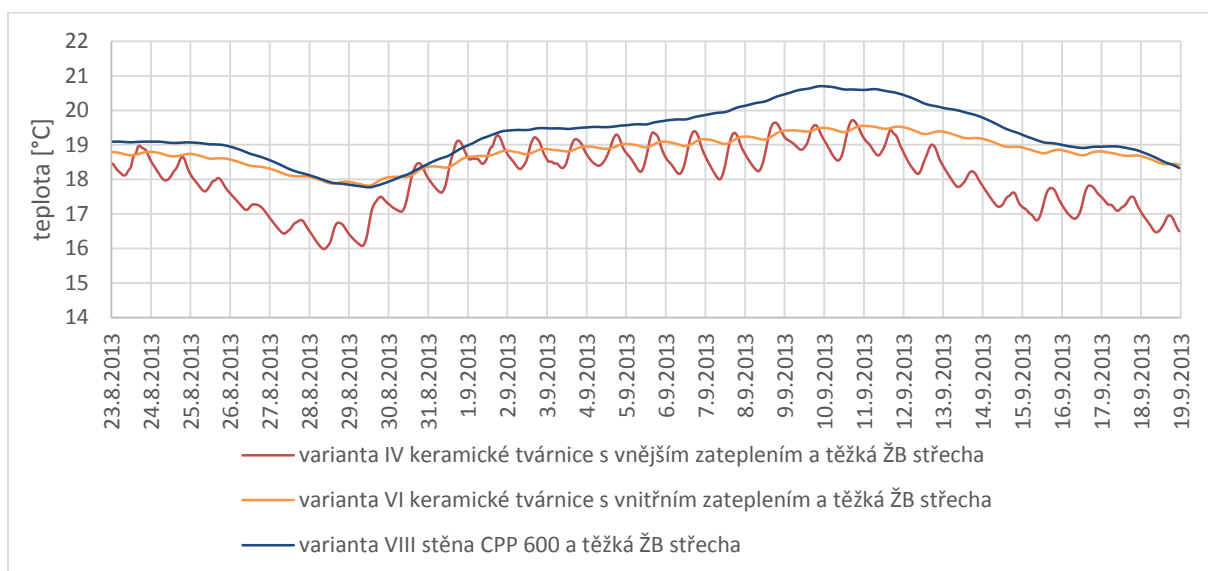
Graf 19 – Průběh teploty vnitřního vzduchu při uvažování tepelných zisků dle reálného užívání pro varianty s těžkou ŽB střechou

Hypotetický stav bez tepelných zisků

Dynamické tepelné charakteristiky neuvažují s tepelnými zisky, proto byly již simulované varianty uvažovány také bez tepelných zisků. Byly odstraněny okna a zrušeny vnitřní zisky. Teplota vnitřního vzduchu se vyvíjí jako reakce na teplotu vnějšího vzduchu.



Graf 20 – Průběh teploty vzduchu v kanceláři ředitele ve variantách s lehkou střechou bez uvažování tepelných zisků



Graf 21 – Průběh teploty vzduchu v kanceláři ředitele ve variantách s těžkou ŽB střechou bez uvažování tepelných zisků

5.5.4 Hodnocení konstrukcí

Tabulka 20 – Porovnání konstrukcí vypočítaných numerickým modelováním v pořadí od nejlepší po nejhorší, hodnotící kritérium je maximální teplota vnitřního vzduchu

pořadí	skutečný stav s uvažováním tepelných zisků		hypotetický stav bez tepelných zisků	
1	Varianta VIII	CPP 600 a těžká střecha	Varianta II	Dřvl + Dř + SDK a lehká střecha
2	Varianta IV	EPS 110 + KT 300 a těžká střecha	Varianta VI	KT 300 + EPS 110 a těžká střecha
3	Varianta VI	KT 300 + EPS 110 a těžká střecha	Varianta III	EPS 110 + KT 300 a lehká střecha
4	Varianta VII	CPP 600 a lehká střecha	Varianta IV	EPS 110 + KT 300 a těžká střecha
5	Varianta III	EPS 110 + KT 300 a lehká střecha	Varianta V	KT 300 + EPS 110 a lehká střecha
6	Varianta II	Dřvl + Dř + SDK a lehká střecha	Varianta VIII	CPP 600 a těžká střecha
7	Varianta V	KT 300 + EPS 110 a lehká střecha	Varianta VII	CPP 600 a lehká střecha
8	Varianta I	stěna Znojmo a lehká střecha	Varianta I	stěna Znojmo a lehká střecha

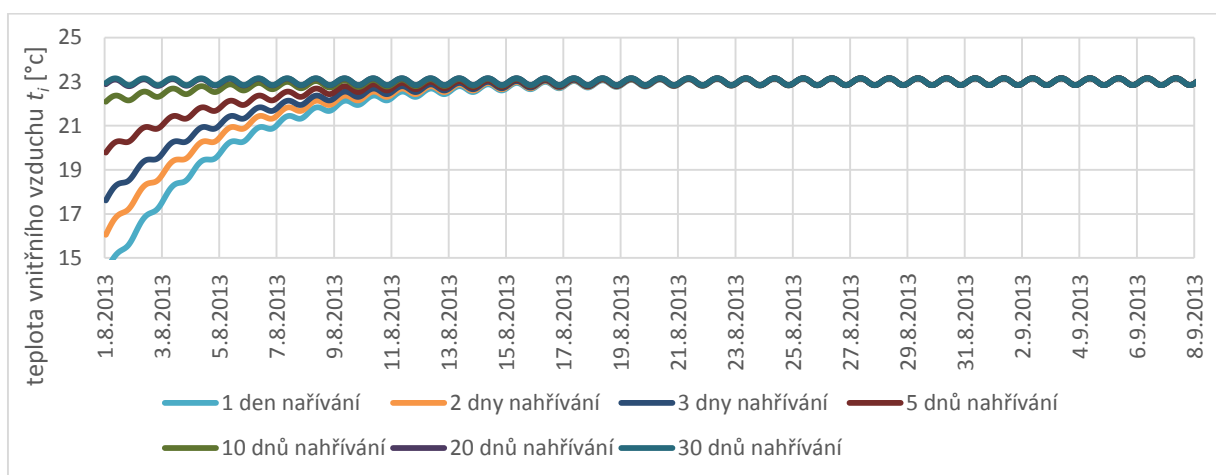
Hodnocení výsledků simulace

- V obou variantách vychází nejhůře varianta I. Obvodové konstrukce jsou velmi lehké tvořené z největší části z tepelné izolace a vzduchové mezery. Teplota vnitřního vzduchu v místnosti tedy kolísá s velkými teplotními rozdíly. Pokud na několik dní výrazně klesne teplota vnějšího vzduchu, téměř okamžitě klesne i teplota vnitřního vzduchu.
- Umístění Varianty II při simulaci s uvažováním tepelných zisků ukazuje, že lehká konstrukce s izolací z dřevovlákná má výrazně pozitivní vliv na teplotní rozdíl vnitřního vzduchu, sama však nezajistí výbornou tepelnou stabilitu. Horší je pouze varianta V se stěnou KT 300 + EPS 110 z keramických tvárnic s vnitřním zateplením a původní varianta I.
- V simulaci bez tepelných zisků je varianta II hodnocena jako nejlepší.

- Nejlépe vychází varianty VIII a IV. Velmi těžká masivní stěna CPP 600 a těžká stěna s vnějším zateplením v kombinaci s těžkou ŽB střechou s vnějším zateplením zajistí dobrou tepelnou stabilitu vnitřního vzduchu.
- Výsledky simulace bez tepelných zisků říkají, že rozdíly teploty vnitřního vzduchu ve variantách s lehkými konstrukcemi jsou větší než u těžkých konstrukcí. Z hlediska porovnání maximální teploty vnitřního vzduchu vychází velmi těžká masivní stěna CPP 600 hůře než lehká konstrukce s vnější tepelnou izolací z dřevovláknna.

Hodnocení výpočetní metody

- Výpočetní model popisuje tepelné chování nejdokonaleji, protože všechny dosud zmíněné metody výpočtu a porovnání konstrukcí z hlediska tepelné stability nezohledňují vnitřní a solární tepelné zisky.
- Výchozí teplota vnitřního vzduchu pro simulaci v Programu Design Builder je vypočítána cyklickým nahříváním okrajovými podmínkami pro první den simulace. Počet dnů nahřívání (Warm up day) je dán jejich minimálním a maximálním počtem a také splněním podmínky konvergence teploty. Při nesprávném zadání minimálního a maximálního počtu přehřívacích dnů hrozí chyba výpočtu a špatná interpretace výsledků. Pro těžké konstrukce s vnějším zateplením při zatěžování průběhem teploty z tabulky C.1 a malým počtem přehřívacích dnů dochází k výpočtu vyšší výchozí teploty vnitřního vzduchu. Pro lehké konstrukce a konstrukce s vnitřním zateplením při stejném zatížení dochází k výpočtu nižší výchozí teploty vnitřního vzduchu.



Graf 22 – Výchozí teplota vnitřního vzduchu lehké konstrukce dle počtu dnů nahřívání, vnější teplota vzduchu je v příloze C dle tabulky C.1

5.6 Závěrečné hodnocení konstrukcí

Všechny výše hodnocené metodiky tepelných charakteristik konstrukcí byly porovnány v tabulce 21. Sledované konstrukce jsou barevně vyznačeny:

- velmi těžká masivní konstrukce z cihel plných pálených;
- středně těžká konstrukce s vnějším zateplením;
- středně těžká konstrukce s vnitřním zateplením;
- lehká konstrukce se zateplením dřevovláknitými deskami;

Tabulka 21 – Závěrečné hodnocení konstrukcí

pořadí	doba chladnutí τ [h]	relaxační doba τ_0 [h]	fázový posun podle CaIA Δt_f [h]	fázový posun podle Design Builder Δt_f [h]	fázový posun dle ČSN EN ISO 13786 Δt_f [h]
1	EPS 110 + KT 300	CPP 1200	CPP 1200	CPP 1200	KT 440 + EPS 80
2	Dřvl+Dř+SDK	EPS 80 + KT 440	B 1200	B 1200	CPP 600
3	EPS+Dř+SDK	B 1200	EPS80 + KT 440	EPS80 + KT 440	Dřvl+Dř+SDK
4	CPP 600	EPS 110 + KT 300	KT 440 + EPS 80	KT 440 + EPS 80	EPS 110 + KT 300
5	KT 300 + EPS 110	Dřvl+Dř+SDK	CPP 600	CPP 600	KT 300 + EPS 110
6	Dekhome	KT440 + EPS80	Dřvl+Dř+SDK	Dřvl+Dř+SDK	B 600
7		MW+Dř+SDK	EPS 110 + KT 300	EPS 110 + KT 300	CPP 1200
8		EPS+Dř+SDK	KT300 + EPS 110	KT 300 + EPS 110	MW+Dř+SDK
9		CPP 600	B 600	B 600	Dekhome Dřvl
10		B 600	MW+Dř+SDK	MW+Dř+SDK	EPS+Dř+SDK
11		KT300+EPS110	Dekhome Dřvl	Dekhome Dřvl	B 1200
12		Dekhome Dřvl	EPS+Dř+SDK	EPS+Dř+SDK	Dekhome MW
13		Dekhome MW	Dekhome MW	Dekhome MW	Dekhome
14		Dekhome	Dekhome	Dekhome	Dř
15		PIR+OSB	Dř	Dř	PIR+OSB
16		EPS+OSB	PIR+OSB	PIR+OSB	EPS+OSB
17	Dř	EPS+OSB	EPS+OSB	EPS80+KT440	

5. Teoretické hodnocení tepelných charakteristik konstrukcí a staveb

pořadí	faktor útlumu $f[-]$	útlum CalA $v[-]$	útlum Design Builder $v[-]$	útlum dle ČSN 73 0540-4 $v[-]$	akumulovatelná energie E_m [kJ/m ²]
1	CPP 1200	CPP 1200	CPP 1200	CPP 1200	CPP 1200
2	B 1200	EPS 110 + KT 300	EPS 110 + KT 300	EPS 80 + KT 440	EPS 110 + KT 300
3	EPS 80 + KT 440	KT 300 + EPS 110	KT 300 + EPS 110	KT 440 + EPS 80	B 1200
4	KT 440 + EPS 80	Dřvl+Dř+SDK	Dřvl+Dř+SDK	B 1200	EPS 80 + KT 440
5	EPS 110 + KT 300	CPP 600	CPP 600	EPS 110 + KT 300	Dřvl+Dř+SDK
6	CPP 600	EPS+Dř+SDK	EPS+Dř+SDK	KT 300 + EPS 110	CPP 600
7	KT 300 + EPS 110	Dekhome	Dekhome	Dřvl+Dř+SDK	MW+Dř+SDK
8	B 600			CPP 600	EPS+Dř+SDK
9	Dřvl+Dř+SDK			Dekhome Dřvl	Dekhome MW
10	Dekhome Dřvl			MW+Dř+SDK	Dekhome
11	EPS+Dř+SDK			Dekhome MW	Dekhome Dřvl
12	MW+Dř+SDK			EPS+Dř+SDK	B 600
13	Dekhome MW			Dekhome	PIR+OSB
14	Dekhome			B 600	EPS+OSB
15	Dř			EPS+OSB	Dř
16	PIR+OSB			PIR+OSB	KT 440 + EPS 80
17	EPS+OSB			Dř	KT 300 + EPS 110

5. Teoretické hodnocení tepelných charakteristik konstrukcí a staveb

pořadí	běžná teplota t_{ip} [°C]	sluneční teplota t_{ip} [°C]	Numerické modelování teplotního chování	
			bez tepelných zisků	s tepelnými zisky
1	CPP 1200	CPP 1200	Dřvl + Dř + SDK	CPP 600
2	B 1200	B 1200	EPS 110 + KT 300	EPS 110 + KT 300
3	EPS 80 + KT 440	EPS 80 + KT 440	KT 300 + EPS 110	Dřvl + Dř + SDK
4	KT 440 + EPS 80	KT 440 + EPS 80	CPP 600	KT 300 + EPS 110
5	EPS 110 + KT 300	EPS 110 + KT 300	stěna Znojmo	stěna Znojmo
6	Dřvl+Dř+SDK	Dřvl+Dř+SDK		
7	KT 300 + EPS 110	KT 300 + EPS 110		
8	CPP 600	CPP 600		
9	Dekhome Dřvl	Dekhome Dřvl		
10	MW+Dř+SDK	MW+Dř+SDK		
11	B 600	B 600		
12	EPS+Dř+SDK	EPS+Dř+SDK		
13	Dekhome MW	Dekhome MW		
14	Dekhome	Dekhome		
15	EPS+OSB	EPS+OSB		
16	PIR+OSB	PIR+OSB		
17	Dř	Dř		

6. Experimentální měření

6.1 Cíl měření

Aby bylo možné ověřit výsledky výpočtu programu Design Builder, bylo provedeno experimentální měření teplot vzduchu ve vnitřním prostředí a teploty venkovního vzduchu. Změřené okrajové podmínky byly použity pro výpočet v simulačním programu, aby bylo možné porovnat výsledky simulace s měřením.

6.2 Výběr objektu pro experimentální měření

6.2.1 Kritéria pro výběr objektu

Budova byla vybrána z několika důvodů. Prvním důvodem byla informace od uživatelů budovy, že budova trpí na letní přehřívání a v zimě rychle prochladá. Druhým důvodem byla informace, že má lehké obvodové konstrukce. Třetím důvodem pro tuto lokalitu byl fakt, že se nachází v blízkosti meteorologické stanice, na které se měří oddělené složky slunečního záření. Pro výpočet v simulačním programu bylo nutné získat jednotlivé složky intenzity slunečního záření, které jsou dostupné u ČHMÚ jen na 6 místech ČR. Z toho důvodu byl objekt vybrán právě ve Znojmě. Bylo využito zapůjčených klimatických dat od ČHMÚ z meteorologické stanice Kuchařovice, která se nachází 3 km vzdušnou čarou od měřené budovy.



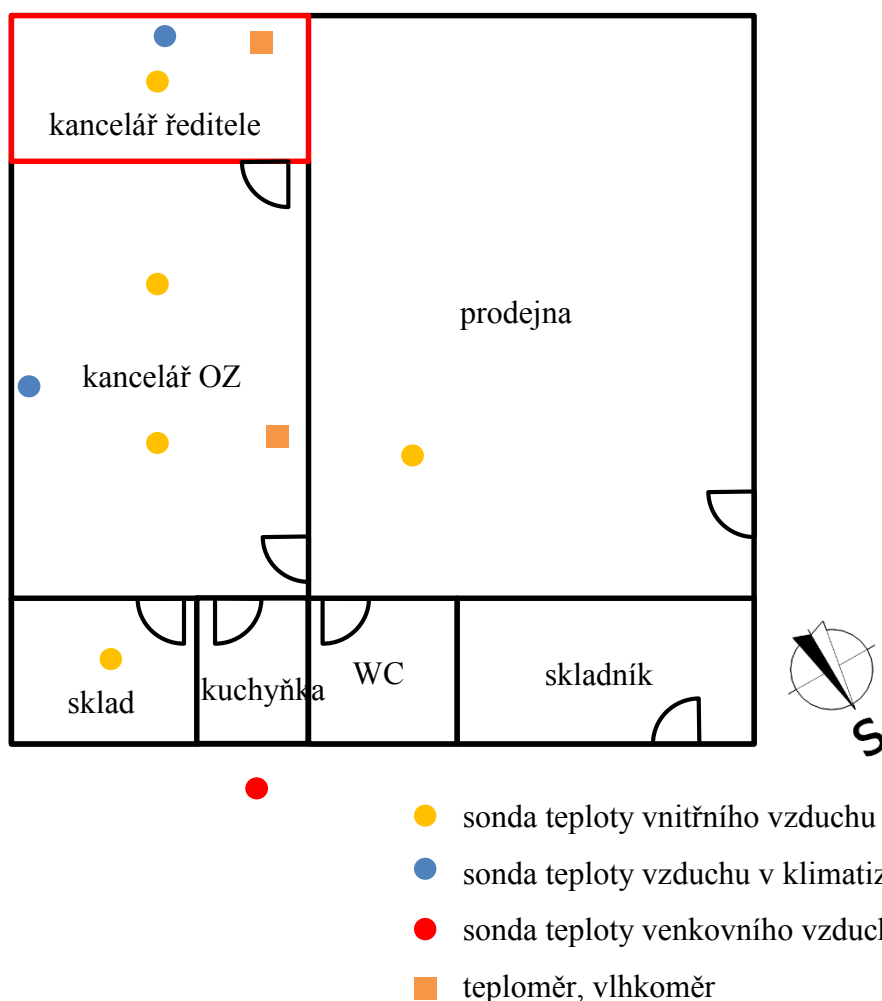
Obrázek 12 – Experimentální měření budovy ve Znojmě

6.2.2 Popis vybraného objektu

Pro experimentální měření byla vybrána jednopatrová budova postavena z obytných kontejnerů. Je využívána jako kancelář ředitele a obchodních zástupců a jako prodejna stavebních materiálů. Nachází se v areálu stavebnin firmy DEKTRADE ve Znojmě. Budova je postavena spojením 12 kontejnerů o rozměrech 3,0 x 6,0 x 3,15 m a svým uspořádáním tvoří půdorys 15 x 15 m. Nosnou konstrukcí kontejnerů jsou ocelové nosníky, mezi kterými je tepelná izolace z minerální vlny a z části vzduchová mezera. Z vnější strany tvoří plášť ocelový plech se světle šedým nátěrem, vnitřní strana je tvořena sádkartonovými deskami. Podrobný výpis skladeb konstrukcí je v příloze v tabulce G.1.

6.3 Měřicí zařízení

V měřené budově byly instalovány teplotní čidla číselné záznamníky. Typ a parametry všech měřících zařízení jsou popsány podrobně v příloze D.



Obrázek 13 – Schéma umístění čidel teploty při experimentálním měření

6.4 Výsledky experimentálního měření

Čidla pro experimentální fyzikální měření byla instalována 22. 8. 2013 a byla odstraněna po dokončeném měření 27. 9. 2013. Vlastní měření tedy probíhalo od 23. 8. 2013 do 26. 9. 2013. Jelikož ČHMÚ poskytuje limitované množství klimatických dat studentům pro účely vypracování školní práce, byla poskytnuta data pouze v období od 23. 8. 2013 do 19. 9. 2013. Toto období je tedy výchozí pro všechny porovnání a dynamické simulace.

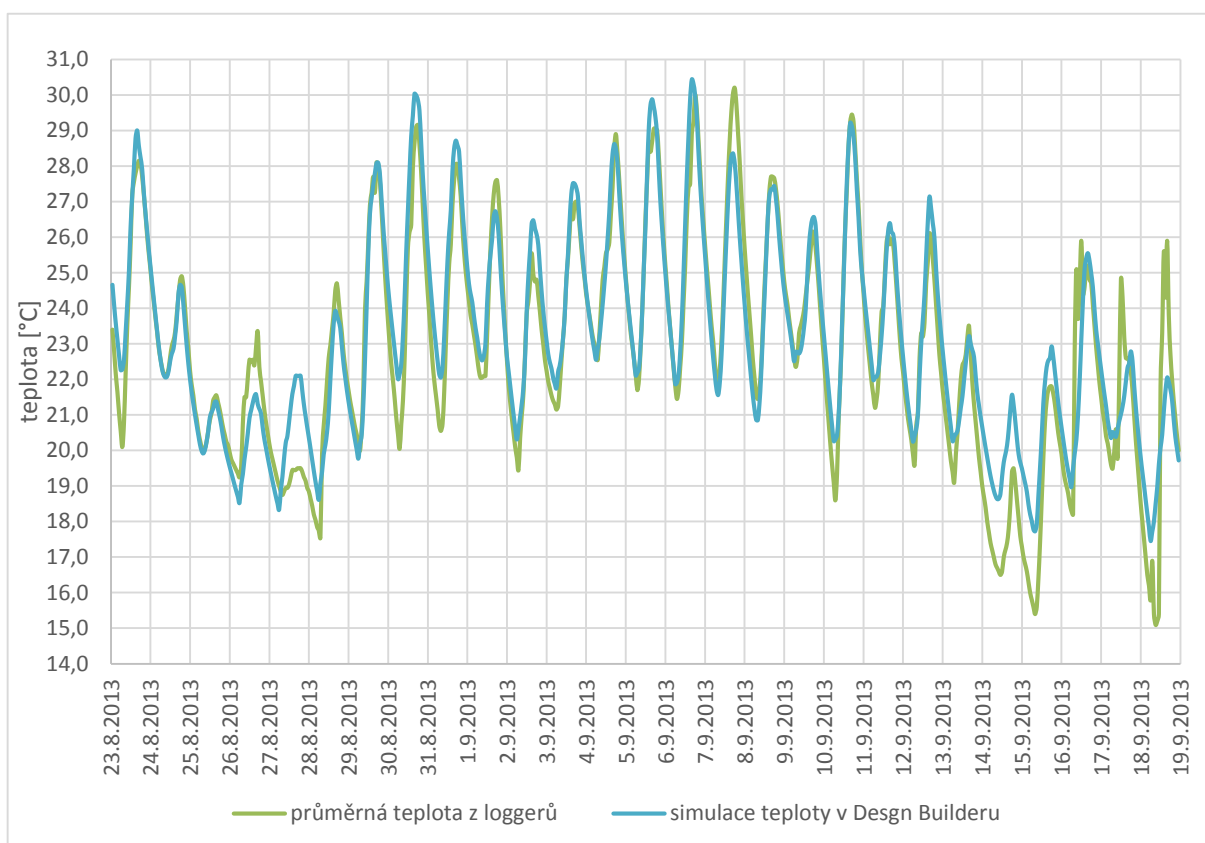
Pro experiment byla určena kancelář ředitele, která je na obrázku 13 zvýrazněna červeně, měřicí přístroje byly však umístěny pro kontrolu i ve všech okolních místnostech. Bylo provedeno vlastní měření teploty vnitřního a venkovního vzduchu. V budově bylo rozmístěno celkem 8 teplotních sond napojených do 2 čtyř kanálových záznamníků a 2 přenosné záznamníky pro měření teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu. Od ČHMÚ bylo zažádáno o tři veličiny z meteorologické stanice Kuchařovice:

1. teplota venkovního vzduchu, pro ověření vlastního měření teploty venkovního vzduchu t_e [°C];
2. intenzita globálního slunečního záření $RGLB$ [$W \cdot m^{-2}$];
3. intenzita difúzního slunečního záření $RDIF$ [$W \cdot m^{-2}$].

Výsledkem měření jsou tedy dva soubory dat. Soubor dat s vnějšími okrajovými podmínkami pro zadání okrajových podmínek do simulačního programu. Druhý soubor dat s teplotami vnitřního vzduchu je určen pro porovnání s výsledky simulačního programu. Kompletní výsledky měření jsou v příloze H.

7. Validace teoretických modelů experimentem

Výsledky experimentálního měření teploty vnitřního vzduchu potvrdily výsledky numerického modelování. Došlo k velmi dobré shodě výsledků simulace a experimentálního měření. Odchylka mezi teplotou simulace a měření je téměř vždy menší než přesnost měřícího zařízení. Výše uvedená metoda hodnocení konstrukcí numerickým modelováním teplotního chování v kapitole 5.5 je tedy platná a odpovídá realitě.



Graf 23 – Validace teploty vnitřního vzduchu v kanceláři ředitele numerickým modelováním teplotního chování experimentálním měřením

8. Závěry pro technickou praxi

8.1 Metody pro hodnocení tepelné stability konstrukcí a budov

Součinitel teplotní vodivosti stavebních materiálů

Materiály, které mají nízkou hodnotu teplotní vodivosti lze aplikovat pro jednovrstvé zdivo. Patří mezi ně materiály, které mají vyvážené vlastnosti (např. dřevovláknitá izolace, dřevo a keramické tvárnice). Neznamena však, že tyto materiály jsou nejvhodnější pro použití ve všech situacích. U vícevrstvé konstrukce je žádoucí, aby vnitřní vrstva měla vysokou hodnotu součinitele teplotní vodivosti a vnější vrstva co nejmenší. Vysoká hodnota na vnitřním povrchu zajistí rychlé ukládání a uvolňování energie do vnitřního prostředí. Nízká hodnota na vnějším povrchu naopak přispěje k tepelné setrvačnosti, kdy zpomalí zisk a ztrátu energie z vnitřního prostředí.

Měrná akumulovaná energie

Metodika hodnotí pouze potenciál materiálu jaké množství tepla je schopen přijmout nebo odevzdat při změně teploty. Tato metoda vůbec nezohledňuje rychlost výměny tepla. Doba, za kterou výměna tepla proběhne, není u všech materiálů stejná.

Relaxační doba a doba chladnutí

Potvrdilo se, že doba chladnutí je poměrově ekvivalentní relaxační době. Pro porovnání konstrukcí není nutné provádět časově náročný výpočet doby chladnutí, ale je možné porovnat konstrukce dle relaxační doby. Vysokých hodnot relaxační doby dosahují velmi těžké masivní konstrukce a naopak nízkých hodnot lehké konstrukce. Také není překvapením, že konstrukce s vnitřním zateplením mají kratší relaxační dobu než konstrukce s vnějším zateplením. Zajímavým výsledkem je však to, že lehké zateplené konstrukce z dřevěných panelů (Dřvl+Dř+SDK) mají delší relaxační dobu než těžké konstrukce z betonu a cihly plně pálené.

Potenciál vnitřních vrstev konstrukce akumulovat teplo

Velmi těžké konstrukce nevychází výrazně lépe než středně těžké a lehké konstrukce. Potenciál konstrukce pro akumulaci tepla závisí nejvíce na pozici tepelné izolace. Výsledky

potvrzují, že při vnějším zateplení zajistí sádkartonová deska s dřevěným panelem dostatečnou tepelnou akumulaci v porovnání s omítnutou keramickou tvárnici.

Fázový posun

Přestože výpočtová metodika dle ČSN EN ISO 13786 počítá fázový posun od 0 do 24 hodin, numerickým modelováním bylo dokázáno, že reálná doba fázového posunu velmi těžkých konstrukcí je díky jejich hmotě větší než 24 hodin.

Teplotní útlum

Bylo potvrzeno, že velikost amplitudy teploty vnějšího vzduchu nemá vliv hodnotu teplotního útlumu.

Teplotní útlum není vhodný pro porovnání konstrukcí, protože metoda neuvažuje vnitřní zisky, a hodnotí tedy pozitivně konstrukce s vnitřním zateplením a lehké konstrukce zateplené dřevovláknitými deskami.

Faktor útlumu

Porovnání konstrukcí podle faktoru útlumu f nedává stejné výsledky jako porovnání podle teplotního útlumu v . Faktor útlumu lépe hodnotí masivní velmi těžké konstrukce v porovnání s lehkými konstrukcemi s vnějším zateplením.

Numerické modelování teplotního chování zabudovaných konstrukcí

Z výsledků výpočtu dle této metodiky vyplývá, že obvodové konstrukce nemají zásadní vliv na teplotní stabilitu vnitřního prostředí, protože maximální teplotní rozdíly na vnitřním povrchu jsou u většiny konstrukcí velmi malé. Pouze velmi lehké konstrukce vykazují velký rozdíl teplot na vnitřním povrchu a prokazují tak dle očekávání malou tepelnou setrvačnost. Výsledky při výpočtu návrhovou teplotou venkovního vzduchu a sluneční teplotou potvrdily, že jsou poměrově ekvivalentní.

Numerické modelování teplotního chování reálné stavby

Numerickým modelováním s uvažováním vnitřních tepelných zisků a solárních zisků bylo prokázáno, že velmi těžké konstrukce obvodové stěny a stropu velmi přispívají k tepelné stabilitě. Izolační dřevovláknité desky mají také pozitivní vliv na tepelnou stabilitu, ale samotná izolace nezajistí v lehké stavbě výbornou tepelnou stabilitu.

Umístění Varianty II při simulaci s uvažováním tepelných zisků ukazuje, že lehká konstrukce s izolací z dřevovláknů má výrazně pozitivní vliv na teplotní rozdíl vnitřního vzduchu, sama však nezajistí výbornou tepelnou stabilitu. Horší je pouze varianta V se stěnou KT 300 + EPS 110 z keramických tvárnic s vnitřním zateplením a původní varianta I.

8.2 Hodnocení konstrukcí z hlediska tepelné stability

Velmi těžké masivní konstrukce

Z hlediska tepelné stability poskytují velmi těžké konstrukce z cihel s tl. nad 1 m velmi dobrých výsledků. U betonu je to díky vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla U o něco horší. Tepelnou stabilitu zajišťují právě díky své vysoké objemové hmotnosti ρ a měrné tepelné kapacitě c . Zateplením těžkých masivních konstrukcí by bylo možné výrazným způsobem redukovat jejich tloušťku. Běžnými případy takových konstrukcí jsou historické budovy, u kterých je tato vlastnost praxí ověřena.

Těžké konstrukce s vnějším zateplením

Velmi dobrých výsledků dosahují těžké konstrukce, které mají z vnější strany tepelnou izolaci (např. keramické bloky s ETICS). Předností těchto konstrukcí je optimální využití materiálových vlastností jednotlivých vrstev, tzn. z vnější strany vysoce tepelně izolující materiál a z vnitřní strany akumulující materiál s velkou objemovou hmotností ρ , vysokou tepelnou vodivostí λ a měrnou tepelnou kapacitou c .

Těžké konstrukce s vnitřním zateplením

Těžké konstrukce ztrácí svou tepelnou stabilitu přidáním tepelné izolace na vnitřní povrch. Tenká vrstva omítky ve styku s vnitřním vzduchem nezajistí dostatečnou tepelnou stabilitu, takže se konstrukce chovají jako lehké konstrukce.

Lehké konstrukce

Jsou to konstrukce, ve kterých je umístěna souvislá, ale relativně tenká masivní konstrukce tl. do cca 80 mm (např. dřevěný panel, ŽB skořepina apod.). Akumulační schopnost masivní konstrukce je výrazně snížena. Jejich vlastnosti však mohou být významně zlepšeny použitím materiálu z vnější strany, který má malý součinitel prostupu tepla λ a vysokou měrnou tepelnou kapacitou c (např. izolace z dřevovláknitých desek).

Velmi lehké konstrukce

Jedná se většinou o lehké skeletové konstrukce, u kterých je tvořena skladba pouze velmi lehkými tepelnými izolacemi, případně opláštěnými SDK konstrukcemi. Konstrukce zcela postrádá akumulaci schopnost, jako mají masivní konstrukce. Velmi lehké konstrukce tvořené jen tepelnou izolací a vzduchovými mezerami velmi rychle reagují na dynamické změny vnější teploty a nepřispívají tak tepelné stabilitě. Teplota vnitřního vzduchu v místnosti tedy kolísá s velkými teplotními rozdíly. Velmi lehké konstrukce jsou velmi nevhodné především v prostorách s výraznějšími vnitřními nebo solárními zisky.

8.3 Hodnocení koncepce budov z hlediska tepelné stability

Tepelnou stabilitu místnosti nebo budovy neovlivňují pouze její konstrukce, ale má na ni vliv celá koncepce budovy. Správně by měl koncept budovy:

- Maximalizovat množství hmotných konstrukcí nejen obvodových, ale i vnitřních a dělicích;
- Minimalizovat vnitřní tepelné zisky způsobené provozem a užíváním budovy;
- Eliminovat nežádoucí letní pasivní solární zisky okny minimalizováním jejich plochy stíněním předsazenými konstrukcemi a cloněním žaluziemi nebo roletami;
- Využívat intenzivního nočního větrání pro ochlazení akumulujících konstrukcí.

8.4 Návrh řešení experimentální budovy

Pro sledování většiny fyzikálních dějů ve stavební praxi je vždy velmi přínosný a někdy zcela nevyhnutelný experiment na reálné stavbě nebo zjednodušeném modelu vystavených reálným podmínkám. Teoretická analýza na různých fyzikálních modelech ukázala významné rozdíly mezi výsledky jednotlivých metod. Přijatelné výsledky vykazovaly až velmi náročné dynamické simulace.

V současné době se čím dál více používají sendvičové konstrukce s celou řadou technických zajímavostí (reflexní fólie, zateplení z interiéru apod.) je nutné i tyto teoretické modely validovat experimentem.

Pro tyto účely se uvažuje s výstavbou experimentální budovy v areálu společnosti DEKTRADE a.s. v Brně. Před výstavbou byla provedena podrobná analýza vlivů, které by

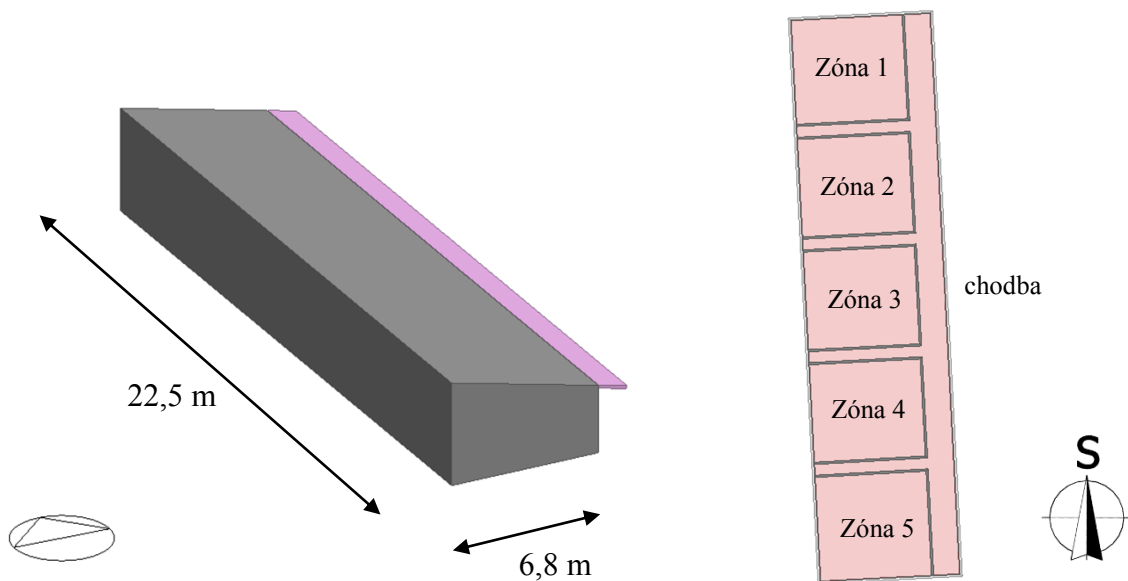
mohly ovlivnit přesnost a relevantnost měření. Byly uvažovány dvě koncepce tvaru experimentální budovy:

- Samostatně stojící jednoduché objekty postavené z různých materiálů
- Jedna budova rozdělena na více měřicích zón

Varianta samostatně stojících budov byla zahrnuta z cenových a prostorových důvodů. Záměrem využití je testování širokého spektra konstrukcí, každá změna by vyžadovala kompletní přestavbu. Aby se stavby vzájemně neovlivňovaly, musely by být v dostatečně velké vzdálenosti. Z těchto důvodů byla tato varianta zamítnuta.

Pro porovnání konstrukcí z hlediska tepelné stability je nejlepší experimentální měření na budově, která má různé obvodové konstrukce místností, které mají stejné rozměry a orientaci k světovým stranám. Pro experiment pozorování tepelné stability konstrukcí byla tedy navržena experimentální budova, která umožňuje měnit obvodové konstrukce měřených zón nezávisle na sobě, zjišťovat jejich přínos a přímo je mezi sebou porovnávat.

Byla tedy navržena budova obdélníkového půdorysu s pultovou střechou s 5 samostatnými zónami a chodbou. Budova bude umístěna v areálu firmy DEKTRADE v Brně. Pro experiment tepelné stability konstrukcí bude prováděno měření v prostředních třech zónách. Obvodové stěny v těchto izolovaných zónách budou demontovatelné pro možnou změnu těchto konstrukcí za jiné. Výkresy experimentální budovy viz příloha I.



Obrázek 14 – Experimentální budova

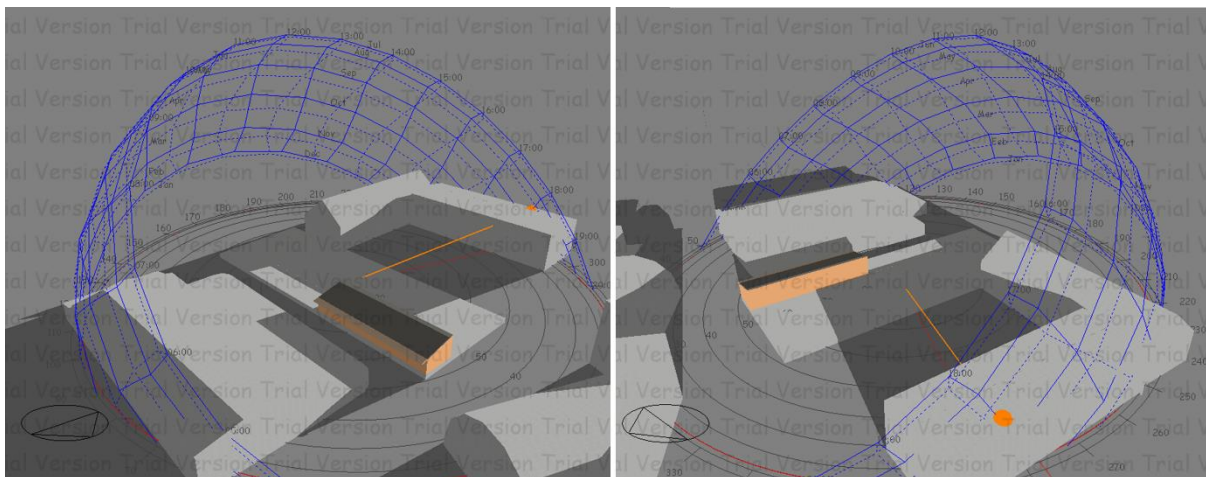
8.4.1 Parametry ovlivňující vnitřní teplotu

Cílem návrhu experimentální budovy je optimalizace umístění a konstrukcí budovy tak, aby co nejméně ovlivňovaly výsledky měření. Mezi hlavní vlivy patří:

1. stínění okolní zástavby;
2. orientace budovy;
3. skladba vnitřních konstrukcí budovy;
4. skladba střechy;
5. pohltivost střešní krytiny;

Analýza vlivu okolní zástavby

Nejdelší den nastává na severní polokouli okolo 21. června. Tento den je slunce na obloze nejvýše, takže blízké okolní budovy stíní nejméně. Byla tedy provedena kontrola stínění okolních budov v celém letním období, aby se prověřila možnost stínění okolními budovami. Simulací v programu Design Builder bylo potvrzeno, že okolní budovy v letním období nestíní na experimentální budovu. Mírné stínění na část západní stěny nastává až v období od 21. srpna večer od 19:00, které by nemělo téměř vůbec ovlivnit měření, viz obrázek 16.



Obrázek 15 – Schéma simulace stínění blízkými okolními budovami dne 21. srpna v 19:00

Analýza orientace budovy

Zásadní vliv na sledované parametry má sluneční záření. Pro správné vyhodnocení jednotlivých konstrukcí je nutné všechny sledované konstrukce vystavit co možná největšímu, ale také zcela rovnoměrnému sálavému slunečnímu zatížení, Proto byla budova v modelu

natačena na různé světové strany a bylo zjišťováno, pro jaké natočení bude osálení nejvýznamnější a tudíž i teplota v jednotlivých zónách nejvyšší.

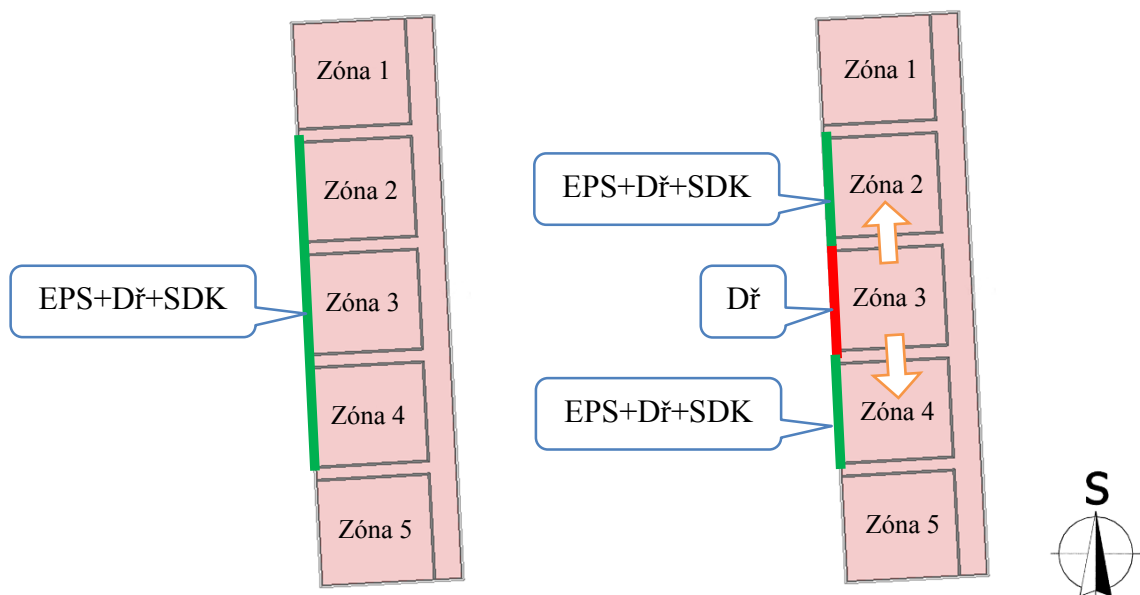
Simulací vnitřní teploty vzduchu v měřených zónách bylo dokázáno, že zvolená západní orientace testované fasády je nevýhodnější z hlediska maximální teploty vzduchu v měřených zónách a rovnoměrnosti osálení.

Tabulka 22 – Maximální teplota v Zóně 3

	EPS+Dř+SDK	EPS160 + KT 300	KT 440
Orientace Z	20,74°C	19,49°C	20,38°C
Orientace J	20,30°C	19,20°C	19,96°C
Orientace V	20,67°C	19,48°C	20,34°C

Analýza vlivu vnitřních konstrukcí budovy

Cílem návrhu skladby příček je optimalizovat jejich skladbu tak, aby se jednotlivé zóny oddělené těmito příčkami co nejméně teplotně ovlivňovaly. Princip porovnání příček spočívá v simulaci dvou variant u každé konstrukce příčky. V první variantě jsou všechny obvodové stěny EPS+Dř+SDK, v druhé variantě je pouze v Zóně 3 obvodová stěna z dřevěného panelu Dř. V první variantě jsou maximální teploty vnitřního vzduchu ve všech zónách stejné, jsou neovlivněné sousední zónou s vyšší teplotou. V druhé variantě je maximální teplota vzduchu v Zóně 3 vyšší než v sousedních zónách, protože u zóny 3 je vnější konstrukce tvořena jen dřevěným panelem bez zateplení (viz obrázek 16). Rozdíl maximálních teplot vnitřního vzduchu v sousedních zónách je tedy porovnávací parametr pro různé konstrukce příček.



Obrázek 16 – Schéma posouzení vhodnosti příček

Tabulka 23 – Rozdíl maximálních teplot vnitřního vzduchu pro porovnání příček

varianta	zóna	maximální teploty vzduchu v zónách $t_{i,max}$ [°C]		rozdíl teplot $\Delta t_{i,max}$ [°C]
		varianta 1	varianta 2	
Dř	Zóna 2	23,32	24,15	-0,83
	Zóna 3	23,3	27,91	
	Zóna 4	23,39	24,28	-0,89
Dř+vzduchová dutina 300+Dř	Zóna 2	22,75	23,39	-0,64
	Zóna 3	22,73	27,73	
	Zóna 4	22,85	23,43	-0,58
Dř+B 100+Dř	Zóna 2	22,25	22,67	-0,42
	Zóna 3	22,2	27,1	
	Zóna 4	22,29	22,71	-0,42
Dř+EPS 100+Dř	Zóna 2	22,75	23,1	-0,35
	Zóna 3	22,72	28,16	
	Zóna 4	22,77	23,13	-0,36
Dř+EPS 100+větraný prostor 300 mm+EPS 100+Dř	Zóna 2	23,51	23,63	-0,12
	Zóna 3	23,51	29,66	
	Zóna 4	23,51	23,63	-0,12

EPS 100+ Dř+větraný prostor 300 mm+ Dř+EPS 100	Zóna 2	22,66	22,77	-0,11
	Zóna 3	22,66	27,94	
	Zóna 4	22,66	22,77	-0,11
adiabatické příčky	Zóna 2	24,05	24,05	0
	Zóna 3	24,05	31,15	
	Zóna 4	24,05	24,05	0

Jako nejlepší varianta konstrukce příčky byla zvolena varianta s dvojitými příčkami se zateplením z prostoru chodby a větraným prostorem mezi nimi. Tato konstrukce příčky velmi málo ovlivňuje teplotu v sousední zóně a umístění tepelné izolace umožňuje její výměnu z chodby bez zásahu do vnitřního prostředí měřené zóny.

Analýza vlivu skladby střechy

Pro posuzování vlivu konstrukcí na tepelnou stabilitu vnitřního prostředí je mj. nutné minimalizovat tepelné zisky střechou. S ohledem na rychlost výstavby a cenu je preferovaná lehká skladba střechy. Z tohoto důvodu byla provedena analýza zaměřená na optimalizaci skladby. V tab. 24 jsou vidět hodnoty závislosti maximální vnitřní teploty na tloušťce tepelné izolace.

Tabulka 24 – Vliv tloušťky izolace střechy na maximální teplotu vzduchu v zóně

tepelná izolace konstrukce střechy	maximální teplota vzduchu v zóně $t_{i,max}$ [°C]
EPS 160 mm	23,00
EPS 300 mm	20,74
EPS 500 mm	20,13
PIR 500 mm	19,71
Adiabatická konstrukce	19,08

Z výsledků je patrné, že s narůstající tloušťkou se i snižuje vliv venkovního prostředí. Hodnoty nad 500 mm izolace z PIRu se již velmi blíží adiabatické konstrukci střechy.

Analýza pohltivosti povrchu střešní krytiny

Pohltivost povrchu střešní krytiny má nezanedbatelný vliv na vnitřní teplotu v letním období. Krytina s nízkou pohltivostí (emisivitou) sníží maximální teplotu vzduchu v zóně o 1°C v porovnání s krytinou s vysokou emisivitou povrchu. Pro střechu experimentální budovy byla z důvodu menšího ovlivňování teploty vnitřního vzduchu zvolena světlá fólie jako střešní krytina.

Tabulka 25 – Vliv pohltivosti krytiny pro záření

emisivita ε [-]	maximální teplota vzduchu v zóně $t_{i,max}$ [°C]
asfaltový pás, $\varepsilon = 0,9$	21,71
světlá fólie, $\varepsilon = 0,3^6$	20,74

⁶ Hodnoty udávané výrobcem se pohybují kolem hodnoty 0,1. Do výpočtu byla uvažována hodnota 0,3, která odhadem zohledňuje míru znečištění a stárnutí.

9. Další možnosti výzkumu

- Porovnání teoretických výsledků teplotního chování konstrukcí a vnitřních zón s hodnotami zjištěnými experimentálně
- Porovnání výsledků simulace teploty vnitřního vzduchu programem Design Builder a metodiky normy ČSN EN ISO 13792, podle které počítá program Simulace 2011, Svoboda software, případná modifikace pro zpřesnění vztahů
- Velmi lehké konstrukce, jejich zkoumání z hlediska tepelné stability a bližší popsání jejich chování

10. Zhodnocení vytýčených cílů

V závěru této diplomové práce bych chtěl zhodnotit vytýčené cíle, které byly definovány na začátku práce.

Teoretické popsání problémů

Byly ověřeny již dlouho známé zkušenosti o výhodnosti masivních konstrukcí. Byl prokázán málo známý jev, že tepelná stabilita nezávisí pouze na hmotnosti konstrukce, ale také na součiniteli prostupu tepla U . Bylo prokázáno, že u lehkých a velmi lehkých konstrukcí má významný vliv emisivita vnějšího povrchu ε .

Výběr správné metodiky pro hodnocení konstrukcí

Jako nejlepší metoda porovnání konstrukcí je metoda popsaná v kapitole 5.5 Numerické modelování teplotního chování, které zohledňuje tepelné zisky a chování celé budovy. Metody založené na tepelných charakteristikách materiálů a metody, které zohledňují pouze zatížení proměnnou teplotou venkovního vzduchu, nehodnotí konstrukce dle reálného chování.

Vyhodnocení konstrukcí

V kapitole 5.6 a 8.2 je provedeno rozsáhlé hodnocení konstrukcí pro různé okrajové podmínky z hlediska tepelné stability konstrukce nebo i budovy (části budovy).

Aplikace poznatků ve stavebních konstrukcích

V závěru práce je provedena syntéza poznatků získaných během zpracování práce. V kapitole 8 je provedeno závěrečné shrnutí poznatků, které byly dále použity při analýze na reálném objektu.

Optimalizace konstrukce pro stavbu experimentální budovy

Pro experiment pozorování tepelné stability konstrukcí byla navrhována experimentální budova, která umožňuje měnit obvodové konstrukce měřených zón nezávisle na sobě. Ostatní konstrukce a opatření byly optimalizovány tak, aby co nejméně ovlivňovaly naměřené výsledky. Budova byla navržena z hlediska:

- **Stínění** – budova bude umístěna na místo, které není ovlivněno stíněním blízkými okolními budovami;

- **Orientace** – posuzovaná obvodová stěna bude orientována na západní světovou stranu;
- **Příčky** – oddělení jednotlivých zón bude dvojitými příčkami s volným větraným prostorem mezi nimi a zateplením z vnější strany polystyrenem tl. 100 mm;
- **Střecha** – střecha bude zateplena polystyrenem tl. 500 mm a jako střešní krytina bude zvolena fólie s nízkou emisivitou vnějšího povrchu.

11. Literatura

11.1 Seznam použitých zdrojů

1. ČSN 730540-2. *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2011. Třídící znak 730540-2.
2. Český statistický úřad | ČSÚ. *Analýza bytové výstavby v roce 2012* | ČSÚ [online]. 7. 5. 2013 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.czso.cz/csu/csu.nsf/informace/821513t13.doc>
3. DUŠKA, M. *Akumulace tepla ve výpočtu tepelné zátěže klimatizovaných prostorů*. Praha: 2010. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí. Vedoucí práce CSc. prof. Ing. František Drkal. Dostupné také z: <http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/Duska.pdf>
4. FICKER, T. *Aplikovaná fyzika (S): Vedení tepla ve stavebních konstrukcích*. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. VUT v Brně, Fakulta stavební. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 66 s..
5. ČSN 73 0540-1. *Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 730540.
6. BARTUŠKA, K. a E. SVOBODA. *Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika*. 5. vyd. dotisk. Praha: Prometheus, 2010, 244 s.. ISBN 978-80-7196-383-7.
7. ŠIKULA, O. *Manuál k softwaru CalA*. V Tribunu EU vyd. 1. Brno: Tribun EU, 2009, 43 s. [cit. 2014-01-14]. ISBN 978-80-7399-879-0. Dostupné z: http://www.researchgate.net/publication/47124995_Manul_k_softwaru_CalA_/file/72e7e5212193f9abac.pdf
8. ČSN EN ISO 13786. *Tepelné chování stavebních dílců - Dynamické tepelné*. Praha: Český normalizační institut, 2008. Třídící znak 13786.
9. ASTE, N. A. ANGELOTTI a M. BUZZETTI. *The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance* [dokument]. Milano: Elsevier, 2009 [cit. 2013-12-17]. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>

S037877880900125X

10. Počasí - předpověď počasí, aktuální informace | In-počasí. *Klima České republiky, podnebí | In-počasí* [online]. 2013 [cit. 2014-01-09]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/archiv/klima.php>
11. ČSN 730540-3. *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 730540-3.
12. HALAHYJA, M. I. CHMÚRNÝ a Z. STERNOVÁ. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov..* Bratislava: Jaga, 1998, 253 s.. ISBN 8088905044.
13. ČSN 730540-4. *Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody*. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 730540-4.
14. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. *Preprocesor* [online]. 2013, verze 15. 3. 2013 02:49 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Preprocesor>
15. Přehled | designbuilder.cz. *DesignBuilder - software pro komplexní dynamickou simulaci budov | designbuilder.cz* [online]. verze 2012 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://designbuilder.cz/o-programu/prehled-24>
16. EnergyPlus Energy Simulation Software: About EnergyPlus. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy | Department of Energy* [online]. 2013, verze 15. 10. 2013 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm
17. Stavební fyzika - Teplo 2011 | K-CAD, spol. s r.o. *Software pro stavební fyziku | K-CAD, spol. s r.o.* [online]. 2011, verze 2011 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://kcad.cz/cz/stavebni-fyzika/tepelná-technika/teplo/>
18. Setrvačnost vnitřní povrchové teploty obvodových konstrukcí | Stavebnictví3000.cz. *Nejvíce informací o stavebnictví v ČR | Stavebnictví3000.cz* [online]. 2001, verze 2/2001 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/vnitri-povrchove-teploty-obvodovych-konstrukci/>

19. REES, S. J. D. XIAO a J. D. SPITLER. *An Analytical Verification Test Suite for Building Fabric Models in Whole Building Energy ...*. Vol 108. Oklahoma: ASHRAE Transactions, 2002. Dostupné také z: http://www.hvac.okstate.edu/research/Documents/Rees_Xiao_Spitler_02.pdf

11.2 Seznam použitých zkratk a symbolů

a	součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
c	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
E_m	měrná akumulovaná energie [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]
f	faktor úbytku [-]
I	intenzita globálního slunečního záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
q	hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
t	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
T	doba periodického opakování [s]
U	součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
Y_{mn}	periodický prostup tepla [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
Y_{nn}	admitance tepla [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
Δt	rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$ nebo K]
Δt_f	fázový posun [h]
ε	pohltivost (emisivita) [-]
θ	teplota [$^{\circ}\text{C}$ nebo K]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
ρ	objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
τ	čas [s nebo hod]
τ_0	relaxační doba [s nebo hod]
Φ	tepelný tok [W]
v	teplotní útlum [-]

11.3 Seznam indexů

- i* vnitřní strana, interiér
e vnější strana, exteriér
p povrch

11.4 Seznam dalších symbolů

- $\hat{}$ komplexní amplituda
 $\bar{}$ střední hodnota
 $||$ absolutní hodnota (modul) komplexního čísla
 \arg argument (úhel) komplexního čísla

11.5 Seznam příloh

- A Seznam použitých materiálů
B Seznam konstrukcí
C Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období a intenzita globálního slunečního záření v denním průběhu
D Popis používaných měřících zařízení
E Fotografie měřené budovy
F Výkresy budovy experimentálního měření
G Skladby konstrukcí měřené budovy
H Výsledky měření budovy ve Znojmě
I Výkresy experimentální budovy
J Potvrzení o zapůjčení klimatických dat od Českého hydrometeorologického ústavu

Přílohy

A Seznam použitých materiálů

V diplomové práci byly použity tyto materiály a jejich materiálové charakteristiky

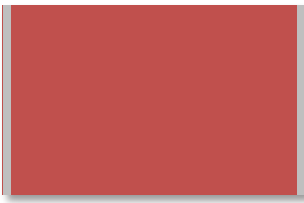
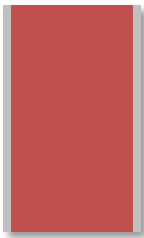
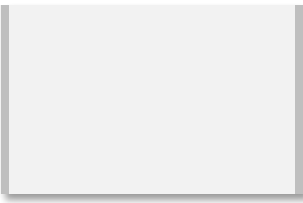

Tabulka A.1 – Seznam použitých materiálů

zkratka	název materiálu	tepelná vodivost λ [W/(m.K)]	měrná tepelná kapacita c [J/(kg.K)]	objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
B	beton	1,40	840	2100
CPP	cihla plná pálená	0,80	900	1700
Dř	dřevo měkké smrkové	0,12	1880	530
Dřvl	dřevovláknitá izolace	0,04	2100	250
EPS	expandovaný polystyren	0,04	1400	15
KT	keramické tvárnice	0,149	960	800
MW	minerální vlna	0,038	840	140
OSB	OSB deska	0,15	1580	630
PsT	plynosilikátové tvárnice	0,084	1000	300
PIR	polyisokyanurátová pěna	0,022	1500	32
SDK	sádrokartonová deska	0,16	840	800
Sdvl	sádrovláknitá deska	0,35	1100	1200
VO	vápenocementová omítka	0,80	840	1600
VPC1	vápenopískové cihly 1	0,37	1000	1220
VPC2	vápenopískové cihly 2	0,82	1000	1810

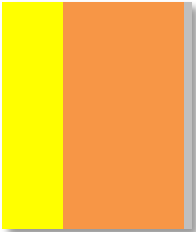

B Seznam konstrukcí

V diplomové práci byly pro výpočet použity skladby konstrukcí uvedené v tabulce B.1. Skladby jsou pojmenovány zkratkami materiálů uvedených v příloze v tabulce A.1 podle vrstev od vnější strany po vnitřní. Pro rozlišení některých variant různých tloušťek bylo doplněno u zkratky i číslo, které udává tloušťku vrstvy v milimetrech.

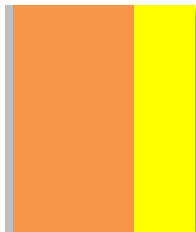

Tabulka B.1 – Velmi těžké masivní konstrukce

CPP 1200					
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
			1	vápenocementová omítka	0,010
			2	cihla plná pálená	1,200
			3	vápenocementová omítka	0,010
				$U = 0,590 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
CPP 600					
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
			1	vápenocementová omítka	0,010
			2	cihla plná pálená	0,600
			3	vápenocementová omítka	0,010
				$U = 1,058 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
B 1200					
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
			1	vápenocementová omítka	0,010
			2	beton	1,200
			3	vápenocementová omítka	0,010
				$U = 0,950 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
B 600					
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
			1	vápenocementová omítka	0,010
			2	beton	0,600
			3	vápenocementová omítka	0,010
				$U = 1,604 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	

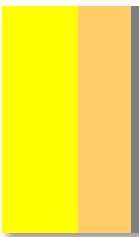
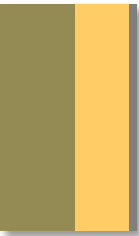

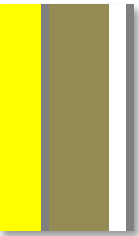
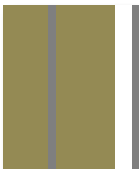
Tabulka B.2 – Těžké konstrukce s vnějším zateplením

EPS 110 + KT 300			
exteriér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	expandovaný polystyren	0,110
	2	keramické tvárnice	0,300
	3	vápenocementová omítka	0,010
		$U = 0,202 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
EPS 80 + KT 440			
exteriér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	expandovaný polystyren	0,080
	2	keramické tvárnice	0,440
	3	vápenocementová omítka	0,010
		$U = 0,195 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	

Tabulka B.3 – Těžké konstrukce s vnitřním zateplením

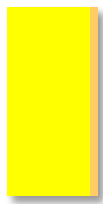
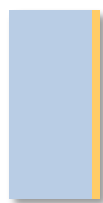

KT 300 + EPS 110			
exteriér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	vápenocementová omítka	0,010
	2	keramické tvárnice	0,300
	3	expandovaný polystyren	0,110
		$U = 0,202 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
KT 440 + EPS 80			
exteriér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	vápenocementová omítka	0,010
	2	keramické tvárnice	0,440
	3	expandovaný polystyren	0,080
		$U = 0,195 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	

Tabulka B.4 – Lehké konstrukce s vnějším zateplením

EPS+Dř+SDK						
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
			1	expandovaný polystyren	0,160	
			2	dřevo měkké smrkové	0,081	
			3	sádrokarton	0,013	
				$U = 0,203 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
MW+Dř+SDK						
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
			1	minerální vlna	0,160	
			2	dřevo měkké smrkové	0,081	
			3	sádrokarton	0,013	
				$U = 0,196 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
Dřvl+Dř+SDK						
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
			1	dřevovláknitá izolace	0,160	
			2	dřevo měkké smrkové	0,081	
			3	sádrokarton	0,013	
				$U = 0,203 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
Dekhome						
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
			1	extrudovaný polystyren	0,080	
			2	sádrovláknitá deska	0,0125	
			3	minerální vlna	0,120	
			4	vzduchová mezera	0,040	
			5	sádrovláknitá deska	0,0125	
				$U = 0,199 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
Dekhome MW						
exteriér		interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
			1	minerální vlna	0,080	
			2	sádrovláknitá deska	0,0125	
				3	minerální vlna	0,120

	4	vzduchová mezera	0,040
	5	sádrovláknitá deska	0,0125
		$U = 0,194 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
Dekhome Dřvl			
exteriér		interiér	
	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	dřevovláknitá izolace	0,080
	2	sádrovláknitá deska	0,0125
	3	minerální vlna	0,120
	4	vzduchová mezera	0,040
	5	sádrovláknitá deska	0,0125
		$U = 0,199 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	

Tabulka B.5 – Velmi lehké konstrukce

EPS+OSB			
exteriér		interiér	
	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	extrudovaný polystyren	0,190
	2	OSB deska	0,012
		$U = 0,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
PIR+OSB			
exteriér		interiér	
	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	polyisokyanurátová pěna	0,100
	2	OSB deska	0,012
		$U = 0,209 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
Dř			
exteriér		interiér	
	č.	název materiálu	tloušťka [m]
	1	dřevo měkké smrkové	0,081
		$U = 1,183 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	

C Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období a intenzita globálního slunečního záření v denním průběhu

Hodnoty návrhové teploty venkovního vzduchu v letním období a intenzita globálního slunečního záření byla převzata z normy [11]

Tabulka C.1 – Návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období a intenzita globálního slunečního záření v denním průběhu

hodina	Návrhová teplota vzduchu v letním období t_e [°C]	intenzita globálního slunečního záření pro jih [W/m ²]
1	16,9	0
2	16,2	0
3	16,0	0
4	16,2	0
5	16,9	0
6	18,1	37
7	19,5	103
8	21,2	259
9	23,0	420
10	24,8	553
11	26,5	640
12	27,9	670
13	29,1	640
14	29,8	553
15	30,0	420
16	29,8	259
17	29,1	103
18	28,0	37
19	26,5	0
20	24,8	0
21	23,0	0
22	21,2	0
23	19,5	0
24	18,1	0

D Popis používaných měřících zařízení

COMET LOGGER S0141

Čtyř kanálový záznamník teploty a vlhkosti:

- rozsah měření: -90 °C až +260 °C (pro Pt1000/3850ppm);
- odchylka $\pm 0,2$ °C v rozsahu -50 °C až +100 °C;
- rozsah provozní teploty přístroje: -30 °C až +70 °C.
- rozsah provozní vlhkosti přístroje: 0 %RV až 100 %RV



Obrázek D.1 – Čtyř kanálový záznamník teploty a vlhkosti COMET LOGGER S0141

Sonda Ni1000/6180ppm pro měření teploty vzduchu

Univerzální sonda s krytím IP67, nerez 17241 pevně spojená s kabelem volitelné délky

- rozsah měření: rozsah -50 až $+200^{\circ}\text{C}$



Obrázek D.2 – Vlevo sonda s radiační clonou, vpravo sonda umístěná ve výfuku klimatizace



Obrázek D.3 – Radiační clona teplotní sondy pro měření teploty venkovního vzduchu

Teploměr-vlhkoměr COMMETER D3631

Digitální záznamový teploměr-vlhkoměr s připojitelnou externí sondou teploty.

- rozsah měření: -50 až $+250$ °C;
- přesnost měření včetně výrobcem dodané sondy: $\pm 0,4$ °C v rozsahu -50 °C až $+100$ °C;
- rozsah měření relativní vlhkosti: 5 %RV až 95 %RV;
- přesnost: $\pm 2,5$ %RV v rozsahu 5 %RV až 95 %RV při 23 °C;



Obrázek D.4 – Teploměr-vlhkoměr COMMETER D3631

E Fotografie měřené budovy



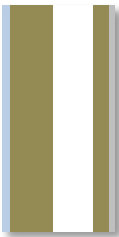







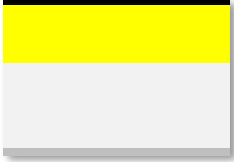



G Skladby konstrukcí měřené budovy

Tabulka G.1 – Konstrukce měřené budovy ve Znojmě

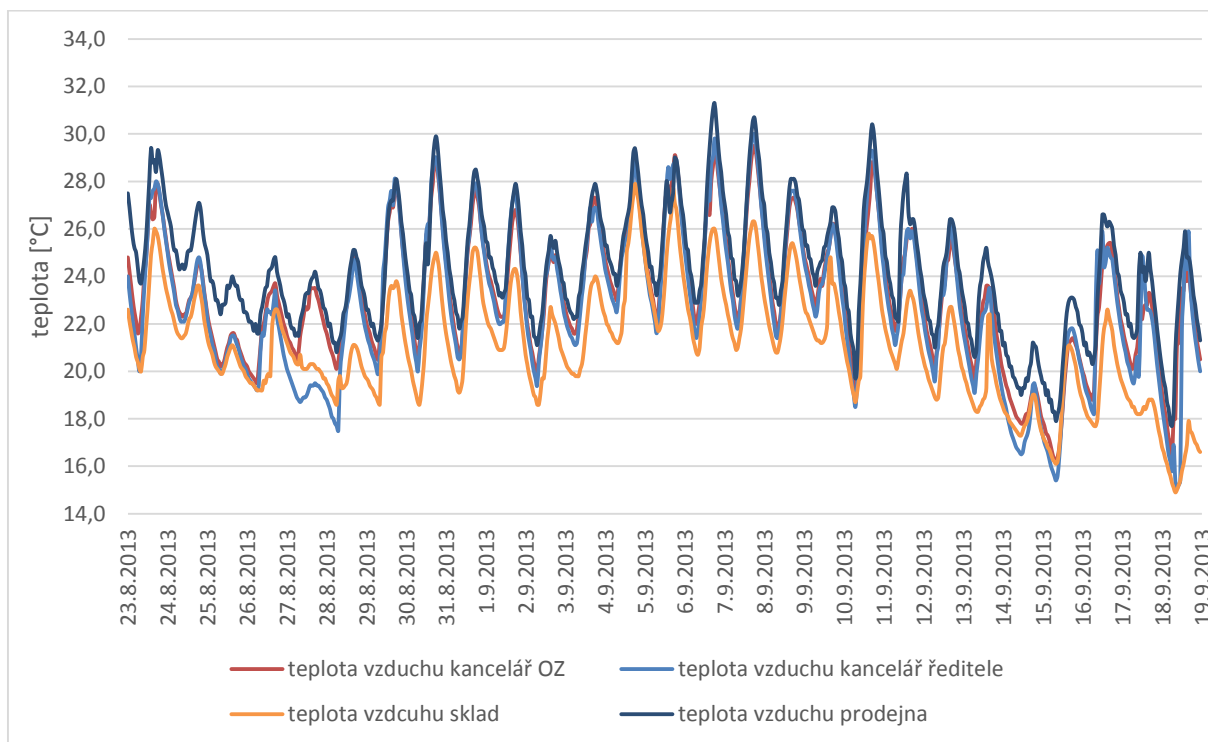
obvodová stěna Znojmo				
exteriér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
	1	ocelový plech	0,002	
	2	minerální vlna	0,100	
	3	vzduchová dutina	0,100	
	4	minerální vlna	0,030	
	5	sádrokarton	0,0125	
			$U = 0,272 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
lehká střecha Znojmo				
exteriér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
	1	ocelový plech	0,002	
	2	minerální vlna	0,150	
	3	vzduchová dutina	0,150	
	4	minerální vlna	0,030	
	5	sádrokarton	0,0125	
		$U = 0,204 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
podlaha Znojmo				
exteriér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
	1	beton	0,100	
	2	extrudovaný polystyren	0,110	
	3	OSB deska	0,025	
	4	koberec	0,004	
		$U = 0,263 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
příčky Znojmo				
interiér  interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]	
	1	sádrokarton	0,0125	
	2	vzduchová dutina	0,080	
	3	sádrokarton	0,0125	
		$U = 1,677 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		

Tabulka G.2 – Konstrukce použité pro simulaci dalších variant

těžká ŽB střecha					
<div style="text-align: center;"> exteriér  interiér </div>	č.	název materiálu	tloušťka [m]		
	1	asfaltový pás	0,008		
	2	expandovaný polystyren	0,160		
	3	beton	0,200		
	4	vápenocementová omítka	0,010		
		$U = 0,236 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$			
příčky z KT					
interiér	<div style="text-align: center;">  </div>	interiér	č.	název materiálu	tloušťka [m]
			1	vápenocementová omítka	0,0125
			2	keramické tvárnice	0,115
			3	vápenocementová omítka	0,0125
			$U = 1,462 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		

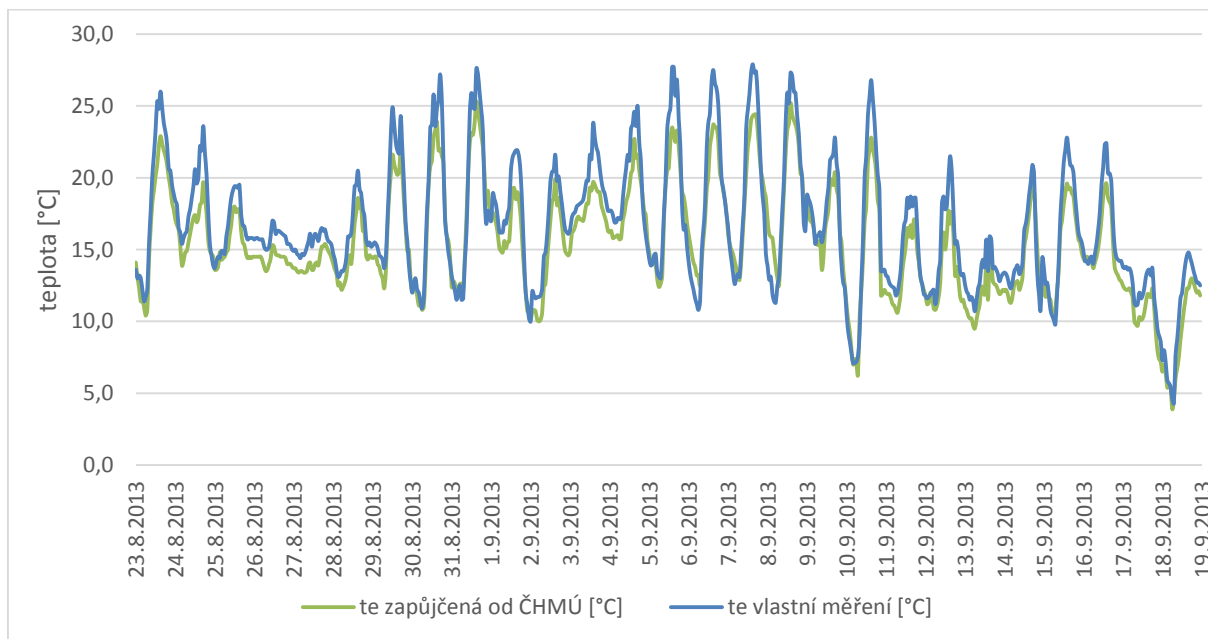
H Výsledky měření budovy ve Znojmě

Teplota vnitřního vzduchu t_e



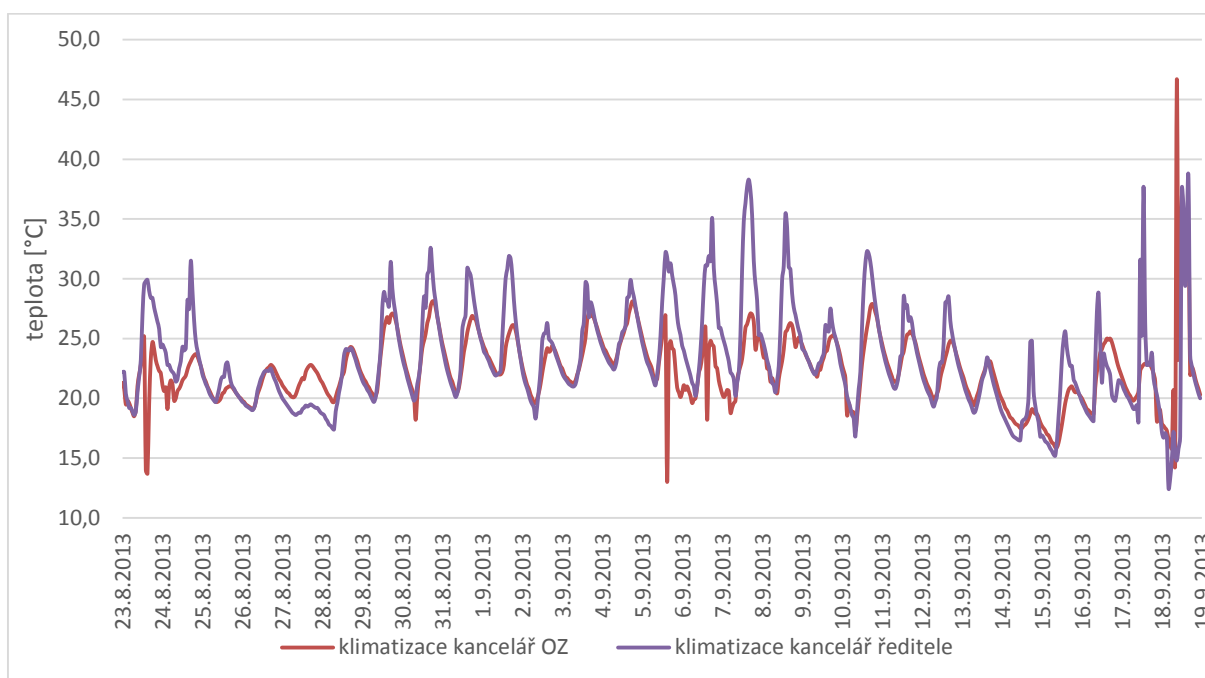
Graf H.1 – Časový průběh naměřené teploty vnitřního vzduchu t_i

Teplota vnějšího vzduchu t_e



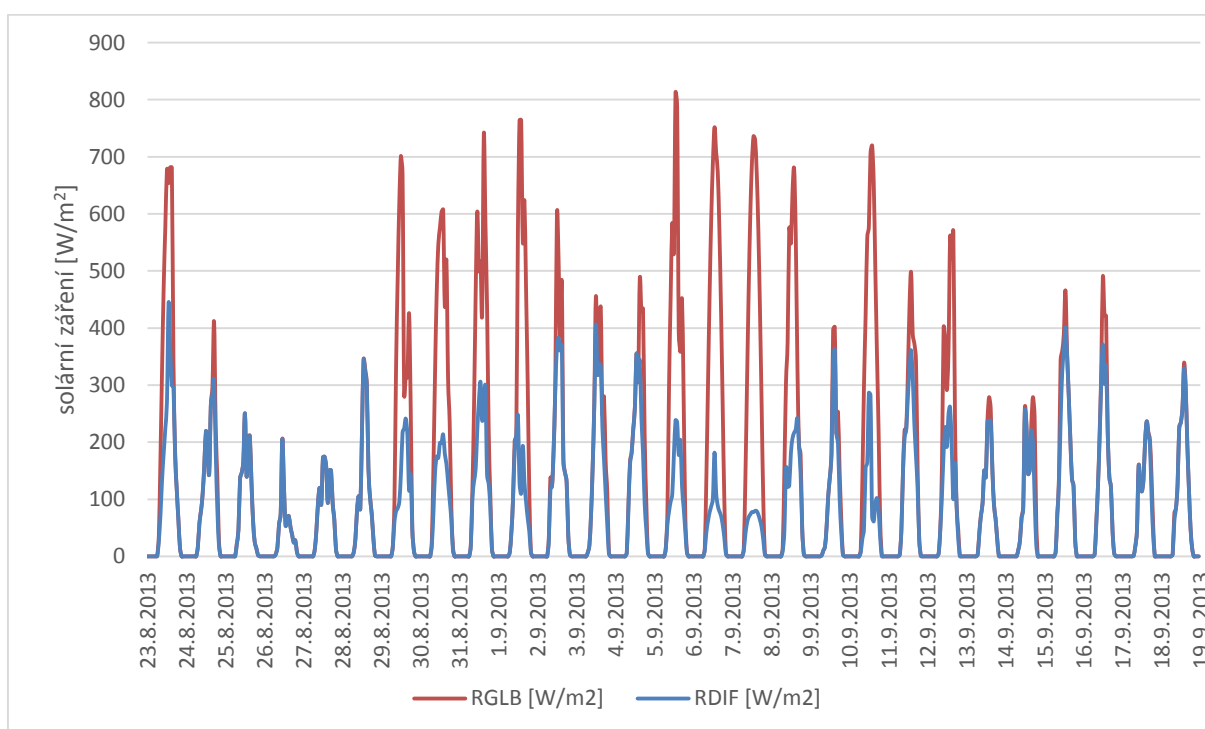
Graf H.2 – Časový průběh naměřené teploty vnějšího vzduchu t_e

Teplota ve výfuku klimatizace



Graf H.3 – Průběh teploty naměřený v místě výfuku klimatizace

Hodnoty solárního záření zapůjčené od ČHMÚ



Graf H.4 – RGLB (intenzita globálního solárního záření), DRIF (intenzita difúzního solárního záření)