



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

**VLIV VNITŘNÍ TEPELNÉ AKUMULACE
KONSTRUKCÍ PASIVNÍCH DOMŮ NA JEJICH
LETNÍ TEPELNOU STABILITU**

THE INFLUENCE OF INTERNAL THERMAL STORAGE MASS USED IN PASSIVE
HOUSES' CONSTRUCTION SYSTEMS ON THEIR SUMMER THERMAL STABILITY

TEZE

THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Němeček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MILOŠ KALOUSEK, Ph.D.

BRNO 2018

ABSTRAKT

V poslední době nastal v České republice rozmach ve výstavbě pasivních domů a zároveň staveb z lehkých stavebních systémů, jako jsou moderní dřevostavby. Ohledně dřevostaveb panuje obecný názor, že se v létě pravděpodobně přehřívají více než stavby zděné. Právě proto se tato práce zabývá vlivem vnitřní tepelné akumulace konstrukcí pasivních domů na jejich letní tepelnou stabilitu v českých klimatických podmínkách. Práce je zaměřena především na tepelnou akumulaci citelného tepla bez použití PCM materiálů. Důraz je kladen zejména na srovnání dřevostaveb se stavbami zděnými. Předmětem zkoumání jsou především stavby obytné v energeticky pasivním standardu, poznatky práce lze však aplikovat i na jinak užívané objekty. Úvod stručně shrnuje současný stav problematiky. Pro samotný výzkum bylo v rámci vědeckých postupů použito jak experimentálního měření staveb (RD Dubňany a RD Moravany), tak simulací. Vlastním přínosem výzkumu byla v první řadě diskuze nad problematikou tepelné akumulace a výpočtových metod tepelné kapacity konstrukcí. Experimentální měření taktéž přináší důležité závěry. Hlavním přínosem práce je stanovení důležitosti vnitřní tepelné akumulace stavby v rámci letního přehřívání. Vliv vnitřní tepelné akumulace je také porovnán s ostatními faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu. Bylo zjištěno, že na nejvyšší dosaženou teplotu v interiéru $\theta_{ai,max}$ mají největší vliv sluneční zisky přes průsvitné výplně otvorů. Vliv vnitřní tepelné akumulace však není zanedbatelný. Pokud srovnáme standardní sendvičovou dřevostavbu se zděnou stavbou s keramickými dutinovými tvárnicemi, bude se ve standardní den přehřívát dřevostavba o zhruba 0,5 °C více. Větší rozdíly v dosažených teplotách se pak projevují u velmi lehkých dřevostaveb bez žádné vnitřní tepelné akumulační hmoty. Tyto stavební konstrukce by proto v interiéru měli být vybaveny malým, racionálním, množstvím tepelné akumulační hmoty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vnitřní tepelná akumulace stavby, vnitřní tepelné akumulační hmota, letní tepelná stabilita, pasivní dům, moderní dřevostavba, těžká konstrukce, lehká konstrukce, akumulace citelného tepla, pasivní chlazení, tepelná kapacita konstrukce, tepelná kapacita místnosti, přehřívání stavby, numerická simulace, DesignBuilder, BSim, kvazistacionární simulace, periodická penetrační hloubka.

Obsah

A	Úvod	1
B	Současný stav problematiky	3
B.1	Lehké a těžké konstrukce a stavby	3
B.2	Letní tepelná stabilita místnosti – požadavky a hodnocení	3
B.3	Faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu	3
B.4	Teplota jako ukazatel tepelné pohody	4
B.5	Fyzikální základy	4
B.6	Tepelná akumulace stavby	4
C	Cíle práce	5
D	Použité postupy a předpoklady práce	5
E	Úvodní simulace a měření	6
E.1	Pasivní dřevostavba RD Dubňany	6
E.2	Srovnávací simulace letní tepelné stability – SIMULACE vs. BSim – dle ČSN 730540	7
E.3	Měření letní tepelné stability pasivního RD Dubňany a simulace v BSim	9
E.4	Simulace faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu	12
F	Tepelná akumulace – pokračování	13
G	Hlavní simulace a měření	16
G.1	Simulace konstrukčních variant RD Dubňany v BSim	16
G.2	Dlouhodobé měření letní tepelné stability dvojdomu RD Moravany a simulace v DesignBuilder	18
G.3	Dlouhodobá simulace konstrukčních variant RD Moravany v DesignBuilder	21
H	Závěr	24
H.1	Obecné hodnocení	24
H.2	Zodpovězení cílů práce	26
I	Vybraný seznam publikací a projektů autora	27
J	Vybraný seznam použitých zdrojů	28

A Úvod

Již dlouhou dobu nejen v Evropě postupně sílí tlak na čím dál nižší energetickou náročnost staveb. Důležitým mezníkem je směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU EPBD z roku 2010 o energetické náročnosti budov. Od roku 2021 by totiž všechny budovy měly mít „téměř nulovou spotřebu energie“. Tento koncept se stavebně

prakticky velmi blíží pasivnímu konceptu. Jedním ze základů energeticky pasivního domu je, aby měl větší okna orientována zejména k jihu – sluneční tepelné zisky. Pokud nejsou v létě okna stíněna, může tato nadbytečná tepelná zátěž znamenat větší potíže s přehříváním, než je u standardních staveb zvykem.

V poslední době se v České republice, nejenom s rozmachem pasivního stavitelství, začalo uplatňovat větší množství konstrukčních systémů staveb. Patří mezi ně i lehké stavební systémy. Nejpočetnějším zástupcem lehkých stavebních systémů jsou moderní sendvičové dřevostavby, které používají jako nosnou konstrukci lehký dřevěný skelet. V odborné a částečně laické veřejnosti, normách nebo odborné literatuře, panuje názor nebo předpoklad, že lehké stavby a dřevostavby jsou tepelně labilnější a v létě se dost možná přehřívají více než stavby zděné.

Ve světle snižování energetické náročnosti, konceptu pasivního domu, problematiky přehřívání staveb a vnitřní tepelné akumulací hmoty se tedy nabízí laická otázka: „Přehřívá se v létě pasivní dřevostavba podstatně více než pasivní stavba zděná?“

Práce se dále zaměřuje na problematiku tzv. pasivního chlazení. Práce se zabývá přirozenou tepelnou akumulací citelného tepla vnitřními stavebními konstrukcemi bez použití PCM materiálů. Přestože lze poznatky práce aplikovat i na jinak užívané objekty, práce je zaměřena zejména na stavby obytné. Práce se z důvodů výhledu do budoucna zaměřuje již přímo na energeticky pasivní standard.

V práci je využíváno jak experimentálního měření staveb, tak zejména podrobné simulace. Taktéž je v práci věnována pozornost samotnému popisu skutečné tepelné akumulací schopnosti místnosti, respektive stavby, s užitím teorie penetrační hloubky dle ČSN EN ISO 13786. Hlavními experimentálními objekty byly dva reálné pasivní domy: dřevostavba RD Dubňany a zděná stavba RD Moravany.

Stavba RD Moravany byla v roce 2014 pro disertační práci hodnocena v rámci Specifického výzkumu VUT v Brně, FAST 2014 - Projekt: FAST-J-14-2433 s názvem DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ TEPELNÉ STABILITY PASIVNÍHO DOMU - SROVNÁNÍ S DYNAMICKOU SIMULACÍ.

B Současný stav problematiky

B.1 Lehké a těžké konstrukce a stavby

Z hlediska normového zatřídění ČSN 730540-2 lze obvodové konstrukce považovat za „lehké“ a „těžké“. Lehké konstrukce jsou konstrukce s nízkou tepelnou setrvačností, které mají plošnou hmotnost vrstev (od vnitřního líce k rozhodující tepelně izolační vrstvě včetně) nižší než 100 kg/m^2 . Ostatní konstrukce jsou považovány za „těžké“, tj. za konstrukce s vysokou tepelnou setrvačností.

B.2 Letní tepelná stabilita místnosti – požadavky a hodnocení

Tepelná stabilita charakterizuje teplotní vlastnosti prostoru tvořeného stavebními konstrukcemi ve vztahu k vnějším podmínkám. Požadavek na letní tepelnou stabilitu stanovuje norma ČSN 730540-2. Hlavním hodnotícím kritériem je nejvyšší denní teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ v kritické místnosti. Norma stanovuje pro obytné resp. nevýrobní budovy tento požadavek:

$$\theta_{ai,max} \leq 27 \text{ °C}$$

Samotné prokázání požadavků na letní tepelnou stabilitu má být podle normy ČSN 730540-4 ověřováno výpočtovými postupy dle ČSN EN ISO 13791 a ČSN EN ISO 13792 při použití okrajových podmínek podle ČSN 730540-3. Výpočet a hodnocení předpokládá dosažení tzv. kvazistacionárního tepelného stavu – stav charakterizovaný dlouhodobě se opakujícími nestacionárními denními okrajovými podmínkami.

Střídání dne a noci má zásadní vliv na provozní režim domu. Samozřejmostí tak je využít noční větrání pro odvod tepelných zisků z proběhlého dne a vychlazení domu na den následující [8] [9]. Tomuto přirozenému principu chlazení se říká pasivní chlazení.

B.3 Faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu

- tepelné zisky přes průsvitné části obálky budovy,
- tepelné zisky přes neprůsvitné části obálky budovy,
- větrání budovy,
- míra tepelně akumulční schopnosti objektu,

-
- vnitřní tepelné zisky od osob a spotřebičů.

B.4 Teplota jako ukazatel tepelné pohody

Tepelná pohoda znamená, že je dosaženo takových tepelných poměrů, kdy člověku není ani chladno, ani příliš teplo – člověk se cítí příjemně. Pro dosažení tepelné pohody musí mít lidský organismus vyrovnanou tepelnou bilanci [12]. Tu ovlivňují subjektivní a objektivní faktory. Pro tuto práci jsou podstatnější objektivní faktory, které popisují vnitřní prostředí. Mezi objektivní faktory patří: - teplota vzduchu θ_{ai} , - střední radiační teplota θ_r zastupující teplotu okolních povrchů θ_p , - rychlost proudění vzduchu v , relativní vlhkost vzduchu φ

B.5 Fyzikální základy

Šíření tepla

- Vedení tepla (kondukce)
- Proudění tepla (konvekce)
- Záření tepla (sálání, radiace)

Hlavní tepelné technické vlastnosti materiálů

Objemová hmotnost

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (6)$$

Měrná tepelná kapacita

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta t} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (7)$$

Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-grad} \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (8)$$

B.6 Tepelná akumulace stavby

Termín „tepelná akumulace budovy“ popisuje problémy spojené s časově proměnlivým, neustáleným a nestacionárním průběhem teplot a tepelných toků v

konstrukcích, místnostech a budovách. Na letní tepelnou stabilitu vliv zejména krátkodobá tepelná akumulace materiálu. Hlavními druhy tepelné akumulace jsou:

- citelného tepla – samotné materiály a konstrukce budovy
- latentního tepla – materiály se změnou skupenství (PCM)
- jiné – např. fyzikálně chemické

Objemová tepelná kapacita

Objemová tepelná kapacita c_V vyjadřuje množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 m³ daného materiálu při stálém tlaku a definované vlhkosti o 1 K. Objemová tepelná kapacita je definována vztahem:

$$c_V = \rho \cdot c \quad [\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})] \quad (10)$$

C Cíle práce

V rámci práce byly vytyčeny tyto cíle a otázky:

1. **Jaký vliv má vnitřní tepelná akumulace konstrukcí pasivních domů na jejich letní tepelnou stabilitu.**
2. **Jak významný je vliv vnitřní tepelné akumulace vzhledem k ostatním faktorům ovlivňujících letní tepelnou stabilitu pasivních domů (sluneční zisky, vnitřní zisky, větrání atd.).**

D Použité postupy a předpoklady práce

Práce obsahuje několik základních postupů, které mají spolu za úkol řešit daný problém. Jsou jimi: **1. Základní výpočty, 2. Experimentální měření staveb, 3. Srovnávací simulace, 4. Variantní simulace, 5. Nadstavba současného stavu problematiky**

E Úvodní simulace a měření

E.1 Pasivní dřevostavba RD Dubňany

Stavba byla v rámci této práce jedním ze dvou hlavních experimentálních objektů. Na objektu byla měřena během několika dní letní tepelná stabilita. Taktéž byla měřena zimní tepelná stabilita, opět během několika dní.



Obr. 1 Pasivní RD Dubňany – jihozápadní pohled

Dům se nachází v okrese Hodonín na Jižní Moravě, kde jsou také mírně vyšší solární zisky, než je tomu ve zbytku České republiky. Stavba je v energeticky pasivním standardu, měrná potřeba tepla na vytápění E_A dle metodiky PHPP je rovna cca $17 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Konstruktivní systém stavby je z lehkého dřevěného skeletu – I nosníky, mezi nimiž je dřevovláknitá izolace, zevnitř je nosný systém opláštěn OSB deskou. U stěn je na vnitřní straně použito 1x SKD desek a na vnější straně dřevovláknitých (DVD) fasádních desek 60 mm s tenkovrstvou omítkou.

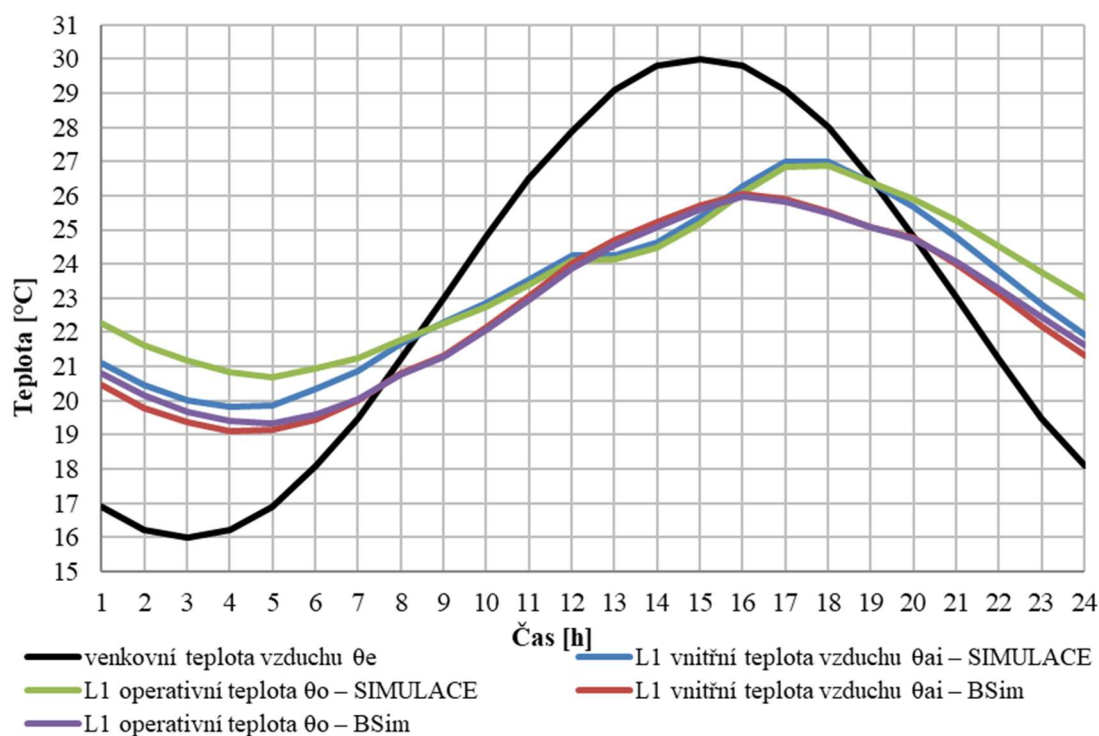
E.2 Srovnávací simulace letní tepelné stability – SIMULACE vs. BSim – dle ČSN 730540

Cíl srovnávací simulace

Cílem je porovnání simulací téhož objektu provedených v odlišných výpočetních programech. Posuzován je reálný objekt - pasivní dřevostavba RD Dubňany. Je porovnávána kvazistacionární simulace programem SIMULACE 2009 dle ČSN 730540-2 a numerická simulace v programu BSim 2002, která se snaží přiblížit kvazistacionárnímu stavu. Dále je provedena dlouhodobější dynamická simulace stavby v BSim ve třech konstrukčních variantách. Jednotlivé varianty jsou spolu porovnány v rámci průběhů vnitřních teplot.

Konstrukční varianty

Pro simulaci je použita varianta konstrukčních skladeb L1, která zhruba odpovídá skutečným konstrukčním skladbám. Pro další dlouhodobou simulaci byla oproti základu navíc skladba L1 doplněna o vnitřní tepelně akumulaci hmotu – varianta L2. Dále byla vytvořena konstrukční varianta zděné stavby M1. Součinitele prostupu tepla venkovních obalových konstrukcí jsou ve všech variantách stejné – tzn. U stěna / střecha / podlaha - 0,12 / 0,11 / 0,10 W/(m²·K).



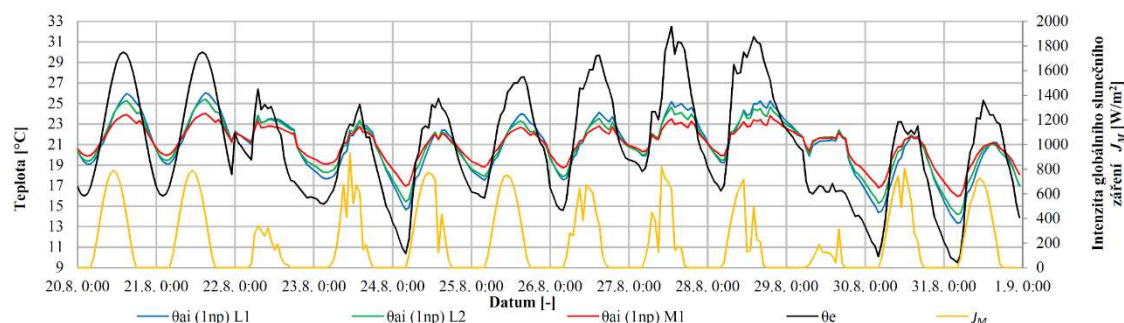
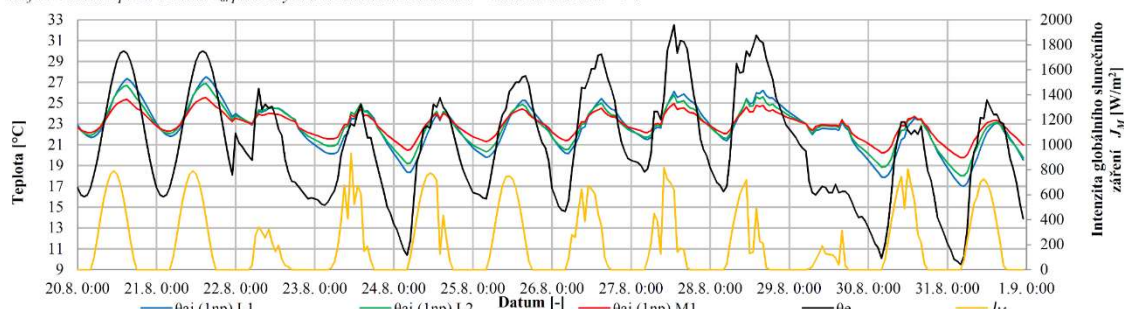
Graf 1 Průběh vnitřních teplot θ_{ai} a θ_o – SIMULACE vs. BSim - kvazistacionární simulace dle ČSN 730540 (noční $n=6 \text{ h}^{-1}$, varianta L1)

Závěr srovnání SIMULACE vs. BSim

Výsledky z programů BSim a SIMULACE jsou rozdílné. U SIMULACE není zcela transparentní postup výpočtu vnitřní tepelné akumulace konstrukcí a následně vliv na vnitřní teplotu θ_{ai} . Pro další simulace v rámci této práce však bude lepší využít nástroj, který dokáže popsat fyzikální děje více podrobně a taktéž dynamicky – tedy např. BSim. Tímto je myšlena i samotná interpretace výsledků simulací v této části práce.

Závěr srovnání konstrukčních variant v BSim

Výsledky ukazují, že se nejvyšší vnitřní teplota $\theta_{ai,max}$ u dřevostavby L1 domu RD Dubňany při normovém dnu dle ČSN 730540–2 a 6 násobné noční výměně vzduchu (přes den 0,5) se zastíněním na jihu pohybuje okolo 26 °C, u zděné varianty M2 je to 24 °C, u dřevostavby L2 je to 25,3 °C. Rozdíl mezi dřevostavbou bez akumulací hmoty L1 a zděnou stavbou M2 je v případě přehřívání zhruba 2 °C, v případě dalších dnů po přehřátí místnosti jsou obě varianty stejné a při normálních dnech, kdy nedochází k přehřívání, je rozdíl mezi systémy zhruba 1,5 °C.

Graf 17 Vnitřní teplota vzduchu θ_{ai} při různých konstrukčních variantách – varianta stínění $n = 6 \text{ h}^{-1}$ Graf 18 Vnitřní teplota vzduchu θ_{ai} při různých konstrukčních variantách – varianta stínění $n = 2 \text{ h}^{-1}$

Graf 2 Vnitřní teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ při různých konstrukčních systémech – varianta stínění $n = 6 \text{ h}^{-1}$

Graf 3 Vnitřní teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ při různých konstrukčních systémech – varianta stínění $n = 2 \text{ h}^{-1}$

Lze tedy říci, že lehká dřevostavba se přehřívá oproti klasické zděné stavbě o něco více, zjednodušeně řečeno 1 až 1,5 °C pro normální dny. Je potřeba brát ohled na posuzovanou stavbu. Obytný prostor je prosklen nadměrně i na pasivní stavbu, navíc jsou okna orientována na jih i západ a je téměř ze všech stran ve styku s vnějším prostředím.

Varianta dřevostavby s betonovou mazaninou L2 se přehřívá oproti klasické zděné stavbě již méně – zhruba $0,5 - 0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naopak rozdíl se zřejmě zvětší, pokud budeme uvažovat těžší zděné stavby.

E.3 Měření letní tepelné stability pasivního RD Dubňany a simulace v BSim

Cíl měření a simulace

Bude provedeno několikadenní měření letní tepelné stability pasivního objektu RD Dubňany. Na základě tohoto měření bude následně provedena srovnávací simulace ve výpočtovém programu BSim. Letní tepelná stabilita této stavby a jejího obytného prostoru bude taktéž řešena kvazistacionární metodou z části.



Obr. 2 Letní měření RD Dubňany – kulový teploměr v obytném prostoru 1.NP



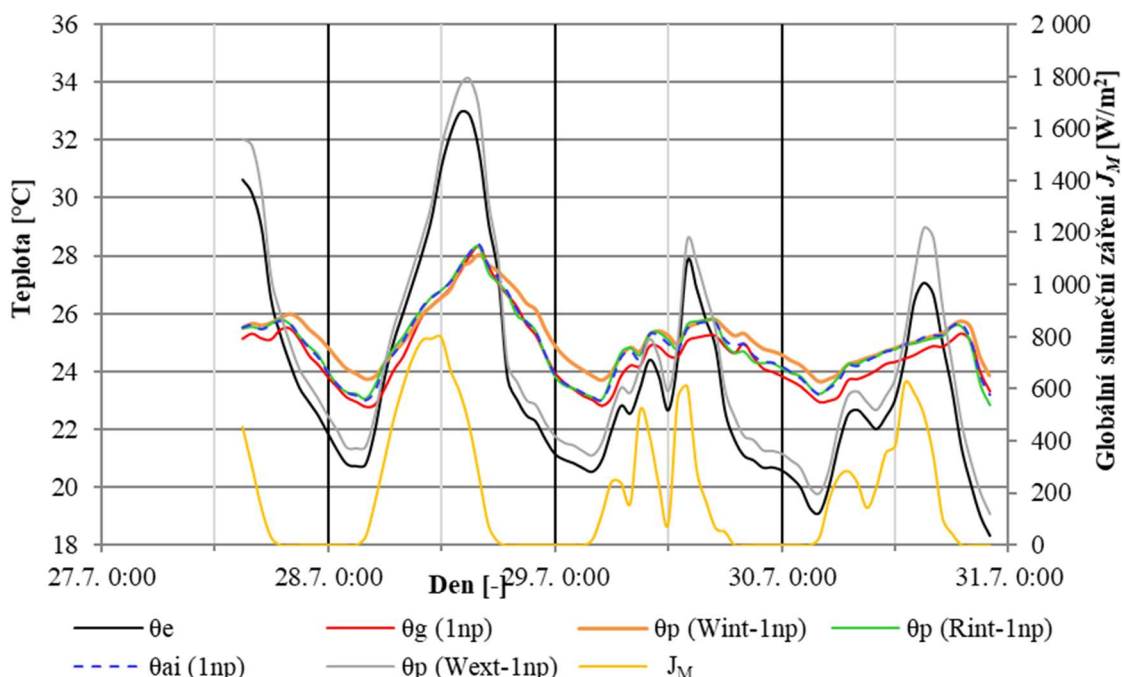
Obr. 3 Letní měření RD Dubňany – měřicí ústředna



Obr. 4 Letní měření RD Dubňany – měření teploty vzduchu v podkrovní místnosti



Obr. 5 Letní měření RD Dubňany – pyranometr usazený v kačírku na rohu ploché střech

Výsledky

Graf 4 Letní měření RD Dubňany - teploty u obytného prostoru 1.NP

Legenda: W – stěna, R – střecha, int – interiér, ext – exteriér, 1np – první podlaží, 2np – podkrovní

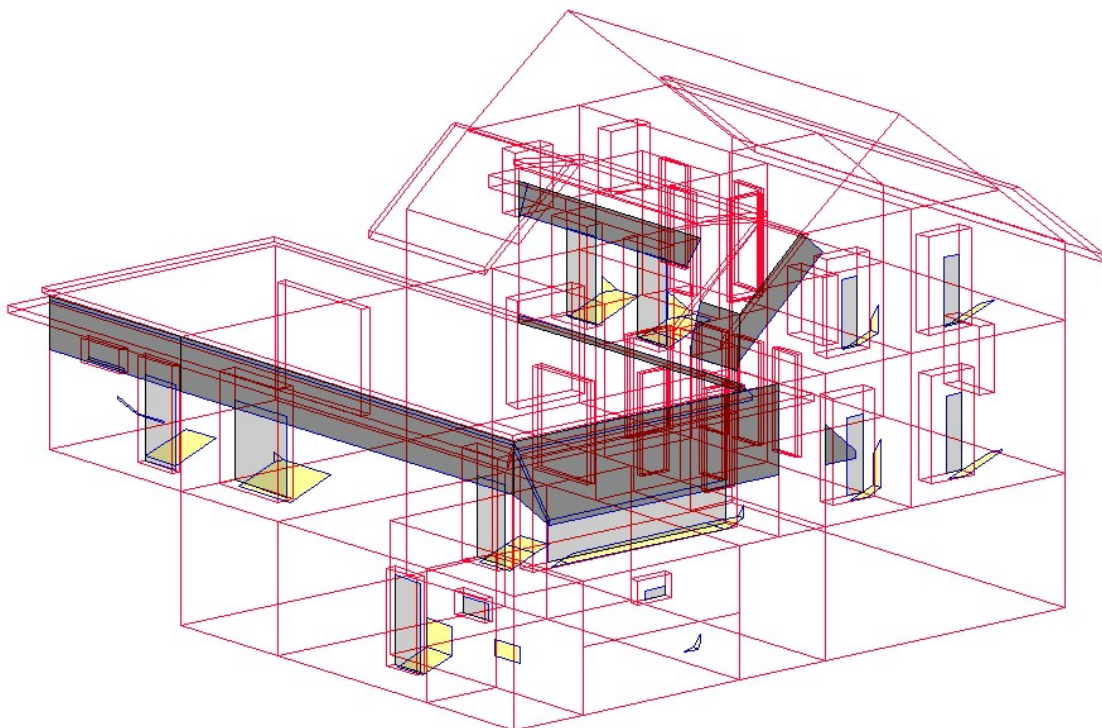
Závěr z měření

Z pohledu absolutních dosažených vnitřních teplot θ_{ai} lze konstatovat, že se stavba v kritický den 28.7. s ohledem na požadavky norem nepřehřívala zcela). Autor při měření očekával razantnější „skleníkový“ efekt. Obytný prostor má sice předpoklady k přehřívání, pravděpodobně zde pomohl konstrukční přesah ploché střechy. Naopak obytný prostor byl zatížen absencí možnosti vychlazení přes noc, venkovní teplota θ_e totiž neklesla pod 21 °C. Taktéž podkrovní místnost s nepoměrně menším oknem se přes noc nevětrala vůbec, proto její teplota θ_{ai} v noci prakticky neklesla a 28.7. teplota vzrostla až na úroveň obytného prostoru. Další dny při stínění obou místností a běžnému dennímu užívání, s vlivem akumulace z předchozího dne, ale naopak menší tepelnou zátěží slunečním zářením a teplotou, se vnitřní teploty θ_{ai} pohybují ve špičkách od 24 po 25 °C.

Popsané skutečnosti upozorňují na podstatný vliv slunečních zisků na vnitřní nejvyšší teplotu vzduchu θ_{ai} . Zjednodušeně řečeno, obytný prostor se při vyšší tepelné zátěži nestíněnými okny přehřívá o cca 4 °C více než při standardních dnech se stíněním.

Pakliže opomeneme absenci nočního větrání, u podkrovní místnosti se opět dostaneme k hodnotě cca 4 °C při vyšší tepelné zátěži a standardním provozu.

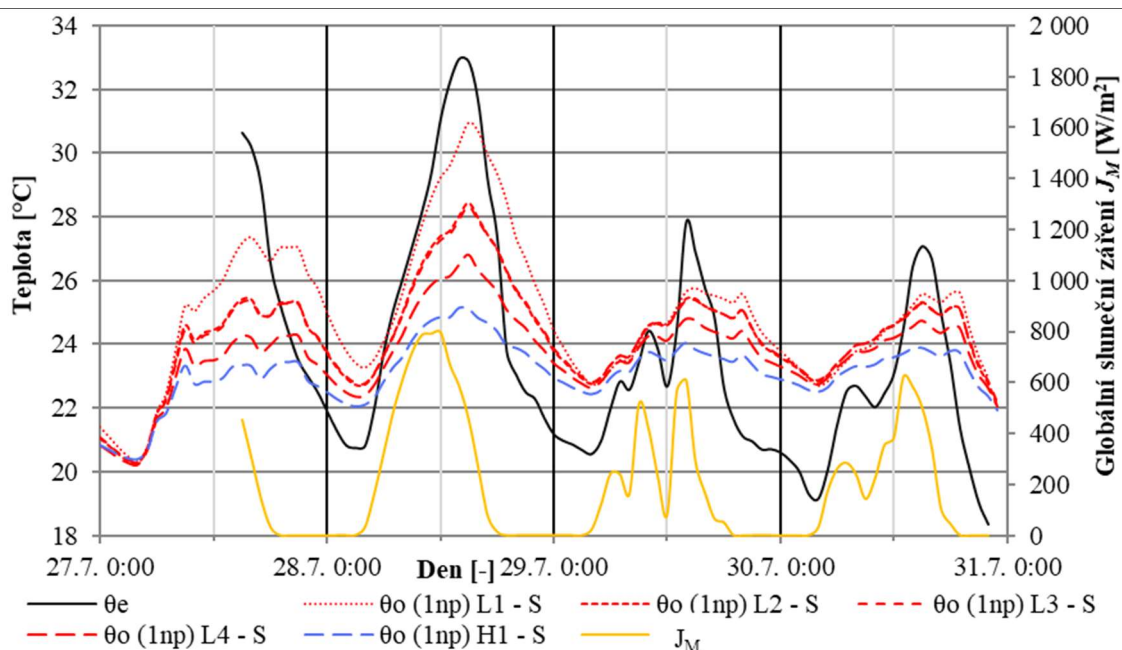
Z naměřených údajů lze konstatovat, že vnitřní povrchová teplota obalových konstrukcí místnosti do exteriéru θ_p a vnitřní teplota vzduchu θ_{ai} dosahují obdobných, někdy až téměř totožných hodnot. To samé lze říci o srovnání vnitřní teploty vzduchu θ_{ai} (I_{np}) a teploty kulového teploměru θ_g (I_{np}), respektive operativní teploty θ_o .



Obr. 6 Letní simulace RD Dubňany – zobrazení slunečních tepelných zisků v BSim

Popis simulace konstrukčních variant

- L1 – skutečné konstrukce, bez příčky CPN
- L2 – skutečné konstrukce, s betonovou mazaninou 60 mm v podlaze
- L3 – varianta L2 + omítka 15 mm na vnitřní podélné stěně obýváku
- L4 – varianta L2 + vnitřní podélná stěna obýváku z CPN 150 mm
- H1 – VPC cihly 200 mm + EPS, ŽB stropy, střechy lehké (viz varianty L)



Graf 5 Průběh vnitřních teplot u konstrukčních variant – simulace BSim (obytný prostor 1.NP)

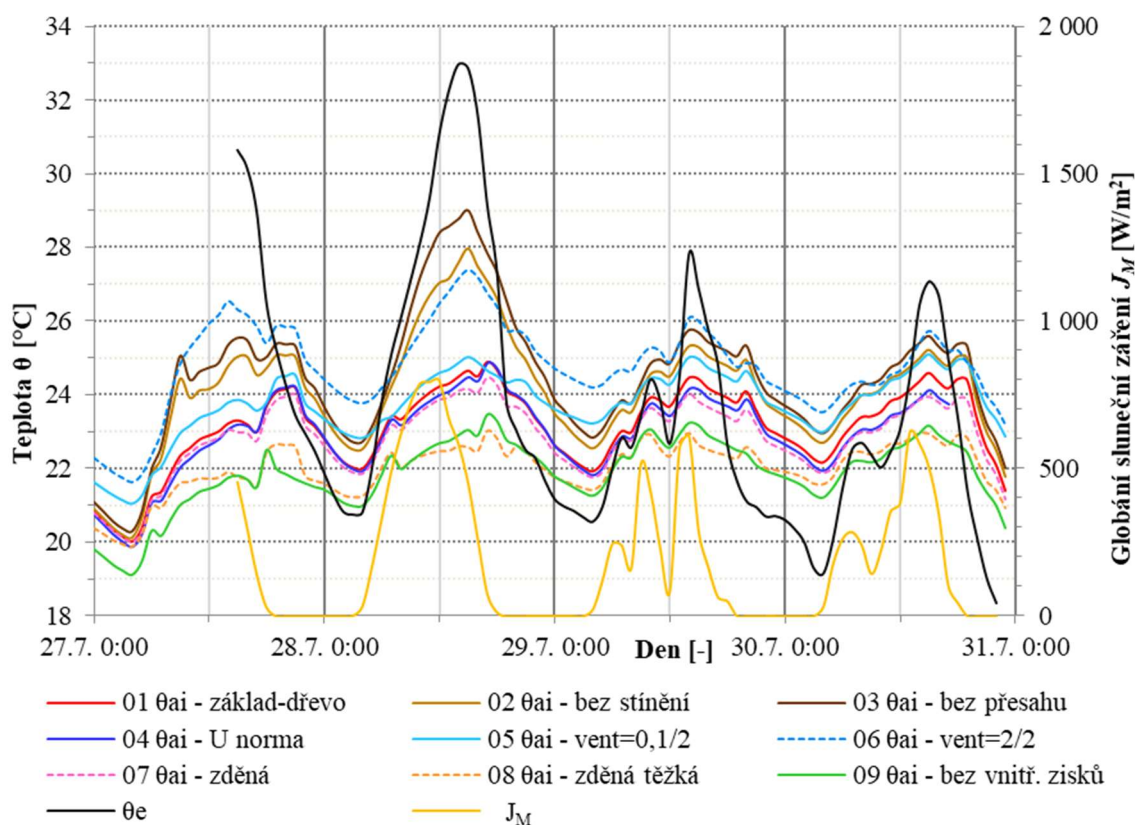
Závěr simulace konstrukčních variant

Lehká dřevostavba se přehřívá více než velmi těžká zděná stavba. V případě dnu s vysokou tepelnou zátěží místnosti mohou být rozdíly mezi lehkou dřevostavbou a velmi těžkou zděnou stavbou pro kritickou místnost více než 6 °C. U normálních dnů bez vysoké tepelné zátěže je však rozdíl spíše 1,5 – 2,0 °C. Rozdíly dřevostavby s malou měrou tepelné akumulace se od velmi těžké zděné stavby snižují na 1 °C a méně. Tento rozdíl se již dá označit za podobný výsledek, který se uživateli poměrně těžce rozlišuje. Avšak rozdíl více než 1,5 – 2,0 °C je již znatelný. Proto není zcela vhodné realizovat dřevostavby a lehké stavby s téměř žádnou tepelně akumulací hmotou.

E.4 Simulace faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu

Cíl simulace

Bude provedena variantní simulace letní tepelné stability pasivního RD Dubňany. Simulace bude ve variantách zohledňovat jednotlivé faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu. Simulace bude vycházet z provedeného měření, respektive simulace letní tepelné stability v tomto objektu. Výsledky simulace budou sloužit pro srovnání a vyhodnocení jednotlivých faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu.

VýsledkyGraf 6 Vliv různých faktorů na vnitřní teplotu vzduchu θ_{ai} - simulace BSimZávěr simulace faktorů

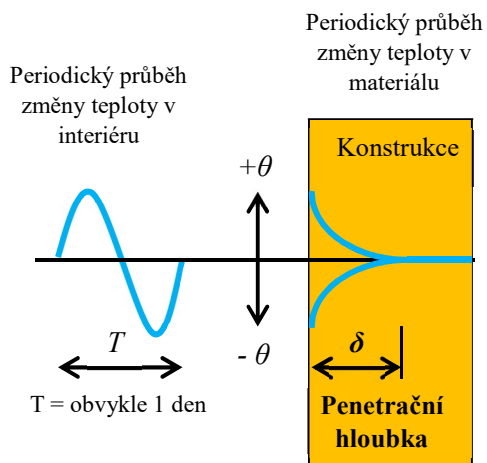
Viz Závěr práce.

F Tepelná akumulace – pokračování

Penetrační hloubka δ a je definována v normě ČSN EN ISO 13786.

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}} \quad [\text{m}]$$

Periodická penetrační hloubka vyjadřuje hloubku materiálu od vnější strany, která je ovlivněna tepelnou vlnou prostřednictvím změny teploty v průběhu periodického tepelného stavu na povrchu materiálu (Obr. 7). V případě výpočtů krátkodobé tepelné akumulace u obytných staveb, pod které letní tepelná stabilita spadá, je vhodné uvažovat periodu $T = 24$ hodin.



Obr. 7 Periodická penetrační hloubka δ - schéma

Nejpřesnější metodou je v normě ČSN EN ISO 13786 [3] výpočet plošné tepelné kapacity κ s principem periodické tepelné vodivosti za použití matice přenosu tepla Z (metoda Z). Veličina je určena vzorcem:

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{11}-1}{Z_{12}} \right| \quad [\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

Celková tepelná kapacita místnosti C_m [kJ/K] je tvořena součtem všech konstrukcí a jejich plošných tepelných kapacit κ . Pro relativní srovnání různých místností je vhodné uvažovat měrnou tepelnou kapacitu místnosti $C_{m,v}$, která je vztažena na m^3 objemu místnosti [kJ/($\text{m}^3 \cdot \text{K}$)].

MATERIÁL	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Objemová tepelná kapacita	Součinitel tepelné vodivosti	Penetrační hloubka (T=1den) [m]	Procento penetrační hloubky / 100	Efektivní tloušťka pro výpočet plošné tep. kapacity	κ					
								Ploš. tep. kapacita - metoda δ	Ploš. tep. kapacita - metoda δ+R+Rs	Ploš. tep. kapacita - metoda matice Z	Ploš. tep. kapacita - metoda matice Z		
ρ	c	cv	λ	δ	-	d	[kJ/(m ² ·K)]						
Tepelný odpor při přestupu tepla R _{si} :													
								0	0,075	0,15	0	0,075	0,15
Masivní stavby													
Železobeton	2400	1020	2,45	1,58	133	0,85	113	277	153	87	231	110	70
Cihla plná pálená na maltu	1800	900	1,62	0,84	119	0,70	84	135	109	76	137	85	59
Vápenopískové tvárnice	2000	1000	2,00	1,05	120	0,70	84	168	124	80	170	95	64
Vápenopískové tvárnice - nižší obj. hmotnost	1400	1000	1,40	0,4	89	0,70	62	87	79	63	88	64	49
Keramické dutinové tvárnice - vyšší obj. hmotnost	825	1000	0,83	0,28	97	0,70	68	56	53	48	56	46	38
Keramické dutinové tvárnice	650	1000	0,65	0,12	71	0,70	50	32	32	31	33	29	26
Pórobetonové tvárnice	500	1000	0,50	0,137	87	0,70	61	30	30	29	31	27	24
Pórobetonové tvárnice superizolační	300	1000	0,30	0,084	88	0,70	61	18	18	18	19	17	16
VC omítka 15 mm	1800	850	1,53	0,97	132	-	15	23	23	22		23	
Lehké sendvičové stavby													
Měkké dřevo	400	2510	1,00	0,18	70	0,70	49	49	48	43	50	41	35
CLT panel 90mm	490	1600	0,78	0,13	68	0,85	57	45	44	40	37	32	28
Sádkartonová deska 12,5 mm	750	1060	0,80	0,22	87	-	13	10	10	10	-	10	-
OSB deska 15mm	630	1580	1,00	0,15	64	-	15	15	15	15	-	15	-
Hliněný panel 25mm	1500	1100	1,65	0,35	76	-	25	41	40	38	-	40	-
Ekopanel (panel ze slámy) 58mm	379	1700	0,64	0,11	69	0,90	62	40	39	36	33	30	27
Podlahy													
Betonová mazanina 60 mm	2300	1020	2,35	1,36	126	-	60	141	112	77	139	103	72
Litý anhydrit 40 mm	2100	850	1,79	1,2	136	-	40	71	67	56	71	65	55
Sádrovláknitá deska 2x10 mm	1175	1050	1,23	0,3	82	-	20	25	24	24	-	24	-
Tepelné izolace													
Foukaná celulóza	50	2000	0,10	0,041	106	0,70	74	7	7	7	-	-	-
Dřevovláknitá izolace měkká	45	2100	0,09	0,042	111	0,70	77	7	7	7	-	-	-
Dřevovláknitá izolace tuhá	250	2100	0,53	0,051	52	0,70	36	19	19	19	-	-	-
Polystyrenová izolace	15	1270	0,02	0,039	237	0,70	166	3	3	3	-	-	-
Minerální izolace tuhá	160	800	0,13	0,044	97	0,70	68	9	9	9	-	-	-
Minerální izolace měkká	20	860	0,02	0,04	253	0,70	177	3	3	3	-	-	-
Vzduch 40mm	1,3	1010	0,00	0,222	2156	0,70	1509	2	2	2	-	-	-
Ostatní													
Voda 20°C	998	4200	4,19	0,6	63	0,70	44	184	130	82	-	-	-

Tabulka 1 Plošná tepelná kapacita κ běžných stavebních materiálů

G Hlavní simulace a měření

G.1 Simulace konstrukčních variant RD Dubňany v BSim

Cíl simulace

Bude provedena variantní simulace letní tepelné stability pasivního domu RD Dubňany ve vícero konstrukčních variantách. Simulace bude vycházet z klimatických podmínek při simulaci, respektive měření letní tepelné stability této stavby z roku 2012. Konstrukční varianty budou voleny od lehké dřevostavby až po velmi těžkou zděnou stavbu. Výsledky simulace budou sloužit pro vyhodnocení vlivu vnitřní tepelné akumulační hmoty na letní tepelnou stabilitu dané stavby v rámci jednoho samostatného dne.

Popis simulace

Konstrukční varianty	Podlahy	Stěny	Střechy (plochá - 1.NP / šikmá - podkroví)
Lehké stavby: sendvič dřevostavby – I nosníky			
L1	OSB	SDK + OSB	SDK + OSB / SDK
L2	OSB + bet. mazanina 50mm	L1 + akum. příčka CPN 12m ²	
L3		3x SDK + OSB	2x SDK + OSB / 2x SDK
L4		Hliněná omítka 50mm	SDK + OSB / SDK
Těžké stavby: keramické tvárnice			
M1	Ker. strop + bet. mazanina 50mm	Keramické tvárnice	I nosníky: SDK + OSB
M2	Ker. strop + bet. mazanina 110mm	Keramické tvárnice	Ker. Strop / I nosníky: SDK
Velmi těžké stavby: VPC tvárnice a železobeton			
H1	Ker. Strop + bet. mazanina 50mm	VPC tvárnice 2000kg/m3	ŽB Strop / I nosníky: SDK
H2	ŽB Strop + bet. mazanina 50mm	VPC tvárnice 1400kg/m3	
H3		VPC tvárnice 2000kg/m3	
H4		Železobeton	

Tabulka 2 Zjednodušený popis konstrukčních variant RD Dubňany – simulace BSim

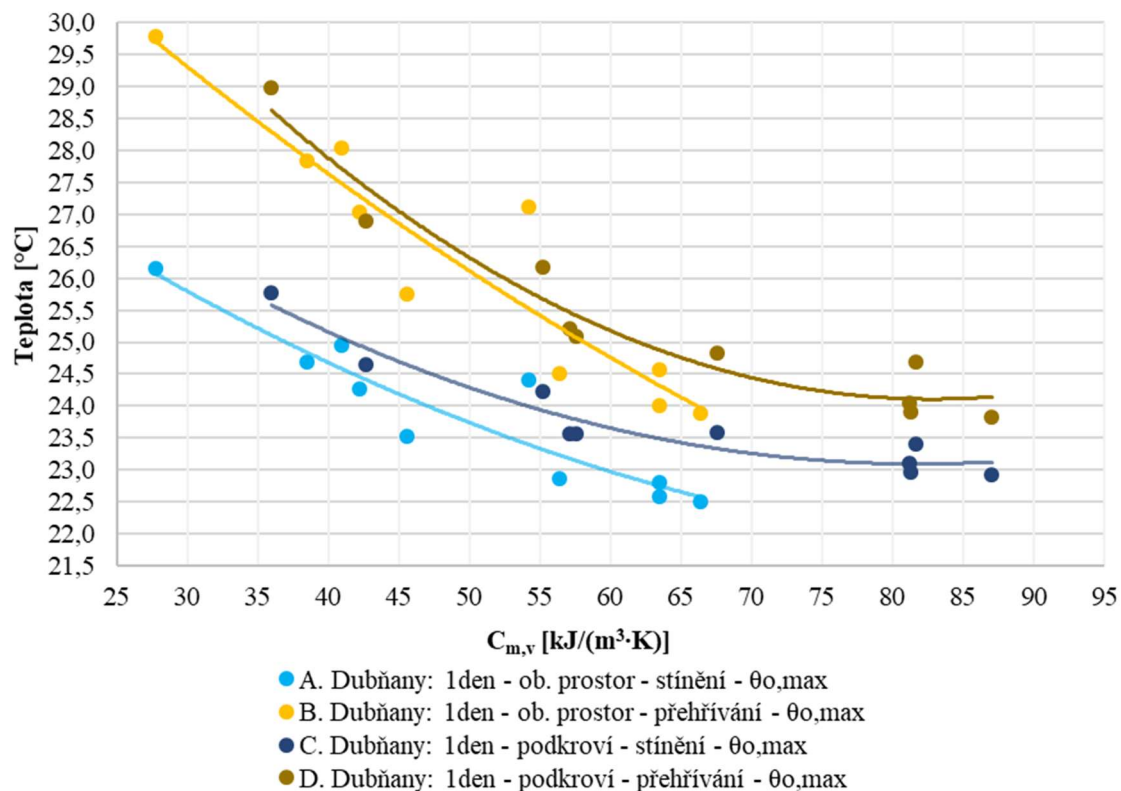
Tepelná kapacita místnosti

Aby mohly být jednotlivé konstrukční varianty porovnávány, musí být srovnány z hlediska celkové tepelné kapacity místnosti C_m (Tabulka 3). Tepelné kapacity jsou prezentovány jako měrné, vztažené na m³ vnitřního vzduchu místnosti - $C_{m,V}$.

RD Dubňany_obytný prostor 1.NP	plocha [m ²]	L1	L2	L3	L4	M1	M2	H1	H2	H3	H4
obvodová stěna	38,9	17	17	29	69	41	41	71	53	71	79
vnitřní stěna	10,8	28	28	37	69	41	41	77	59	77	84
příčka	12,8	20	76	31	65	32	32	49	37	49	56
podlaha 1.NP	56,8	24	40	40	40	40	39	40	40	40	40
plochá střecha	56,8	27	27	33	27	27	36	51	51	51	51
celkem	176,0	4 096	5 684	6 048	8 004	6 232	6 732	9 375	8 325	9 367	9 809
PP podlahová plocha	56,8	72	100	106	141	110	119	165	147	165	173
A/V	1,2	Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,v}$ [kJ/(m ³ ·K)]									
VO vnitřní objem	147,7	28	38	41	54	42	46	63	56	63	66
To stínění		26,16	24,70	24,96	24,41	24,27	23,52	22,81	22,86	22,59	22,51
To přehřívání		29,78	27,84	28,03	27,11	27,04	25,75	24,57	24,50	24,01	23,88

RD Dubňany_pokoj podkrovi	plocha [m ²]	L1	L2	L3	L4	M1	M2	H1	H2	H3	H4
obvodová stěna	13,7	17	17	29	69	41	41	71	53	71	79
vnitřní stěna	9,7	28	28	37	69	41	41	77	59	77	84
příčka	8,2	20	20	31	65	32	32	49	37	49	56
strop 1.NP	16,5	24	40	40	40	40	39	40	40	40	40
šikmá střecha	2,8	17	17	25	17	17	17	17	17	17	17
strop 2.NP	14,3	17	17	25	17	17	17	17	17	17	17
celkem	65,2	1 365	1 620	2 094	3 097	2 184	2 167	3 085	2 565	3 083	3 303
PP podlahová plocha	16,5	83	98	127	188	132	131	187	155	187	200
A/V	1,7	Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,v}$ [kJ/(m ³ ·K)]									
VO vnitřní objem	38,0	36	43	55	82	58	57	81	68	81	87
To stínění		25,78	24,65	24,23	23,40	23,56	23,57	22,96	23,58	23,10	22,93
To přehřívání		28,99	26,90	26,17	24,70	25,09	25,21	23,91	24,83	24,05	23,83

Tabulka 3 Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,v}$ konstrukčních variant a dosažené vnitřní teploty pro obytný prostor 1.NP a podkrovní místnost 2.NP



Graf 7 Dosažené vnitřní teploty $\theta_{o,max}$ u konstrukčních variant místností RD Dubňany - simulace BSim

Závěr

Z dosažených teplot je patrné, že se velmi lehké stavby přehřívají více než těžké stavby. Výsledky vlivu tepelné kapacity místnosti na výslednou vnitřní teplotu i pro samotnou stíněnou variantu mírně nadhodnocené.

Velmi lehké dřevostavby bez akumulační hmoty se přehřívají oproti standardní zděné stavbě z keramických tvárnic v normální dny o cca 2,0 °C. Pakliže srovnáme velmi lehkou dřevostavbu a těžkou zděnou stavbu z vápenopískových tvárnic, rozdíl se zvýší na cca 3,0 °C. V případě srovnání dřevostavby s malou měrou tepelné akumulace (např. mokré systémy podlah), sníží se rozdíl oproti zděné stavbě z keramických tvárnic na cca 0,5 – 1,0 °C a rozdíl oproti těžké zděné stavbě z vápenopískových tvárnic na cca 1,8 °C. V případě přehřívání místností v některé dny mohou rozdíly mezi velmi lehkou dřevostavbou a velmi těžkou zděnou stavbou vystoupat až na rozdíl cca 5,0 °C.

Pro závěr je vhodné vyjít z předpokladu, že rozdíly teplot $\theta_{o,max}$ mezi konstrukčními systémy do 1 °C budou ještě přijatelné. Avšak velmi lehké dřevostavby dosahují již vyšších rozdílových teplot, rozdíly jsou na úrovni 2 °C. Uživatelé budou tento nárůst teploty pravděpodobně vnímat negativně. Tyto rozdíly se zřejmě zachovají i při snížení tepelné zátěže místnosti. Do velmi lehkých dřevostaveb je z výše jmenovaných důvodů vhodné instalovat rozumné množství tepelné akumulační hmoty.

G.2 Dlouhodobé měření letní tepelné stability dvojdomu RD Moravany a simulace v DesignBuilder

Cíl měření a simulace

Bude provedeno dlouhodobé měření letní tepelné stability pasivního dvojdomu RD Moravany. Měření je poměrně výjimečné v tom, že jsou měřeny obě identické části domu, které jsou poté vzájemně srovnávány. Měření by mělo poskytnout základní poznatky o tepelné stabilitě objektu v létě.

Stavba RD Moravany

Vyšetřovaný objekt se nachází v blízkosti města Brna ve vesnici Moravany. Dvojdům má dvě nadzemní podlaží a obytné podkroví, stavba splňuje energeticky pasivní standard. Objekt je rozdělen na dvě symetricky totožné obytné jednotky – samostatné rodinné domy (Obr. 8). Jejich osa symetrie v podobě hřebenu střechy je orientována směrem východ – západ. Jižní a severní obytná jednotka mají hlavní prosklené výplně otvorů orientovány na západ. Plocha průsvitných výplní otvorů jednotlivých obytných místností je vzhledem k pasivnímu standardu spíše nižší. Nosný systém tvoří keramické dutinové tvárnice tloušťky 250 mm s tepelnou izolací EPS 70F 200 mm. Keramické příčky mají tloušťku 150 mm, strop 1.NP je také systémový keramický typu MIAKO. Strop 2.NP je trémový. V podlahách se nachází litý anhydrit, šikmá střecha je tvořena klasickým krovem zaizolovaným minerální vatou tloušťky 400 mm.



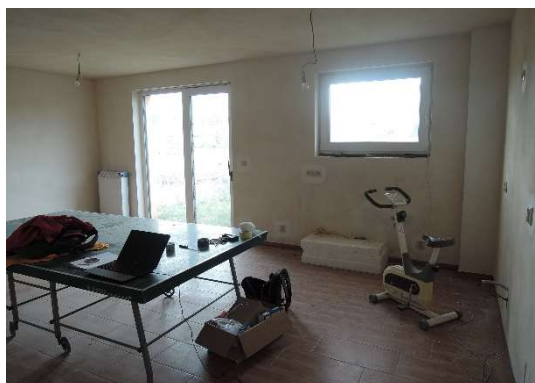
*Obr. 8 Rodinný dvojdům v Moravanech –
pohled od JZ - jižní obytná jednotka vpravo a
severní obytná jednotka vlevo*



Obr. 9 Výstavba RD Moravany – pohled od JV

Stavba RD Moravany byla v roce 2014 pro disertační práci hodnocena v rámci Specifického výzkumu VUT v Brně, FAST 2014 - Projekt: FAST-J-14-2433 s názvem DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ TEPELNÉ STABILITY PASIVNÍHO DOMU - SROVNÁNÍ S DYNAMICKOU SIMULACÍ.

Popis měření



Obr. 10 Obývací pokoj 1.01 v 1.NP – jižní obytná jednotka



Obr. 11 Měření venkovní teploty vzduchu – čidlo stíněné krabicí

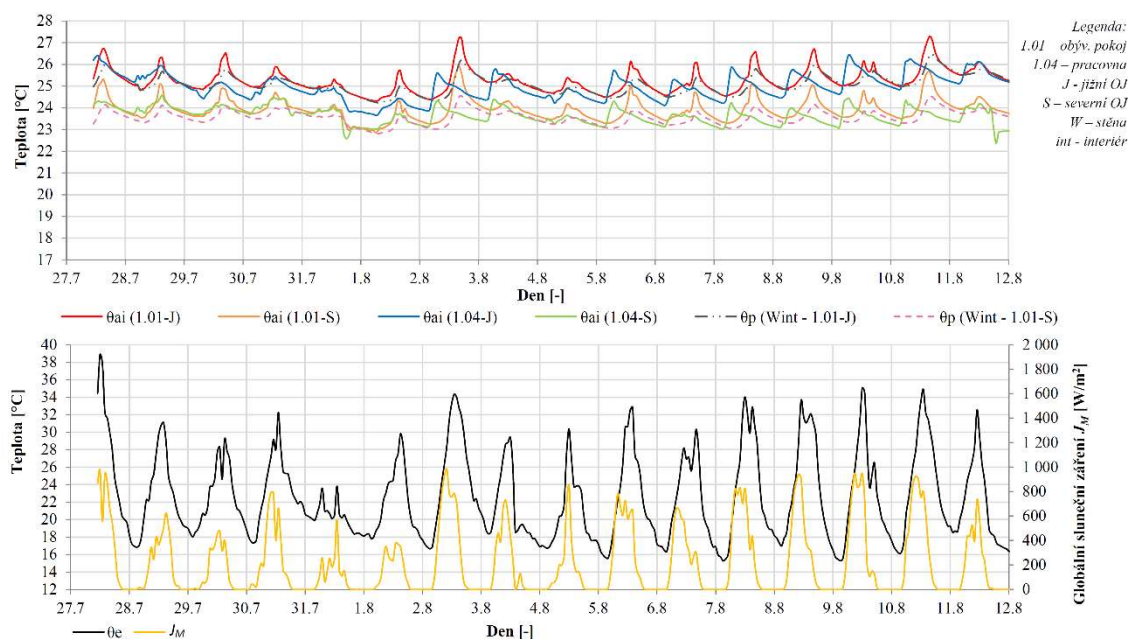


Obr. 12 Měření vnitřní povrchové teploty obvodové stěny – čidlo lepeno páskami



Obr. 13 Pracovna 1.04 v 1.NP - jižní obytná jednotka

Výsledky měření



Graf 8 Letní měření RD Moravany – naměřené vnitřní teploty a klimatické podmínky 1.část - 27.7.2014 – 12.8.2014

Legenda: W – stěna, int – interiér, 1.01 – obývací pokoj, 1.04 – pracovna, J - jižní OJ, S – severní OJ

Závěr z měření

Z hlediska relativního srovnání identických místností resp. obytných jednotek je v naměřených hodnotách shledán významný rozdíl. Autor se domnívá, že nelze jednoznačně určit příčinu.

Experimentální měření rodinného dvojdomu v Moravanech ukázalo, že přes nadstandardně vysokou tepelnou zátěž způsobenou absencí nočního větrání nedochází k výraznému přehřívání stavby. Role vnitřní tepelně akumulární hmoty na výsledné vnitřní teplotě objektu se nedá zcela jednoznačně určit. Zjištěná fakta upozorňují také na podstatný vliv slunečního záření a větrání stavby na výsledné vnitřní teploty místností objektu. Potenciál možnosti přirozeného vnitřního míchání vzduchu s místnostmi o nižší teplotě může být využit pro další snižování teploty tepelně exponované místnosti. Zejména noční větrání dokáže efektivně snížit vnitřní teplotu vzduchu stavby. Pokud toto noční větrání není prováděno, pasivní stavba udržuje vnitřní teplotu vzduchu. Je to kvůli velkému vlivu slunečních zisků přes průsvitné části budovy a malému vlivu prostupu tepla přes neprůsvitné části.

G.3 Dlouhodobá simulace konstrukčních variant RD Moravany v DesignBuilder

Cíl dlouhodobé simulace

Bude provedena dlouhodobá simulace letní tepelné stability pasivního dvojdomu RD Moravany ve vícero konstrukčních variantách. Konstrukční varianty budou voleny od lehké dřevostavby až po velmi těžkou zděnou stavbu. Výsledky simulace budou sloužit pro vyhodnocení vlivu vnitřní tepelně akumulární hmoty na letní tepelnou stabilitu dané stavby.

Popis simulace

Konstrukční varianty	Vnější stěny	Vnitřní stěny	Podlaha 1.NP	Strop 1.NP
Lehké stavby: sendvič dřevostavby – lehký fošinkový skelet				
L1	SDK	SDK	2x OSB	SDK
L2	SDK + DVD + OSB	SDK + OSB	2x OSB	SDK+ OSB
L3	SDK + DVD + OSB	SDK + OSB	Anhydrit 50mm	SDK + OSB
L4	3x SDK	3x SDK	Anhydrit 50mm	3x SDK
L5	3x SDK	3x SDK	Bet. mazanina 70mm	3x SDK
L6	SDK + OSB	CPP 140mm	Anhydrit 50mm	SDK + OSB
Těžké stavby: pórobetonové a keramické tvárnice				
M1	Pórobetonové tvárnice 300kg/m ³	Pórobetonové tvárnice 300kg/m ³	Anhydrit 50mm	SDK + Pórobet. strop
M2	Keramické tvárnice 440mm bez zateplení	Keramické tvárnice	Anhydrit 50mm	SDK + Pórobet. strop
M3	Keramické tvárnice	Keramické tvárnice	Anhydrit 50mm	SDK + Keram. strop
Velmi těžké stavby: VPC tvárnice a železobeton				
H1	VPC tvárnice 1200kg/m ³	VPC tvárnice 1200kg/m ³	Anhydrit 50mm	SDK + Keram. strop
H2	VPC tvárnice 2000kg/m ³	VPC tvárnice 2000kg/m ³	Anhydrit 50mm	SDK + Keram. strop
H3	VPC tvárnice 2000kg/m ³	VPC tvárnice 2000kg/m ³	Bet. mazanina 70mm	SDK + Keram. strop
H4	VPC tvárnice 2000kg/m ³	VPC tvárnice 2000kg/m ³	Bet. mazanina 70mm	SDK + ŽB strop
H5	Železobeton	Železobeton	Bet. mazanina 70mm	SDK + ŽB strop

Tabulka 4 Zjednodušený popis konstrukčních variant RD Moravany – simulace DesignBuilder

Tepelná kapacita místnosti

RD Moravany_obyvací pokoj jižní OJ	plocha [m ²]	L1	L2	L3	L4	L5	L6	M1	M2	M3	H1	H2	H3	H4	H5
obvodová stěna	23,5	14	20	20	35	35	25	22	44	46	51	72	72	72	79
vnitřní stěna	14,8	15	24	24	35	35	72	22	50	50	55	76	76	76	81
stěna mezipatrová	13,0	15	24	24	35	35	72	22	50	50	55	76	76	76	81
podlaha	31,1	38	38	60	60	66	60	60	60	60	60	60	66	66	66
strop 1.NP	31,1	15	25	25	37	37	25	31	31	34	34	34	34	40	40
celkem	113,5	2419	3098	3779	4827	5019	5229	3965	5260	5413	5644	6731	6928	7124	7437
PP podlahová plocha	31,1	78	100	121	155	161	168	127	169	174	181	216	223	229	239
A/V	1,4	Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,v}$ [kJ/(m³·K)]													
VO vnitřní objem	82,5	29	38	46	59	61	63	48	64	66	68	82	84	86	90
Top průměrná		23,94	23,33	22,96	22,74	22,68	22,19	23,07	22,79	22,48	22,32	21,95	21,87	21,80	21,64

Tabulka 5 Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,v}$ konstrukčních variant a dosažené vnitřní teploty pro

obytný prostor 1.01- jižní OJ

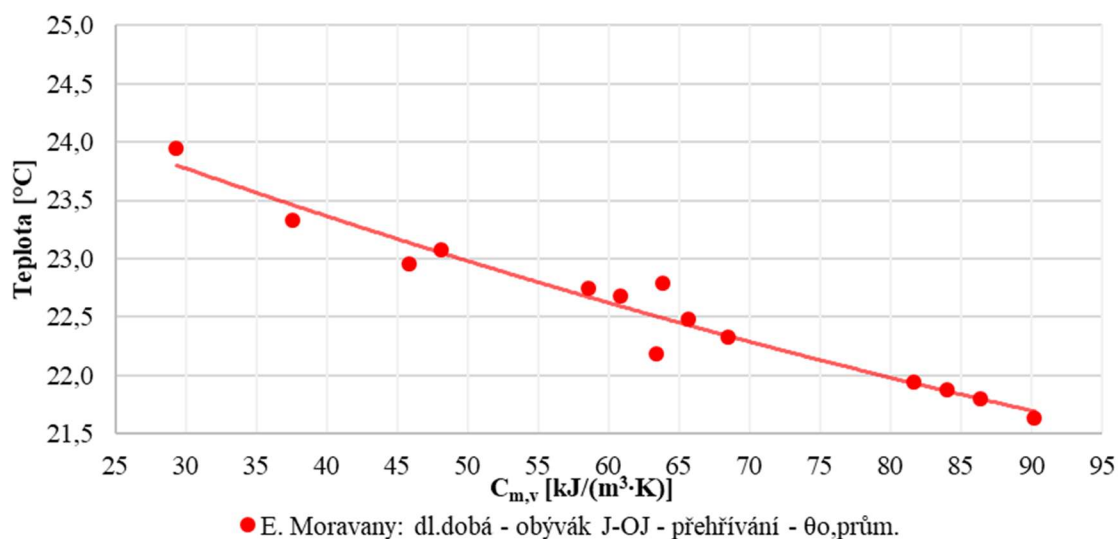
Výsledky

Výsledky jsou uvedeny jako nejvyšší dosažené teploty vnitřního vzduchu $\theta_{o,max}$ pro obývací pokoj 1.01 jižní OJ (Tabulka 6). Lze pozorovat, že se očekávaně přehřívají nejvíce lehké dřevostavby, nejméně pak zděné a masivní stavby.

[°C]	L1	L2	L3	L4	L5	L6	M1	M2	M3	H1	H2	H3	H4	H5
>30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	5	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	7	5	2	2	1	-	3	1	-	-	-	-	-	-
27	9	8	7	5	5	1	6	5	3	1	-	-	-	-
26	8	11	11	9	7	7	7	8	6	5	1	-	-	-
25	10	8	8	11	12	9	12	10	10	11	5	5	3	3
24	11	9	10	10	12	11	11	10	11	10	15	15	16	12
23	9	11	11	10	9	12	13	14	12	15	15	14	14	16
22	9	13	15	14	16	14	18	19	22	21	23	26	25	22
21	10	11	10	13	11	17	7	11	12	12	12	11	12	17
20	5	5	7	9	10	8	9	8	8	8	10	10	11	7
<20	7	9	10	9	9	13	6	6	8	9	11	11	11	15

Tabulka 6 Četnosti nejvyšších teplot vzduchu $\theta_{ai,max}$ pro konstrukční varianty v obývacím pokoji 1.01- jižní OJ – 1.6 – 31.8 (simulace DesignBuilder)

Další interpretací výsledků může být průměrná teplota složená z nejvyšších dosažených vnitřních teplot vzduchu $\theta_{o,max}$ za vyšetřované období (Graf 9). Graf všechny dosažené nejvyšší teploty průměruje, jednoduše tedy ilustruje rozdíly mezi jednotlivými konstrukčními variantami. Za významný rozdíl, a taktéž minimální rozlišovací schopnost vnímání teploty, je vhodné považovat hodnotu 1 °C (viz část 0).



Graf 9 Průměrná teplota z nejvyšších vnitřních dosažených teplot $\theta_{ai,max}$ pro konstrukční varianty v obývacím pokoji 1.01 – jižní OJ – 1.6 – 31.8 (simulace DesignBuilder)

Závěr

Z výsledků vyplývá, že tepelná akumulace místnosti v podobě tepelné kapacity místnosti $C_{m,v}$ má vliv na nejvyšší dosaženou teplotu vzduchu v interiéru $\theta_{o,max}$. Pokud vezmeme v úvahu nejlehčí a nejtěžší možný konstrukční systém stavby, rozdíly průměru z nejvyšších dosažených teplot vzduchu za vyšetřované období jsou cca 2,3 °C.

Interpretace tohoto výsledku může být taková, že každý den ve všech 3 vyšetřovaných měsících byla nejvyšší teplota u nejlehčí dřevostavby o 2,3 °C vyšší než u nejtěžší železobetonové stavby. Taktéž ve srovnání četností jednotlivých dosažených nejvyšších teplot za celé období je zásadní rozdíl. U nejlehčí dřevostavby je za období dosaženo v maximech 2 x 30 °C, u nejtěžší železobetonové stavby je to pouze 3 x 25 °C.

Pakliže srovnáme zástupnější a standardnější variantu dřevostavby L3 a velmi často používaný systém keramických dutinových tvárnic M3, sníží se rozdíl z 2,3 °C na 0,5 °C. Tento rozdíl je již velmi malý a poměrně těžce rozpoznatelný. Rozdíl teploty je zprůměrovaný na celém letním období. V některé dny budou tedy rozdíly menší až žádné, v některé dny zase větší. Taktéž četnosti dosažených nejvyšších teplot nejsou o mnoho vyšší. Pakliže bychom srovnávali variantu dřevostavby L3 s těžší vápenopískovou zděnou stavbou, rozdíl by se zvýšil na 1 °C, což je již znatelné.

Opět je konstatováno, že není zcela vhodné realizovat velmi lehké stavební systémy, budou se totiž přehřívat znatelně více. Takovými stavbami jsou například dřevostavby s pouhým sádrokartonovým obložením stěn a stropů bez dalších konstrukčních desek a se suchými systémy podlah. Obvykle realizované dřevostavby s malou měrou tepelné akumulace v podobě anhydritu nebo betonu v podlahách, OSB nebo sádrovláknitých desek za sádrokartonovým obkladem se již nepřehřívají o mnoho více.

H Závěr

H.1 Obecné hodnocení

Absolutní hodnocení – faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu

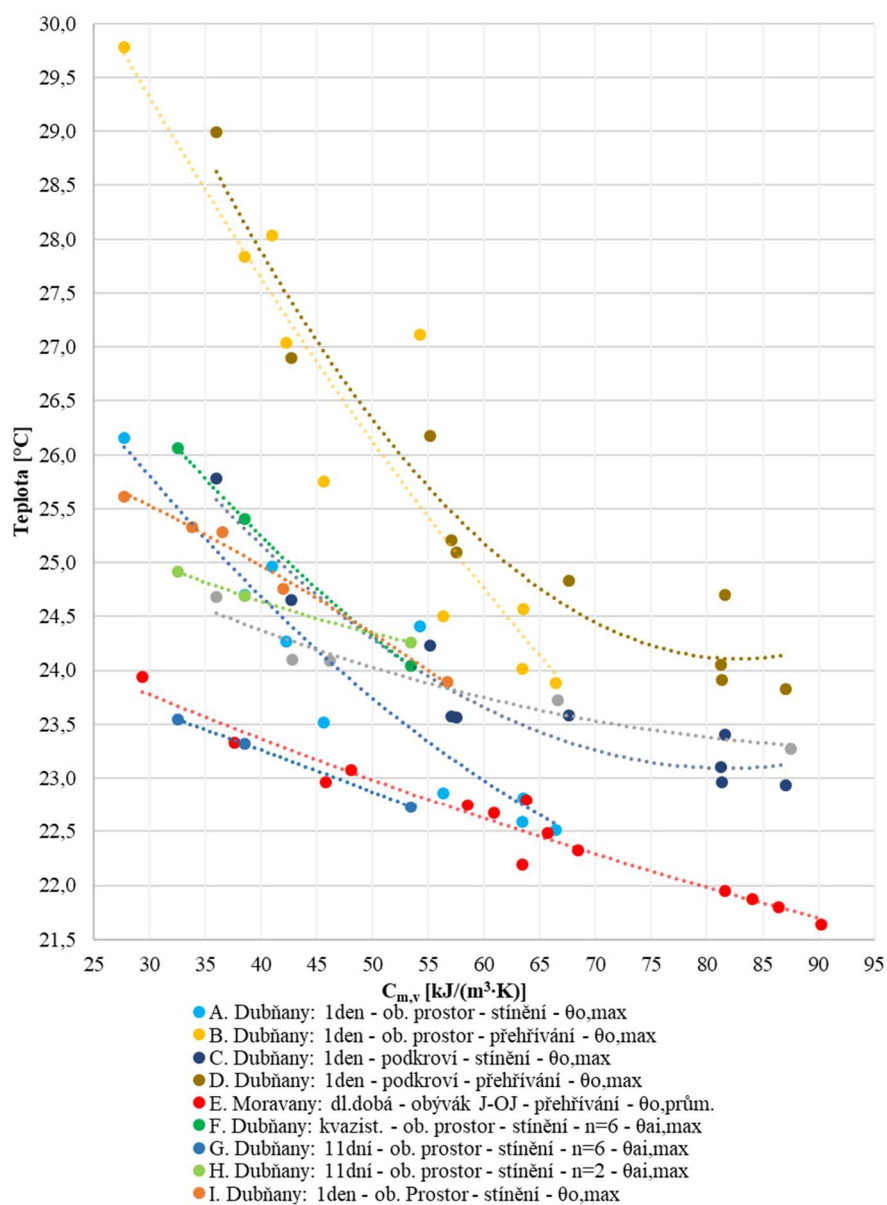
Z většiny těchto měření a simulací vyplívá, že vnitřní tepelně akumulační hmota není hlavním faktorem ovlivňujícím vnitřní teplotu. Níže jsou od nejvyššího po nejnižší zjednodušeně uvedeny faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu a výsledné teploty θ_{ai} a $\theta_{ai,max}$. Hodnocení předpokládá, že všechny ostatní faktory nepřispívají negativně k faktoru právě hodnocenému.

1. Nejvíce vnitřní teplotu ovlivňují **sluneční zisky přes průsvitné výplně otvorů**.
2. O trochu méně ovlivňuje vnitřní teplotu samotné **větrání místnosti**.

3. Dalším faktorem jsou **vnitřní tepelné zisky od osob a spotřebičů**.
4. Dalším faktorem je samotný **vliv vnitřní tepelně akumulací hmoty**.
5. Posledním faktorem jsou **tepelné zisky neprůsvitnými konstrukcemi** sousedícími s exteriérem.

Absolutní hodnocení – vliv vnitřní tepelně akumulací hmoty

Toto zobrazuje hlavní závěrečný graf této práce - Graf 10. V tomto grafu jsou zobrazeny stěžejní simulace této práce. Každá simulace v podobě skupiny bodů je doplněna spojnici trendu.



Graf 10 Vliv měrné tepelné kapacity místnosti $C_{m,v}$ na nejvyšší dosažené teploty vzduchu $\theta_{ai,max}$ popř.

$\theta_{o,max}$

Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,v}$ [kJ/(m ³ ·K)]	$\Delta \theta_{ai,max}$ [°C]													
	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
1. Průměrný den (také průměr ze všech dní)		+1,4	+1,2	+0,9	+0,5 +0,7	+0,6	+0,4	+0,2	0	-0,2	-0,4	-0,5	-0,7	-0,9

2. Den s vyšší tepelnou zátěží (některé dny) - standardní místnost		+2,6	+2,0	+1,5	+1,1	+0,6	+0,3	0	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	
3. Den s vyšší tepelnou zátěží (některé dny) - kritická místnost	+2,3	+1,6	+1,0	+0,5	0	-0,4	-0,9	-1,2	-1,5					
4. Den při naakumulování těžké stavby (některé dny)	teploty u všech variant zhruba stejné													

Zjednodušená legenda konstrukčních systémů:

L1 velmi lehké dřevostavby		- pouze SDK + fólie, podlahy suchý systém
L2 lehké dřevostavby		- SDK + OSB nebo SVL, podlahy suchý systém
L3 dřevostavby		- SDK + OSB nebo SVL, podlahy mokrý systém
L4 akumulační dřevostavby		- masivní prvky např. 3xSDK+OSB / vyzdívky, podlahy mokrý systém
M1 pórobetonový zděný systém		- zdivo i stropy, podlahy mokrý systém
M2 keramický zděný systém		- zdivo i stropy, podlahy mokrý systém
H1 VPC zděný systém (nižší obj.hm.)		- zdivo i stropy, podlahy mokrý systém
H2 vápenopiskový zděný systém		- zdivo a ŽB stropy, podlahy mokrý systém
H3 železobetonový monolit. systém		- stěny i stropy, podlahy mokrý systém

Tabulka 7 Vliv měrné tepelné kapacity místnosti $C_{m,v}$ na nejvyšší dosažené teploty vzduchu $\theta_{ai,max}$ popř. $\theta_{o,max}$ – srovnání konstrukčních systémů

H.2 Zodpovězení cílů práce

2. Jak významný je vliv vnitřní tepelné akumulace vzhledem k ostatním faktorům ovlivňujících letní tepelnou stabilitu pasivních domů (sluneční zisky, vnitřní zisky, větrání atd.).

Na nejvyšší dosaženou teplotu v interiéru $\theta_{ai,max}$ nemá nejvyšší vliv vnitřní tepelná akumulace stavby. Nejvyšší vliv na výslednou vnitřní teplotu místnosti mají sluneční zisky přes průsvitné výplně otvorů (cca 2,0 – 6,0 °C). Dále mohou negativně ovlivnit vnitřní teplotu větrání místnosti a vnitřní tepelné zisky od osob a spotřebičů (cca 1,0 – 3,0 °C). Samotná vnitřní tepelně akumulační hmota ovlivňuje teplotu spíše méně (cca 0,5 – 1,5 °C). Nejméně ovlivňují vnitřní teplotu tepelné zisky přes neprůsvitné exteriérové konstrukce (max. 0,5 °C).

1. Jaký vliv má vnitřní tepelná akumulace konstrukcí pasivních domů na jejich letní tepelnou stabilitu.

Vnitřní tepelná akumulace konstrukcí pasivních domů má nezanedbatelný vliv na jejich letní tepelnou stabilitu objektu. Na druhou stranu však není tento vliv zcela zásadní a rozhodující. Pakliže vezmeme v úvahu nejlehčí možný a nejtěžší možný konstrukční systém pro standardní den a standardní místnost bez přehřívání, budou rozdíly v nejvyšší dosažené vnitřní teplotě vzduchu $\theta_{ai,max}$ v létě zhruba na úrovni 2,1 °C (viz část 0). Stejně rozdíly platí pro dlouhodobé hodnocení celého letního období, pokud všechny nejvyšší dosažené teploty zprůměrujeme. Nejlehčí konstrukční systém v práci reprezentuje velmi lehká dřevostavba $C_{m,V} = 25 - 30 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, nejtěžší pak železobetonová monolitická stavba $C_{m,V} = 90 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$. Ve dnech s nižší tepelnou zátěží, popř. při stavu plného naakumulování těžké stavby, mohou být dosažené teploty u obou systémů téměř shodné – rozdíl 0,0 °C. Naopak v některých jednotlivých dnech s velmi vysokou tepelnou zátěží mohou rozdíly dosahovat 3,8 °C i více.

Interpretace výsledků je zde naprosto zásadní. Proto není vhodné srovnávat extrémní případy – konkrétně velmi lehká dřevostavba vs. velmi těžká monolitická stavba. V praxi se setkáváme se srovnáním nižšího rozsahu, např. lehká dřevostavba ($C_{m,V} = 40 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$) vs. zděná stavba z keramických tvárnic ($C_{m,V} = 65 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$) nebo zděná pórobetonová stavba ($C_{m,V} = 50 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$) vs. zděná vápenopísková stavba ($C_{m,V} = 80 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$). V takovýchto případech jsou výše jmenované rozdíly zhruba poloviční. **Rozdíly mezi lehčím a znatelně těžším konstrukčním systémem se u standardní místnosti pro standardní den bez přehřívání pohybují spíše na úrovni zhruba 1 °C.**

I Vybraný seznam publikací a projektů autora

NĚMEČEK, M.; KALOUSEK, M. Influence of thermal storage mass on summer thermal stability in a passive wooden house in the Czech Republic. *Energy and Buildings*, 2015, 107(1), 68-75. ISSN: 0378-7788.

NĚMEČEK, M.; KALOUSEK, M. Summer Thermal Stability of a Passive House in Moravany - the Czech Republic and Thermal Storage Mass. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, roč. 824, č. 824, s. 544-551. ISSN: 1660-9336.

NĚMEČEK, M.; KALOUSEK, M. Quasistationary and dynamic simulation of summer overheating of passive timber house. In: *enviBUILD 2012*. Advanced Materials Research,

(online). Special Issue. Švýcarsko: TransTechPublication, 2013. s. 109-112. ISBN: 978-3-03785-596-6. ISSN: 1662-8985.

Specifický výzkum VUT v Brně, FAST 2014 – Projekt: FAST-J-14-2433, název: DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ TEPELNÉ STABILITY PASIVNÍHO DOMU - SROVNÁNÍ S DYNAMICKOU SIMULACÍ (Navrhovatel: Ing. Martin Němeček, Spoluřešitel: Doc. Ing. Miloš Kalousek, Ph.D.).

J Vybraný seznam použitých zdrojů

1. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov. *Úřední věstník Evropské unie L 153*. 18. červen 2010. stránky 13-35. ISSN 1725-5074.
2. Garg, H. P., Mullick, S. C., & Bhargava, A. K. *Solar Thermal Energy Storage*. Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1985. ISBN 978-90-277-1930-0.
3. ČSN EN ISO 13786. *Tepelné chování stavebních dílců - Dynamické tepelné charakteristiky - Výpočtové metody*. Praha : Český normalizační institut, 1.3.2018. Třídící znak: 730563.
4. ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha : Český normalizační institut, 1. 10 2011. Třídící znak 730540.
6. ČSN 73 0540-4. *Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody*. Praha : Český normalizační institut, 2005. Třídící znak: 730540.
7. ČSN EN ISO 13791. *Tepelné chování budov - Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení - Základní kritéria pro validační postupy*. Praha : Český normalizační institut, 1.9.2012. Třídící znak: 730318.
8. ČSN EN ISO 13792. *Tepelné chování budov - Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení - Zjednodušené metody*. Praha : Český normalizační institut, 2012. Třídící znak: 730320.
9. ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha : Český normalizační institut, 1. 11 2005. Třídící znak: 730540.
12. Shaviv, E., Yezioro, A., Capeluto, I.G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy*. 2001, Vol. 24, 3-4, pp. 445–452.
15. Doc. Ing. Jaroslav Řehánek, DrSc. *Tepelná akumulace budov*. Praha : ČKAIT, 2002. ISBN 80-86364-59-3.
20. Santamouris M., Asimakopoulos D. *Passive Cooling of Buildings*. London : James & James (Science Publishers) Ltd, 1996. ISBN 978-1-873936-47-4.
21. Davies, Morris G. *Building Heat Transfer*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2004. ISBN 978-0-470-84731-2.